



**Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet**

Preddiplomski studij

GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO

Predavanje 4.

Terenski istražni radovi

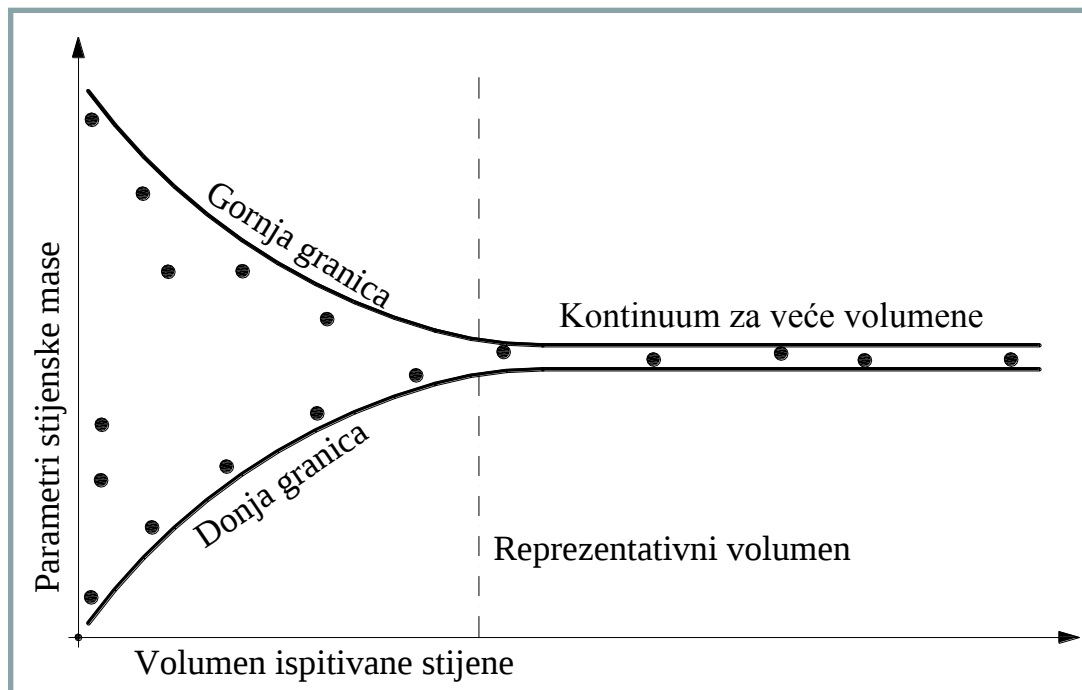
- Ispitivanje karakteristika stijene na terenu (in situ) oduvijek je bilo od posebnog interesa za geotehničku praksu.
- Njegove su prednosti pred laboratorijskim ispitivanjima brojne, od činjenice da se stijena ispituje u prirodnoj sredini (u velikoj masi), do mogućnosti dobijanja kontinuiranih podataka o stijeni po dubini. Također, postupci ispitivanja su brzi, relativno jeftini i najčešće jednostavni.
- U posljednjih nekoliko desetljeća, projektiranje u stijenskom inženjerstvu je doživilo svoju ekspanziju, te je sukladno tome porasla i potreba za što kvalitetnijim programom istražnih radova, potrebnim za određivanje parametara koji će omogućiti pouzdano projektiranje, izvođenje i sigurno funkcioniranje izvedene građevine.

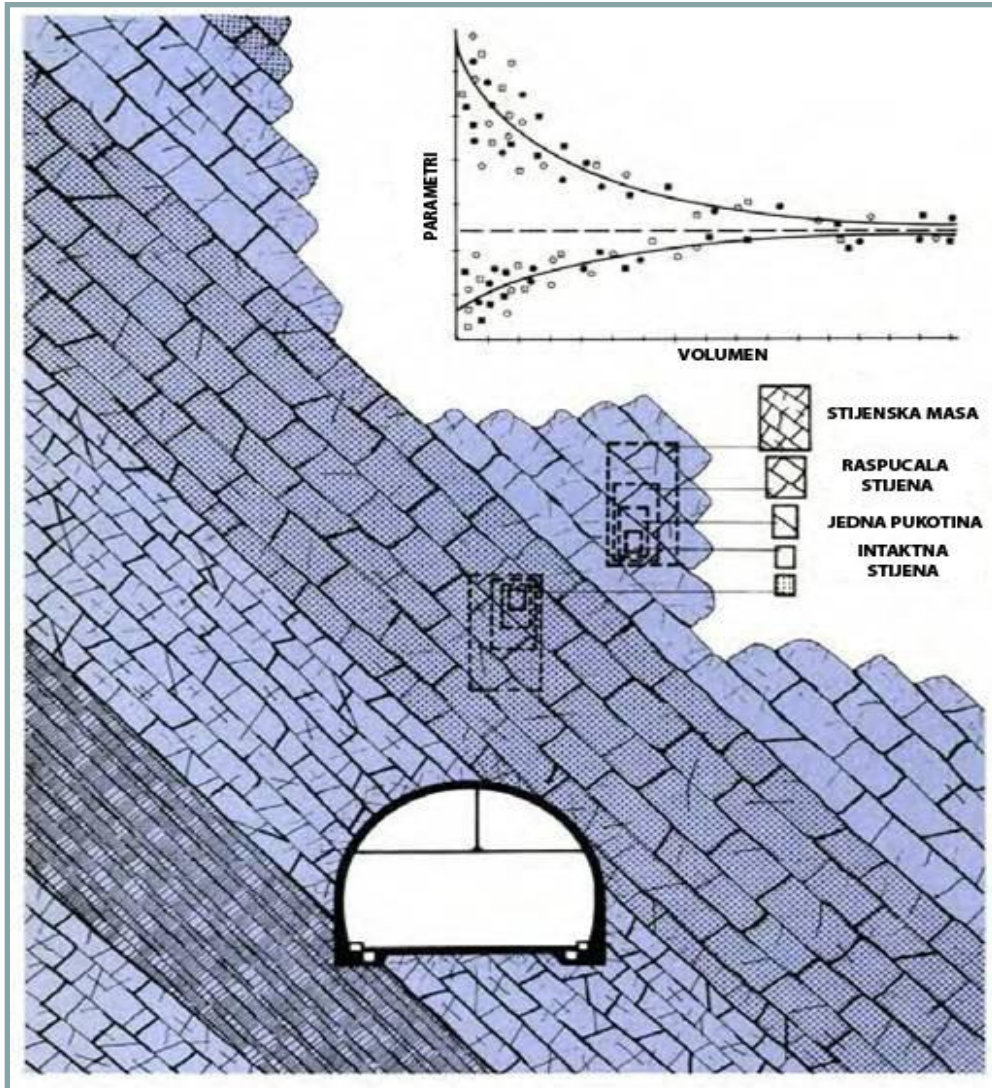
- Pitanja koja se postavljaju prilikom izrade programa istražnih radova su:
 1. Kako se može stijenska masa opisati globalno na objektivan način?
 2. Koliko je informacija potrebno za karakterizaciju stijenske mase?
 3. Kako se informacije mogu uspješno prikupiti?
 4. Kolika je razina rezolucije potrebna pri mjerenju određenog parametra?
 5. Na koji način odlučiti jesu li dobivene informacije dostatne za projektne zahtjeve?
- Idealan program istražnih radova uključuje **kombinaciju terenskih i laboratorijskih ispitivanja**, ovisno o rizičnosti cjelokupnog projekta.
- Razina sofisticiranosti terenskih ispitivanja u funkciji je cilja i smanjivanja cijene projekta.

- Rizičnost i nesigurnost su karakteristike tla i stijene i nikad se ne mogu u potpunosti eliminirati. Opseg i razina istraživanja mora biti usklađena sa rizičnosti cijelog projekta.
- Analiza rizika mora dati odgovor na slijedeća 3 pitanja:
 1. Što može poći po zlu?
 2. Kolika je vjerojatnost nesreće?
 3. Koje su posljedice svega toga?
- Ovisno o vjerojatnosti pretpostavljenog rizika i odgovarajućim posljedicama, projektiranje se može klasificirati kao **nisko**, **umjereno** ili **visoko rizično**. Nisko rizični projekti mogu biti s malo rizika s malom vjerojatnosti događanja i s ograničenim posljedicama, dok su visoko rizični projekti s velikim rizikom s velikom vjerojatnosti događanja i ozbiljnim posljedicama.

- Opseg ispitivanja varira u ovisnosti od veličine i važnosti objekta, dubini ispitivanja, kompleksnosti stijenske mase kao i o opsegu ranije izvršenih istraživanja.
- Procjenjuje se da uobičajena cijena istraživanja iznosi tek oko 0.25% do 1% ukupne cijene objekta kod jednostavnijih geoloških formacija, te 5% i više kada je riječ o kompleksnoj geologiji i nepristupačnim terenima.
- Kod projektiranja radova na ili u stijenskoj masi, nužno je poznavati njena mehanička svojstva (čvrstoću i deformabilnost), kao i stanje naprezanja u kojem se ona nalazi.

- Za **mali volumen** koji se ispituje, stijenska masa se najčešće ponaša kao **diskontinuum** i svako novo ispitivanje daje bitno drugačije rezultate zbog različitog prisustva diskontinuiteta.
- Nakon povećanja volumena, te postizanja **reprezentativnog volumena**, stijenska masa se ponaša kao **kontinuum**, odnosno **kvazikontinuum**.





Odnos dimenzija reprezentativnog volumena stijenske mase i dimenzija tunela kod terenskih ispitivanja krutosti



UVOD

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

➤ Standardni terenski istražni radovi koji se koriste u mehanici stijena su:

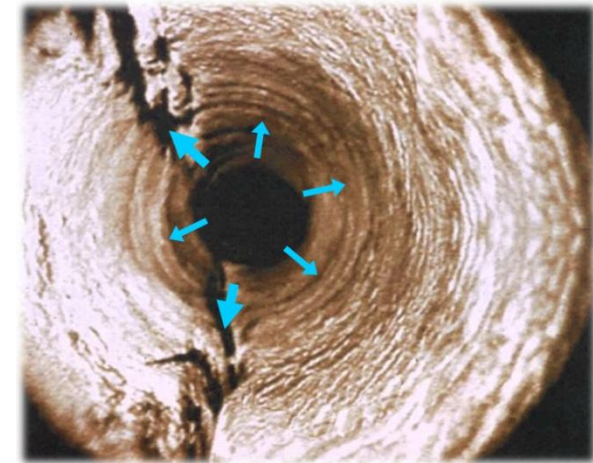
1. ISTRAŽNA BUŠENJA

2. MJERENJA PRIMARNOG STANJA NAPREZANJA

3. METODE TERENSKIH ISPITIVANJA KRUTOSTI

➤ Još uvijek nezamjenjiva tehnika terenskih ispitivanja stijenske mase kojom se otvara niz mogućnosti za različite vrste proučavanja stanja stijenske mase.

1. Dobijanje cilindričnih uzoraka ta ispitivanje intaktne stijene i diskontinuiteta u laboratoriju (određivanja fizikalnih i mehaničkih svojstava)
2. Unutar bušotine se mogu izvoditi pokusi za statičko određivanje čvrstoće i deformabilnosti stijenske mase kao i određivanje stanja primarnih naprezanja
3. Mogu poslužiti za bušotinska geofizička ispitivanja radi određivanja mehaničkih svojstava stijenske mase pri malim deformacijama
4. Ispitivanja vodopropusnosti stijenske mase
5. Ugrađivanje uređaja u bušotinu za opažanja pomaka
6. Uvid u stanje stijenske mase snimanjem stijenki bušotine i analiziranjem izvađenih jezgri





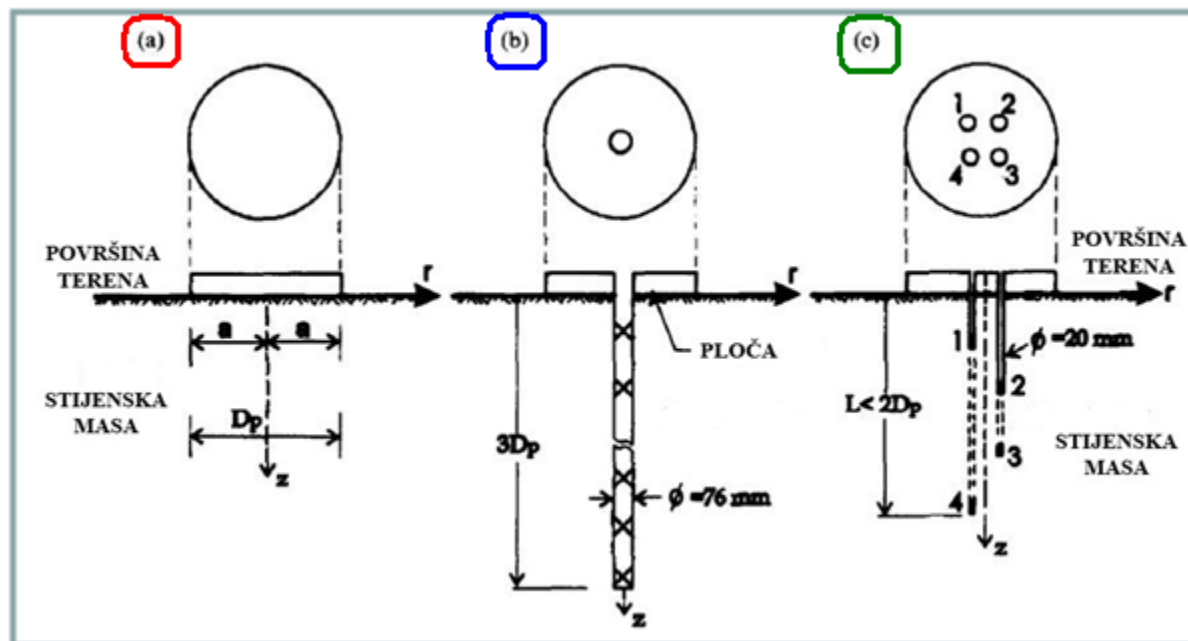
- Tri metode su široko prihvaćene, i preporučene od strane ISRM-a:

- Metode terenskih ispitivanja krutosti stijenske mase su:
 1. **POKUS OPTEREĆENJA PLOČOM**
 2. **POKUS RADIJALNOG OPTEREĆENJA**
 3. **ISPITIVANJA VELIKIM TLAČNIM JASTUCIMA**
 4. **FLEKSIBILNI DILATOMETAR**
 5. **KRUTI DILATOMETAR**
- Metode terenskih ispitivanja krutosti zahvaćaju različite volumene stijenske mase koji su u većini slučajeva značajno veći od laboratorijskih uzoraka i kao takvi mogu reprezentirati ponašanje stijenske mase.

POKUS OPTEREĆENJA PLOČOM **(Plate Loading Test)**

- Pokus opterećenja pločom (Plate Loading Test) zasniva se na **određivanju modula deformacije mjerenjem pomaka stijenske mase izazvanih opterećivanjem kružnom pločom odgovarajućeg promjera.**
- Za potrebe temeljenja teških građevina na stijeni (brane, mostovi i sl.) vrši se opterećenje pločom na površini terena.
- Pomaci stijenske mase mogu se mjeriti u centru ploče **na površini**, ali i **po dubini** opterećene stijenske mase, kako u centru tako i izvan centra ploče ugradnjom odgovarajućih ekstenzometara. Prednost mjerenja pomaka po dubini leži u činjenici da se time izbjegava poremećenost stijenske mase na kontaktu što značajno smanjuje dobiveni modul deformacije ako se pomaci mjere samo na površini.

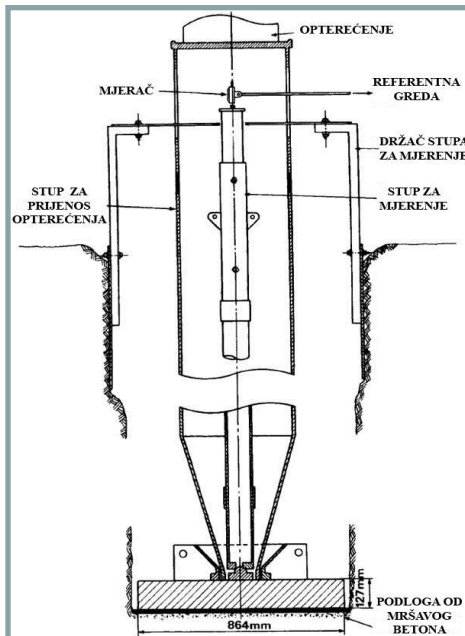
- Preporuča se da promjer ploče bude od 0,5 - 1,0 m.
- Veći promjeri ploče su bolji jer zahvaćaju veći volumen ispitivane stijenske mase, ali zato zahtijevaju i znatno veće opterećenje za postizanje željenog naprezanja.
- Opterećenje se prenosi **hidrauličkim prešama** za koje treba osigurati kontra teret što se u praksi najčešće postiže sidrenjem.



*Ispitivanja pločom na
površini terena:*

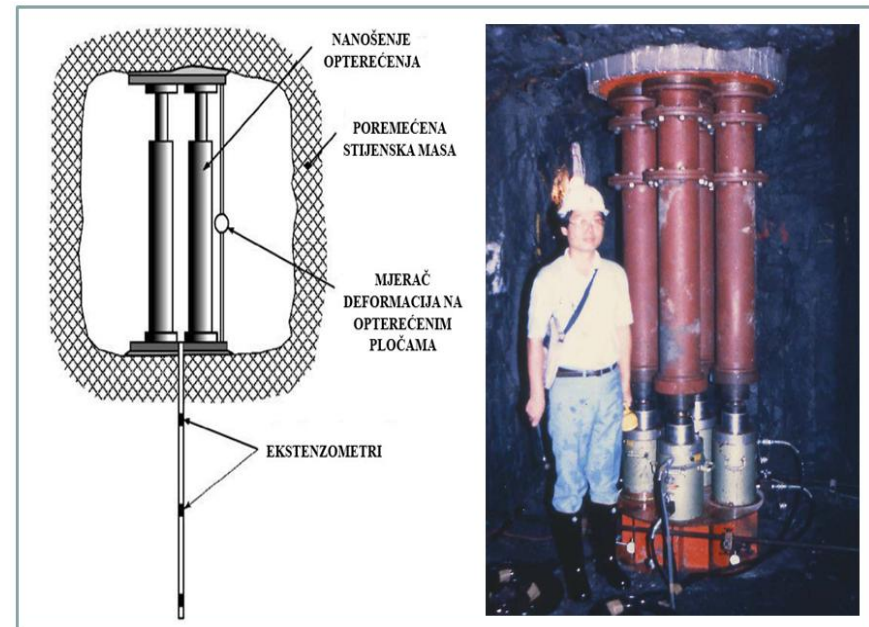
- (a) mjerenje pomaka na površini u centru ploče,
- (b) mjerenje pomaka u centru ploče po dubini,
- (c) mjerenje pomaka na više mjesta po dubini.

- U slučajevima temeljenja izrazito velikih građevina kod kojih je potrebno poznavanje promjene modula deformacije sa dubinom koriste se **ispitivanja pločom u bušotinama velikog promjera** koja se provode na različitim dubinama.
- Za projektiranje tunela pokus se izvodi u **probnim tunelima ili galerijama** posebno izvedenim za potrebe ispitivanja ili na početnim dionicama tunela koji se izvode. Prednost ovakvog ispitivanja je mogućnost postizanja velikih naprezanja uz istovremeno korištenje ploča velikih promjera zbog veoma jednostavnog načina razupiranja o suprotne stijenske mase u kojem se izvodi ispitivanje.



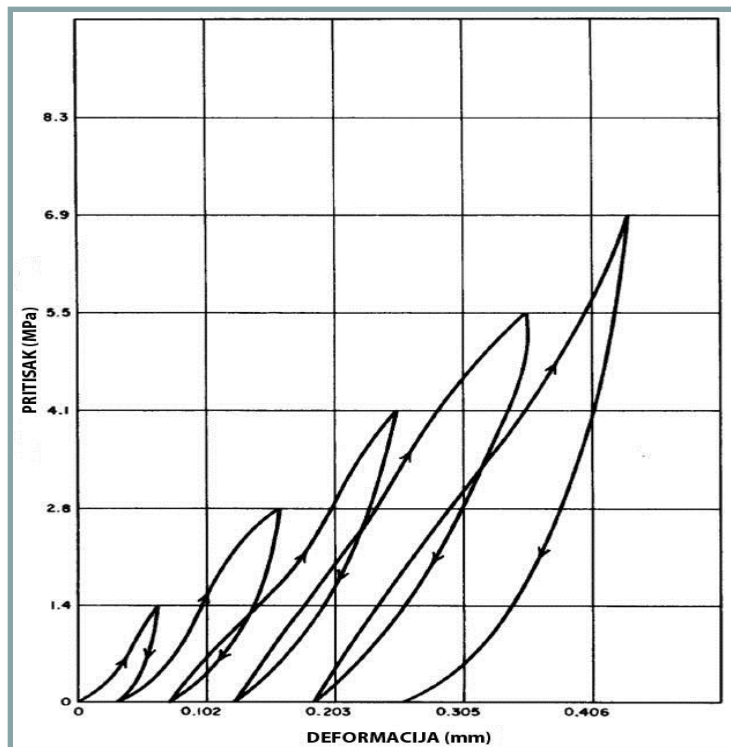
ISPITIVANJE U BUŠOTINI

ISPITIVANJE U PROBNOM TUNELU



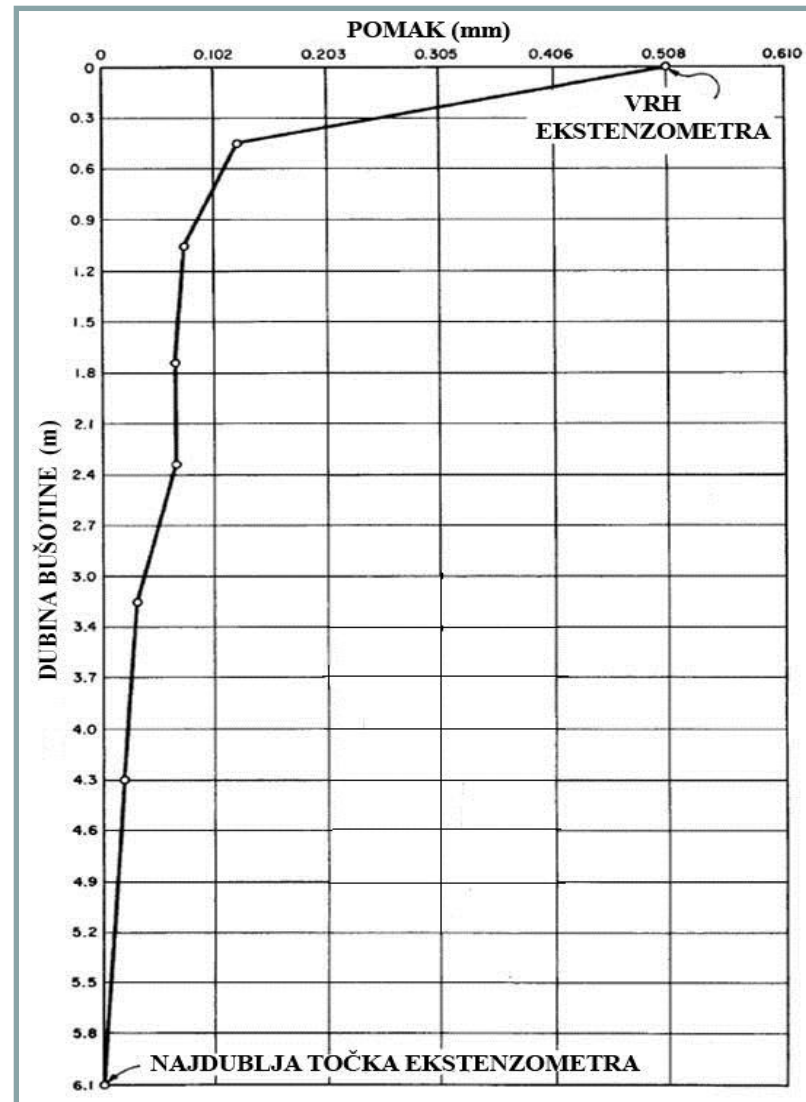


- Pokus se izvodi sa dvije ploče koje opterećuju suprotne stijenske tunela. Provođenjem više pokusa u različitim smjerovima može se odrediti stupanj anizotropije stijenske mase obzirom na deformabilnost. Mjerenje pomaka po dubini stijenske mase vrši se ugradnjom odgovarajućih ekstenzometara u obje opterećivane površine do dubine koja je oko 6 puta veća od promjera ploče gdje se očekuje da neće biti pomaka.
- Prije provođenja ispitivanja potrebno je očistiti i pripremiti površinu promjera 1,5 do 2 puta većeg od promjera ploče koja će se koristiti u ispitivanju te cementirati površinu ispod same ploče radi osiguranja kvalitetnog prijenosa opterećenja.
- Pokus se provodi inkrementalnim opterećivanjem i rasterećivanjem ploče do maksimalnog naprezanja koje treba biti 1,2 do 1,5 puta veće od očekivanog naprezanja u eksploataciji. Trajanje jednog inkrementa opterećenja je 24h nakon čega slijedi rasterećenje u istom trajanju. U slučaju da se deformacije ne završe nakon 24h potrebno je produžiti trajanje opterećenja.
- Preporučljivo je dostići maksimalno naprezanje kroz najmanje 5 inkremenata odnosno 5 ciklusa opterećenja i rasterećenja.



REZULTATI ISPITIVANJA
OPTEREĆENJA PLOČOM NA
POVRŠINI

REZULTATI ISPITIVANJA
OPTEREĆENJA PLOČOM NA
DUBINI



- U nastavku je dan postupak određivanja **modula deformacije** za pokus opterećenja pločom.
- Iako se stijenska masa pod opterećenjem ne ponaša linearno elastično, za izračunavanje modula deformacije koristi se teorija elastičnosti koja pretpostavlja da je stijenska masa linearno elastičan, homogen i izotropan beskonačni poluprostor.
- Da bi se u najvećoj mogućoj mjeri osigurala pretpostavka elastičnog poluprostora nužno je plohu preko koje se prenosi opterećenje proširiti u odnosu na promjer ploče. To je posebno važno kod ispitivanja u podzemnim prostorima radi izbjegavanja rubnih poremećaja.
- ISRM (1979.) i Boyle (1992.) smatraju da promjer površine preko koje se prenosi opterećenje (B) treba biti bar 1,5 do 2,0 puta veći od promjera ploče (D). Van Heerden i Maschek (1979.) na temelju provedene numeričke simulacije metodom konačnih elemenata sugeriraju da odnos B/D treba biti barem 6. Na temelju iskustva na provedenim ispitivanjima Ćunalić (1997.) smatra da je za postizanje ciljanih uvjeta odnos $B/D = 1,5$ dovoljan.

- Opterećenje stijenske mase može se izvesti primjenom fleksibilne ili krute ploče ovisno o krutosti materijala koji se ispituje.
- **Kruto prenošenje opterećenja** ostvaruje se izravnim prijenosom opterećenja na stijensku masu preko čeličnih ploča različite debljine, a **fleksibilan prijenos opterećenja** postiže se umetanjem tlačnih jastuka između ploče i stijenske mase.
- Primjena krute ploče znatno je povoljnija kada se radi o ispitivanju tla ili mekih stijena, a primjena fleksibilnih ploča kod ispitivanja krutih stijena.
- Posljedica primjene fleksibilne ploče je **ravnomjerna razdioba naprezanja po cijeloj površini ploče**, a posljedica primjene krute ploče je **ravnomjerna razdioba pomaka po cijeloj površini ploče**.

(1) Određivanje modula deformacije stijenske mase za fleksibilnu ploču i ravnomjerno raspodijeljeno opterećenje na površini

- Usvajajući pretpostavke linearne teorije elastičnosti izmjereni **pomak po dubini stijenske mase** u centru jednoliko opterećene površine glasi:

$$w_z = \frac{2 \cdot q \cdot (1 - \nu^2)}{E_m} \cdot \left[(a^2 + z^2)^{1/2} - z \right] - \frac{q \cdot z \cdot (1 + \nu)}{E_m} \cdot \left[z \cdot (a^2 + z^2)^{-1/2} - 1 \right]$$

gdje je:

w_z – izmjereni pomak u smjeru opterećenja na udaljenosti z , za naprezanje q

z – udaljenost od opterećene površine i točke na kojoj se mjeri pomak

q – naprezanje na kontaktu ploče i stijenske mase

a – radijus opterećene površine odnosno ploče

ν – Poissonov koeficijent

E_m – Modul deformacije stijenske mase

- Uvodeći zamjenu:

$$K_z = 2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left[(a^2 + z^2)^{1/2} - z \right] - z \cdot (1 + \nu) \cdot \left[z(a^2 + z^2)^{-1/2} - 1 \right]$$

može se napisati:

$$E_m = \frac{q}{w_z} K_z$$

- U slučaju da su **mjereni pomaci samo na izloženoj površini** odnosno na kontaktu ploče i stijenske mase ($z = 0$) modul deformacije glasi:

$$E_m = \frac{q}{w_{z0}} K_z$$

gdje je:

w_{z0} – izmjereni pomak ploče u smjeru opterećenja za naprezanje q

(2) Određivanje modula deformacije stijenske mase za krutu ploču i ravnomojno raspodijeljene pomake ispod ploče

- Usvajajući pretpostavke teorije elastičnosti izmjereni pomak **po dubini stijenske mase** po cijeloj opterećenoj površini glasi:

$$w_{z,r} = \frac{Q}{E_m \cdot D \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot [2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot I_{101}(\psi) + z \cdot (1 + \nu) \cdot I_{103}(\psi)]$$

gdje je:

$w_{z,r}$ – izmjereni pomak u smjeru opterećenja na udaljenosti z , za opterećenje Q

za bilo koju točku unutar poluprostora

z – udaljenost od opterećene površine i točke na kojoj se mjeri pomak

Q – sila kojom se opterećuje ploča

ν – Poissonov koeficijent

E_m – modul deformacije stijenske mase

- Integrali $I_{101}(\psi)$ i $I_{103}(\psi)$ su dani sljedećim izrazima:

$$I_{101}(\psi) = \left\{ \frac{2}{\pi} \right\}^{1/2} \sigma_0$$

$$I_{103}(\psi) = \left\{ \frac{2}{\pi} \right\}^{1/2} N_0^{-1} \sin \frac{1}{2} \lambda_0$$

$$\sigma_0 = \arcsin \left\{ 2 \left[\left\{ \psi^2 + (1+r)^2 \right\}^{1/2} + \left\{ \psi^2 + (1-r)^2 \right\}^{1/2} \right]^{-1} \right\}$$

$$N_0 = \left\{ (\psi^2 + r^2 - 1)^2 + 4\psi^2 \right\}^{1/4}$$

$$\lambda_0 = \arctan \left\{ 2\psi(\psi^2 + r^2 - 1)^{-1} \right\}$$

- r – radijalna udaljenost od centra ploče
- Za izotropne materijale vrijedi $\psi = z$

- U osi ploče ($r = 0$), gdje se najčešće i mjere pomaci, integrali $I_{101}(z)$ i $I_{103}(z)$ su:

$$I_{101}(z) = \left\{ \frac{2}{\pi} \right\}^{1/2} a \cot z$$

$$I_{103}(z) = \left\{ \frac{2}{\pi} \right\}^{1/2} (z^2 + 1)^{-1}$$

- iz čega se dobije:

$$w_{z,0} = \frac{Q}{E_m \cdot D \cdot \pi} \left[2 \cdot (1 - \nu^2) a \cot z + (1 + \nu) \frac{z}{z^2 + 1} \right]$$

- Ako se stavi da je promjer ploče (D) jednak dvostrukom radijusu ploče ($2a$), a sila kojom se opterećuje ploča (Q) izrazi kao umnožak površine ploče ($a^2 \pi$) i prosječnog naprezanja na ploču (q_{av}), prethodni izraz postaje:

$$w_{z,r} = \frac{q_{av} \cdot a}{2 \cdot E_m} \left[2(1 - \nu^2) a \cot z + (1 + \nu) \frac{z}{z^2 + 1} \right]$$

- Uvodeći zamjenu:

$$K_{z,r} = \frac{a}{2} \cdot \left[2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot a \cdot \cot z + (1 + \nu) \cdot \frac{z}{z^2 + 1} \right]$$

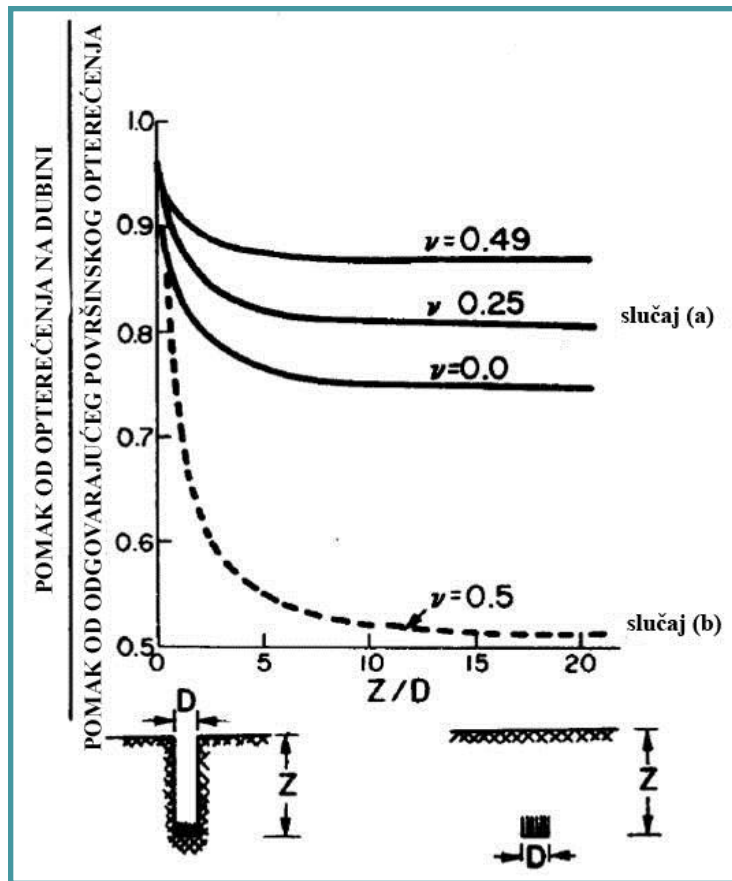
- može se napisati:

$$E_m = \frac{q_{av}}{w_{z,r}} \cdot K_{z,r}$$

- U slučaju da su **mjereni pomaci samo na izloženoj površini** odnosno na kontaktu ploče i stijenske mase ($z = 0$) modul deformacije glasi:

$$E_m = \frac{q_{av}}{w_{0,r}} \cdot K_{0,r}$$

- U slučaju da se opterećenje pločom izvodi u bušotini velikog promjera izraze za module deformabilnosti potrebno je korigirati množeći ih sa faktorom korekcije dubine.



Faktor korekcije dubine u
ovisnosti o položaju opterećenja

- Boyle (1992.) je istaknuo neke nedostatke ovakvog načina određivanja modula deformacije stijenske mase:
- **Prvi nedostatak** je činjenica da je za određivanje modula deformacije potrebno pretpostaviti Poissonov koeficijent.
- **Drugi nedostatak** je što su se primjenom navedenih izraza često dobivali moduli deformacije nekoliko puta veći od modula intaktne stijene iz laboratorijskih pokusa što je fizikalno nemoguće.
- **Treći i najvažniji nedostatak** je činjenica što su se za svaki interval mjerenja dobivale drugačije vrijednosti modula deformacije stijenske mase što je teško prihvatljivo obzirom na relativno mali volumen stijenske mase zahvaćen ispitivanjem, tj. da su već na dubini od 3 promjera ploče pomaci toliko mali da se praktički ne mogu niti izmjeriti sa zadovoljavajućom točnošću.

- Da bi prevladao uočene nedostatke Boyle predlaže alternativni postupak određivanja modula deformacije primjenom metode najmanjih kvadrata kod koje bi se koristili svi izmjereni pomaci po dubini i dobio jedinstveni modul.
- Da bi odredio nepoznati modul deformacije i nepoznati Poissonov koeficijent definira funkciju ϕ kao sumu kvadrata odstupanja proračunatih i izmjerenih vrijednosti pomaka na različim dubinama i za određeno opterećenje:

$$\phi = \sum_{i=1}^n (w_{pi} - w_{mi})^2$$

- gdje je:

w_{pi} – proračunati pomaci prema na istoj udaljenosti od ploče i za istu razinu opterećenja,

w_{mi} – mjereni pomaci na istoj udaljenosti od ploče i za istu razinu opterećenja,

n – broj točaka u kojima se mjere pomaci.

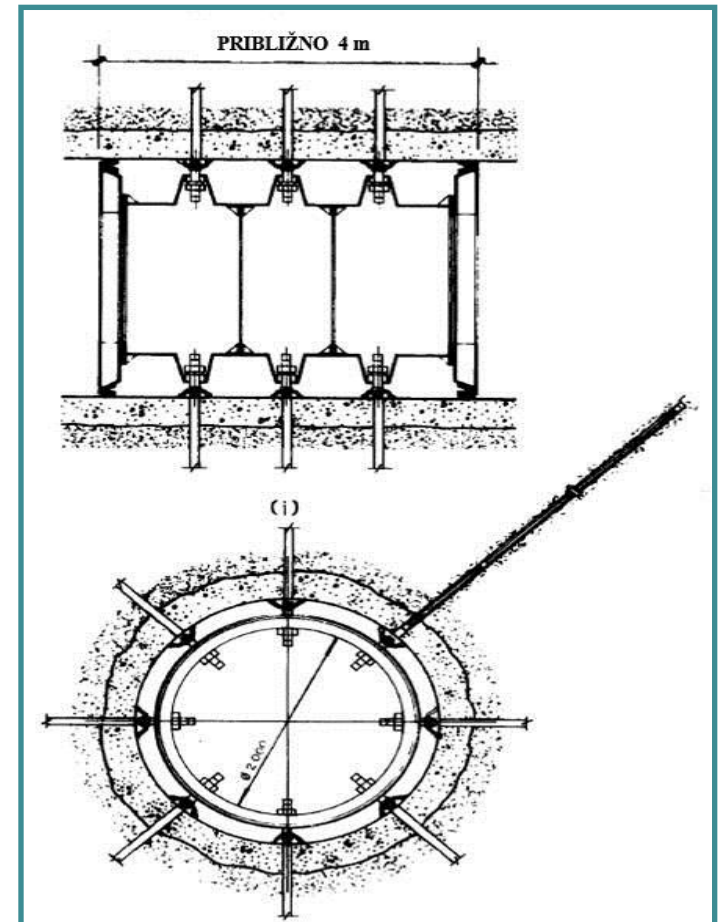
- Najmanje odstupanje kvadrata proračunatih i izmjerenih pomaka dobija se kada funkcija ϕ dosegne svoj minimum. Obzirom da se radi o funkciji sa dvije zavisne varijable ona doseže minimum kada prve derivacije funkcije po obje varijable budu jednake nuli:

$$\frac{\partial \phi}{\partial E_m} = 0 \quad \frac{\partial \phi}{\partial \nu} = 0$$

- Rješenjem dobivenih dviju jednadžbi sa dvije nepoznanice dobivaju se traženi E_m i ν .
- Predloženim postupkom ispravljeni su uočeni nedostaci. Poissonov broj je rezultat pokusa, a ne pretpostavka. Dobija se jedan jedinstveni modul deformacije za ispitivano područje. Dobiveni modul deformacije je u pravilu manji od modula intaktnog uzorka stijene iz laboratorijskih pokusa.
- Ünal (1997.) je potvrdio ispravnost ovakvog pristupa i ukazao na probleme mjerenja pomaka i broja mjernih točaka po dubini nužnih za dobivanje pouzdanih rezultata.

POKUS RADIJALNOG OPTEREĆENJA (Radial Jacking Test)

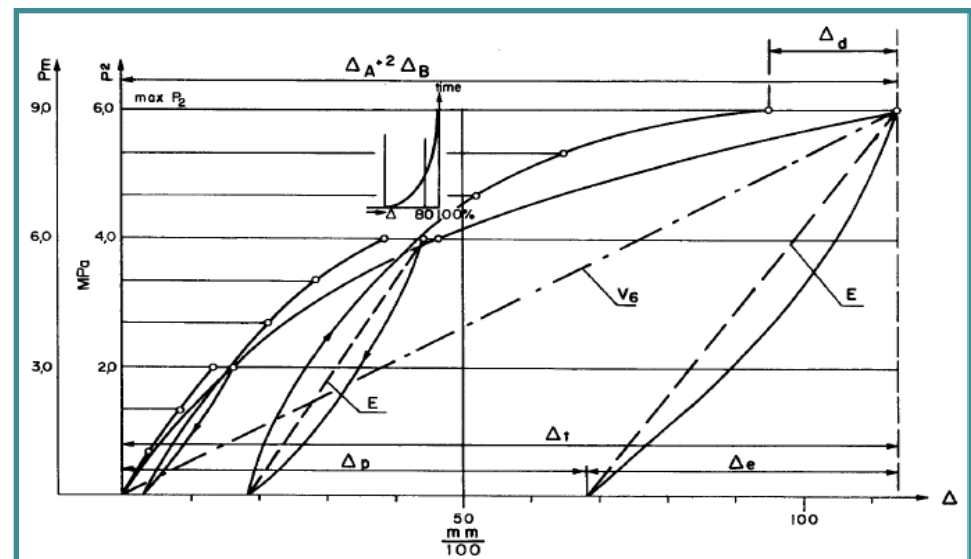
- Pokus radijalnog opterećenja (Radial Jacking Test) zasniva se na određivanju modula deformacije **mjenjenjem pomaka stijenske mase izazvanih radijalnim opterećivanjem stijenske mase.**
- Radijalno opterećivanje vrši se hidrauličkim prešama ili pritiskom vode, a pomaci po dubini stijenske mase mjere se ugrađenim ekstenzometrima.



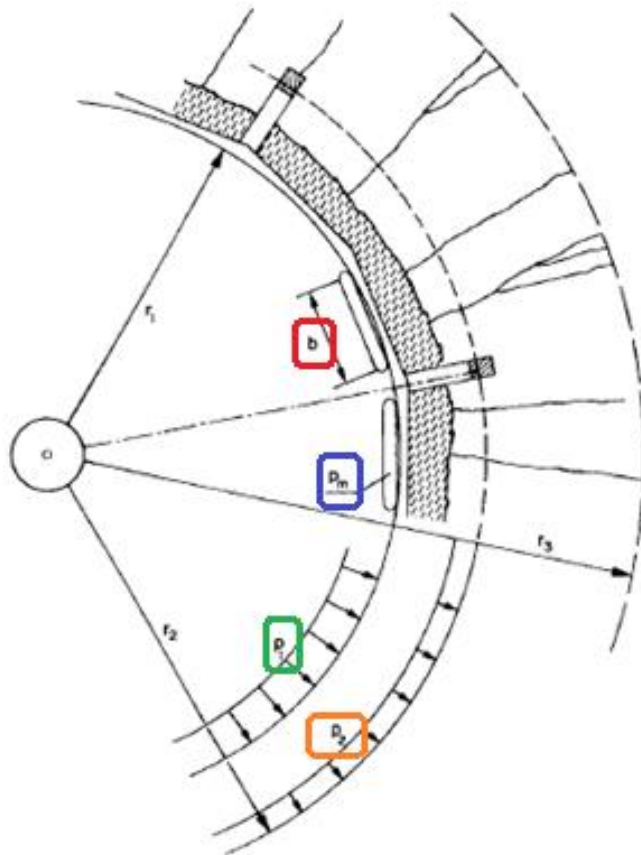
- Primjenjuje se za potrebe temeljenja velikih brana i drugih teških građevina, gdje se pokus odvija u testnim komorama kružnog poprečnog presjeka velikog radijusa ili u početnim dionicama tunela, gdje se onda ispitivanja izvode u mjerilu 1:1.
- Zahvaća veliki volumen stijenske mase pa najbolje od svih pokusa reprezentira stijensku masu sa svim njenim oslabljenjima i diskontinuitetima, što je i najveća **prednost** ovakvog ispitivanja, a moguće je i ispitati stupanj anizotropije stijenske mase obzirom na krutost. Prednosti ovakvog načina ispitivanja modula deformacije u odnosu na ostale postupke, prvenstveno zbog velikog volumena zahvaćenog testiranjem, prikazali su Bukovansky (1970.), Van Heerden (1976.) i Oberty, Coffi i Rossi (1983.) Smatraju da se svi drugi pokusi trebaju evaluirati u odnosu na pokus radijalnim opterećenjem.
- Glavni **nedostatak** ovog pokusa je visoka cijena i trajanje ispitivanja zbog čega se danas rijetko izvode.

- Prije provedbe pokusa potrebno je izvesti tlačnu komoru uz što manje poremećenje stijenske mase te izvesti betonsku oblogu preko koje će se vršiti opterećivanje.
- Pokus se provodi radijalnim opterećivanjem i rasterećivanjem stijenske mase uz prosječni inkrement opterećenja i rasterećenja 0,05 MPa/min do predviđenog masimalnog pritiska. Nakon dostizanja maksimalnog pritiska pomaci se mjere sve do prestanka deformacija.
- Preporučljivo je dostizanje maksimalnog naprezanja kroz najmanje 3 ciklusa opterećenja i rasterećenja.

REZULTATI ISPITIVANJA
POKUSOM RADIJALNOG
OPTEREĆENJA



- U slučaju da se za postizanje jednolikog radijalnog opterećenja koristi hidraulička preša, aplicirani pritisak na preši se mora korigirati da se dobije odgovarajući ravnomjerno raspodijeljeni pritisak na betonsku oblogu komore.



- Ravnomjerno raspodijeljeni pritisak na oblogu iznosi:

$$p_1 = \frac{\sum b}{2 \cdot \pi \cdot r_1} p_m$$

gdje je:

- p_1 – ravnomjerni pritisak na oblogu radijusa r_1
- p_m – aplicirani pritisak na hidrauličkoj preši
- b – širina segmenta preše preko kojeg se prenosi opterećenje.

- Ekvivalentni pritisak p_2 na ,mjernom radijusu' r_2 iza betonske obloge i zone oslabljene stijenske mase iznosi:

$$p_2 = \frac{r_1}{r_2} p_1 = \frac{\sum b}{2 \cdot \pi \cdot r_2} p_m$$

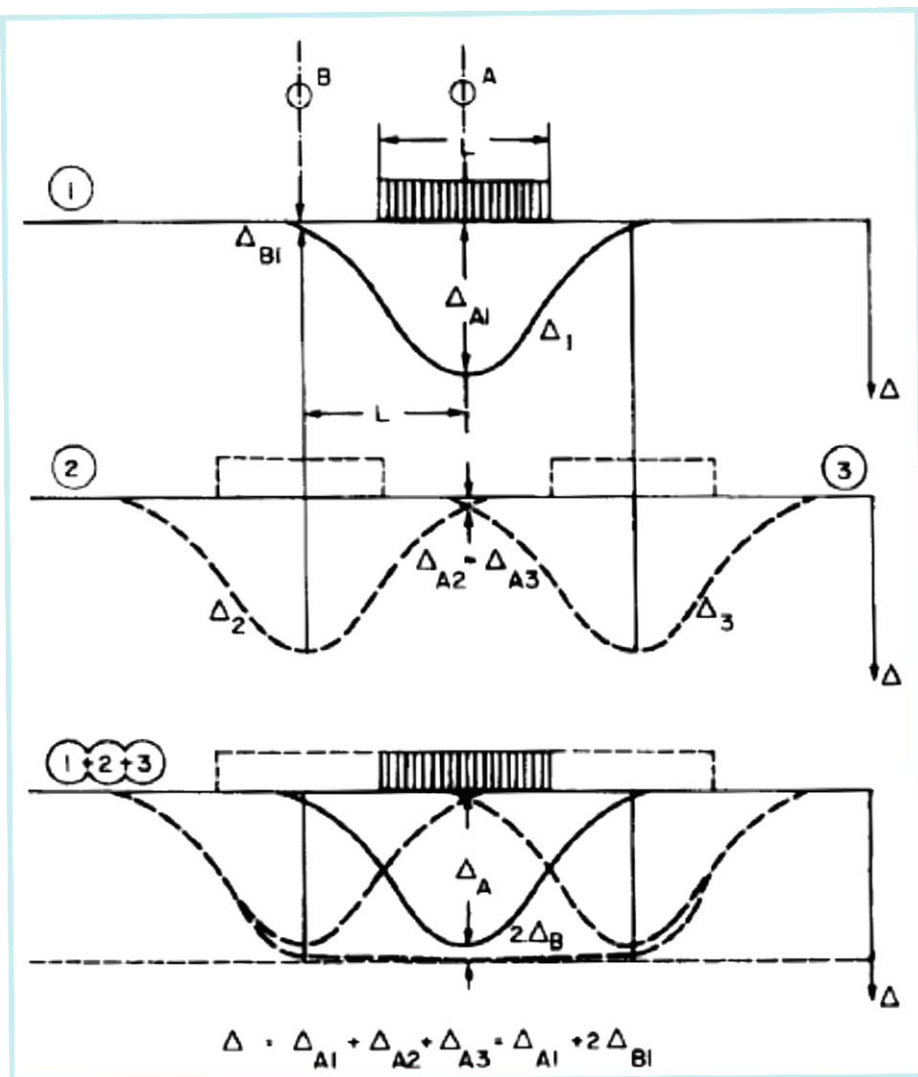
- Lauffer i Seeber (1961.) su prikazali postupak proračuna **modula deformacije** koristeći elastično rješenje deformacija beskonačno dugog cilindra opterećenog unutarnjim pritiskom po cijeloj svojoj duljini. Obzirom da je tlačna komora relativno kratka u odnosu na njen promjer nužno je izvršiti superpoziciju pomaka koji se mjere u sredini i blizu ruba komore da bi se dobili ravnomjerno raspoređeni pomaci koje bi izazvala beskonačna odnosno dovoljno duga komora.

$$\Delta = \Delta_{A1} + \Delta_{A2} + \Delta_{A3} = \Delta_{A1} + 2\Delta_{B1}$$

- Ukupni pomak (Δ_t) nakon što se postigne maksimalni pritisak te dođe do potpunog prestanka pomaka jednak je zbroju superponiranog pomaka (Δ) i pomaka za trajno maksimalno opterećenje (Δ_d) odnosno elastične (Δ_e) i plastične (Δ_p) komponente:

$$\Delta_t = \Delta + \Delta_d = \Delta_e + \Delta_p$$

SUPERPOZICIJA POMAKA IZAZVANIH U KOMORI DULJINE L



**MODUL
ELASTIČNOSTI**



$$E = \frac{p_2 \cdot r_2}{\Delta_e} \left(\frac{1+\nu}{\nu} \right)$$

**MODUL
DEFORMABILNOSTI**



$$E_m = \frac{p_2 \cdot r_2}{\Delta_t} \left(\frac{1+\nu}{\nu} \right)$$

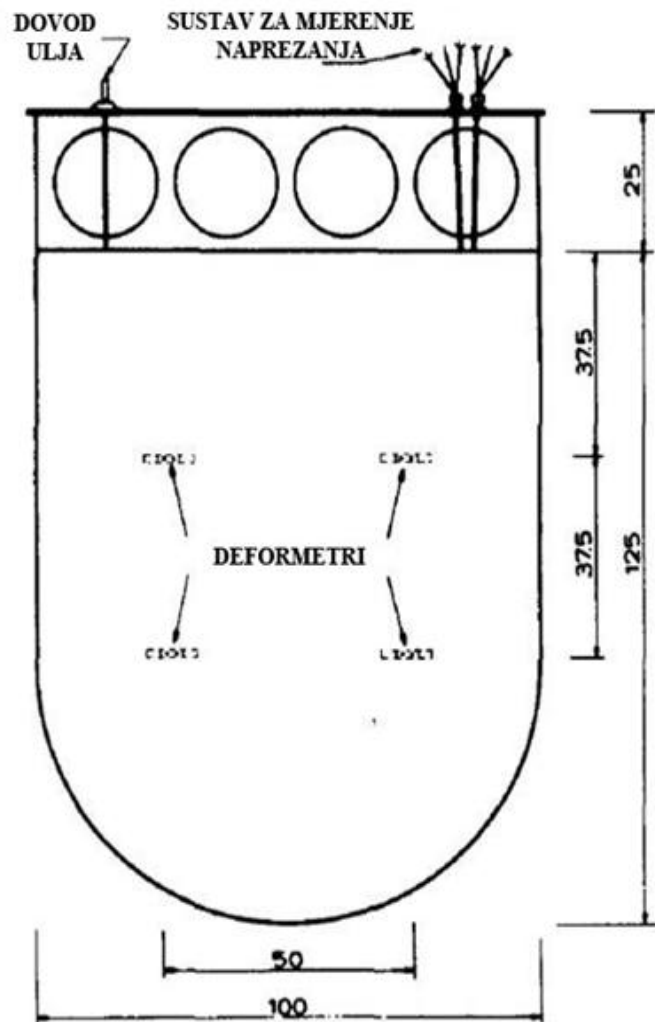
- Obzirom da se izvođenjem tlačne komore poremećuje dio stijenske mase oko podzemnog otvora mogu se, uz pretpostavku radijusa (r_3) kod kojeg prestaje utjecaj poremećenja, izračunati i odgovarajući moduli elastičnosti i deformacije stijenske mase:

$$E = \frac{p_2 \cdot r_2}{\Delta_e} \left(\frac{1+\nu}{\nu} \right) + \ln \frac{r_3}{r_2}$$

$$E_m = \frac{p_2 \cdot r_2}{\Delta_t} \left(\frac{1+\nu}{\nu} \right) + \ln \frac{r_3}{r_2}$$

VELIKI TLAČNI JASTUCI (Large Flat Jack, LFJ)

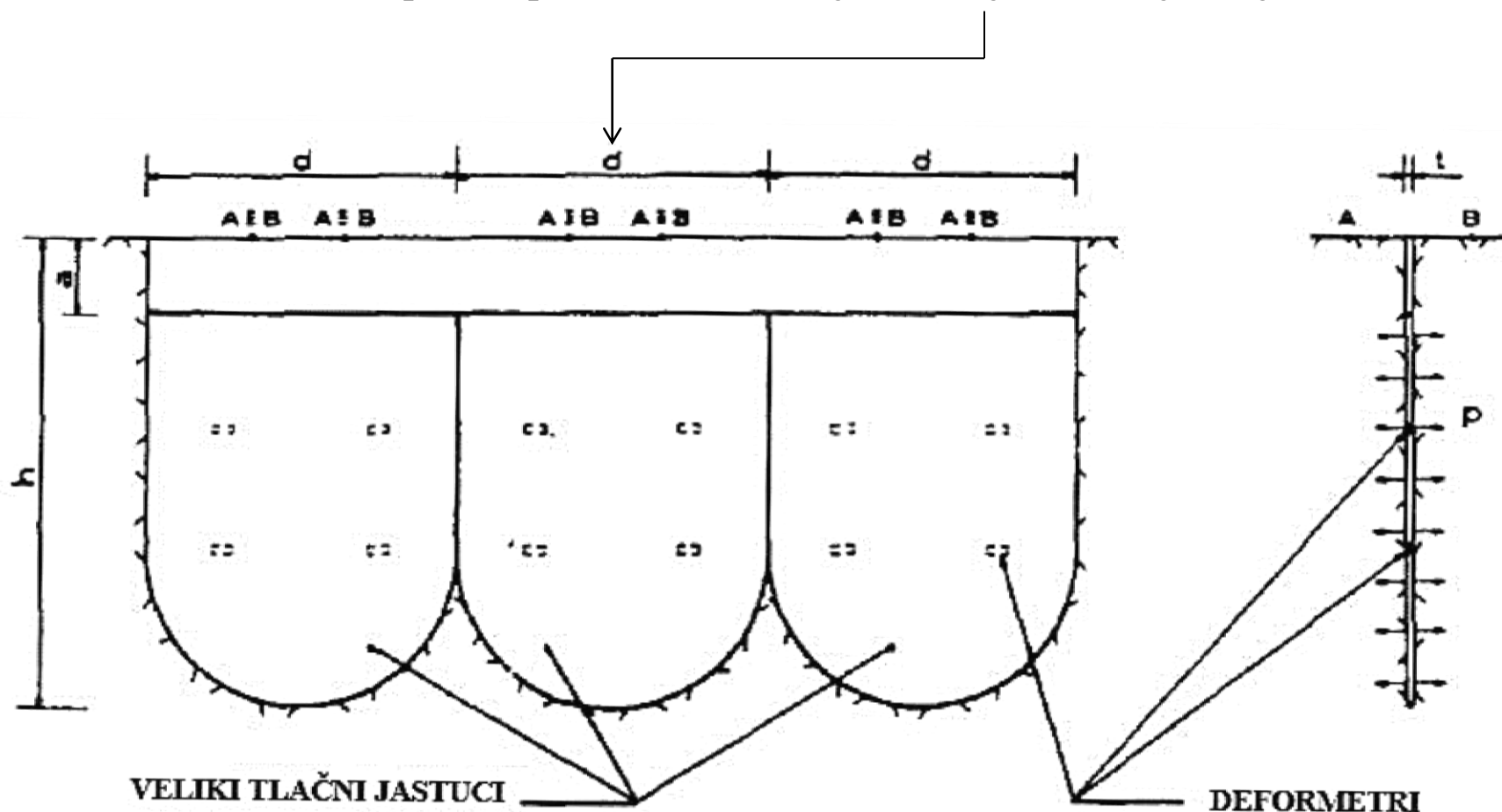
- Ispitivanje velikim tlačnim jastucima (LFJ – Large Flat Jack) zasniva se na **određivanju modula deformacije mjerenjem pomaka stijenske mase izazvanih povećanjem tlaka u velikim hidrauličkim jastucima umetnutima u prethodno izrađen prorez u stijenskoj masi.**
- Tlačni jastuci sastoje se od dvije čelične ploče, debljine manje od 1 mm, zavarene po rubu, između kojih se nalazi ulje. Oblik tlačnog jastuka je kvadrat stranice duljine 1 m na koji se nastavlja polukrug promjera 1 m. Jastuk ima jedan otvor kojim se dovodi ulje, povećava tlak i mijenja širina jastuka te drugi otvor za ispuštanje zraka i električne vodove kojima se izmjereni pomaci stijenske mase prenose do uređaja za očitavanje. Pomaci stijenske mase mjere se okomito na plohu pružanja jastuka sa četiri kratka deformetra smještena unutar tlačnog jastuka ili u zasebne bušotine.



Slika [1] -

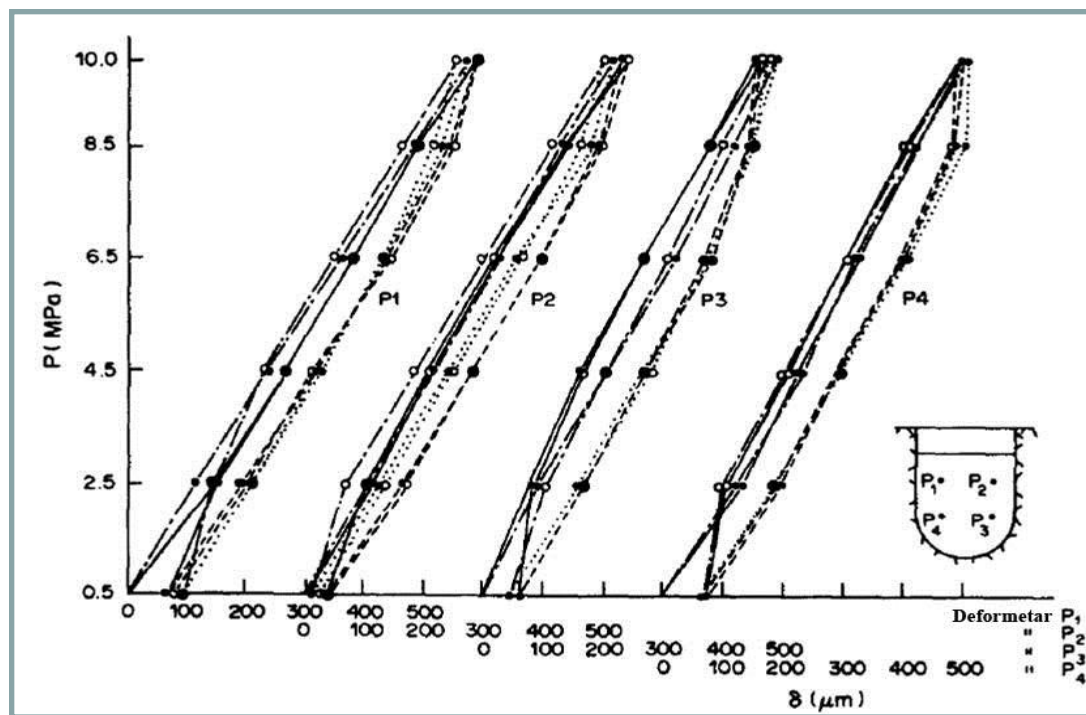
Veliki
tlačni
jastuk

- Prije provedbe pokusa potrebno je izvesti prorez u stijenskoj masi, proizvoljne dubine, širine 6 mm, korištenjem velike dijamantske pile. Zbog zahvaćanja većeg volumena može se u prorez postaviti veći broj tlačnih jastuka u jednoj ravnini.



- Pokus se primjenjuje kod svih značajnijih geotehničkih konstrukcija koje se izvode u stijenskoj masi. Zahvaća veći volumen stijenske mase od pokusa opterećenja pločom, ali manji volumen od pokusa radijalnog opterećenja u tunelima. Postavljanjem tlačnih jastuka u različitim smjerovima lako se ispita stupanj anizotropije stijenske mase obzirom na krutost.
- Pokus se provodi kroz najmanje tri ciklusa opterećenja i rasterećenja sve dok razlika u ukupnim deformacijama kod maksimalnog i minimalnog opterećenja u dva zadnja ciklusa ne prijeđe 5% ukupne deformacije. Pritisak u tlačnim jastucima ne smije kod rasterećenja pasti ispod 0,2 MPa radi osiguranja stalnog kontakta tlačnog jastuka i stijenske mase. Maksimalni pritisak treba biti 1,2-1,5 puta veće od maksimalnog naprezanja koje se očekuje u eksploataciji.
- Oblik i dimenzije velikog tlačnog jastuka, tehnologiju ispitivanja te obradu rezultata mjerenja, koje preporuča ISRM (1986.), razvili su stručnjaci LNEC-a (National Laboratory for Civil Engineering in Lisbon) i prvi put ga primijenili kod ispitivanja velikih brana u Portugalu i njegovim afričkim kolonijama (Rocha, Lopes i Silva, 1966; Rocha, 1968; Rocha i Silva, 1970).

REZULTATI POKUSA VELIKIM
TLAČNIM JASTUCIMA (MJERENJE
POMAKA U 4 DEFORMETRA KROZ
3 CIKLUSA OPTEREĆANJA I
RASTEREĆENJA)



- Uz pretpostavku linearno elastičnog ponašanja stijenske mase modul deformacije može se odrediti iz izraza:

$$E_{mi} = k_i \cdot (1 - \nu^2) \cdot \frac{p}{d_i}$$

gdje je:

E_{mi} – modul deformabilnosti stijenske mase na mjernom mjestu i

p – inkrement apliciranog naprezanja, $p = p_M - p_m$

p_M – maksimalni testni pritisak

p_m – minimalni testni pritisak

d_i – promjena širine proreza na mjernom mjestu i od naprezanja p

ν – Poissonov koeficijent

k_i – koeficijent koji ovisi o krutosti, obliku, rasporedu i broju tlačnih jastuka, poziciji mjerne točke i , obliku testne komore u kojoj se provodi pokus i dubini vlačne pukotine nastale u stijenskoj masi tijekom pokusa

➤ Za određivanje koeficijenta k_i kod različitih kombinacija broja i rasporeda tlačnih jastuka ISRM (1986.) predlaže korištenje *tablice 1*. Navedene vrijednosti vrijede ako se koristi tlačna ćelija dimenzija kao na slici [1] te za 3,5 m široku i 2,5 m dugu testnu komoru odnosno podzemnu prostoriju u kojoj se provodi pokus. Za drugačije oblike testne komore potrebno je napraviti numeričku analizu za određivanje koeficijenta k_i (Pinto, 1980.)

➤ Korištenje *tablice 1*. za određivanje koeficijenta k_i podrazumijeva i poznavanje dubine vlačne pukotine koja nastaje širenjem proreza uslijed širenja tlačnog jastuka.

Case	Depth h (m) of the crack								α
		0.0	0.2	0.5	1.0	1.5	1.7	2.0	
	AB	131.4	163.0	183.9	196.7			205.8	222.4
	CD	136.8	166.0	184.4	196.7			205.0	221.5
	AF	150.3	193.0	214.2	232.1	240.7		246.9	280.8
	BE	191.0	239.0	257.0	273.0	281.1		286.6	320.3
	CI	160.7	198.2	217.1	232.6	240.5		246.2	279.8
	DG	215.3	245.4	260.6	274.1	281.3		286.6	319.7
	A	137.4	167.8	185.7	196.7			205.8	222.4
	B	151.5	175.2	187.3	196.7			205.8	222.4
	C	144.7	171.3	186.6	196.7			205.0	221.5
	D	164.8	179.4	188.8	196.7			205.0	221.5
	AL	155.7	199.3	224.9	242.4	257.3		267.3	313.2
	BJ	202.8	255.5	277.8	294.2	307.6		316.8	361.9
	CN	167.7	206.2	228.4	243.5	257.5		266.9	312.2
	DM	231.7	264.9	282.6	296.0	308.2		316.8	361.3
	EF	216.9	273.9	296.0	312.2	325.0		333.8	378.6
	GI	249.7	284.4	301.2	314.2	325.6		333.9	378.0
	IM	141.1	178.7	198.2	213.4			224.0	254.9
	BJ	159.7	192.8	209.7	223.8			233.9	264.1
	CN	149.5	183.3	200.3	213.7			223.5	253.8
	DM	176.0	198.7	212.2	224.2			234.3	263.1
	EF	159.8	182.9	190.4	196.7			205.8	222.4
	GI	176.1	187.8	192.3	196.7			205.0	221.5
	A	137.9	171.3	187.2	199.0			205.8	222.4
	B	152.2	177.9	190.1	199.1			205.8	222.4
	C	145.1	175.3	188.6	199.3			205.0	221.5
	D	165.7	182.5	191.7	199.5			205.0	221.5
	A	152.2	197.1	213.5	232.1	240.7		246.9	280.8
	B	195.3	234.5	256.8	273.0	281.1		286.6	320.3
	C	163.3	203.4	217.0	232.6	240.5		246.2	279.8
	D	221.4	251.4	261.1	274.1	281.2		286.6	319.7
	E	200.7	247.0	258.7	273.0	281.1		286.6	320.3
	F	175.7	210.6	220.0	232.1	240.7		246.9	280.8
	G	228.6	255.3	263.2	274.1	281.2		286.6	319.7
	I	197.2	218.1	224.1	232.6	240.5		246.2	279.8
	AP	157.5	199.4	225.5	250.0		268.9		288.1
	BO	206.2	258.6	284.3	306.4		323.6		341.5
	CR	170.5	209.1	231.1	252.6		269.3		287.2
	DQ	237.5	271.6	291.1	309.6		324.4		340.9
	EL	223.4	282.4	309.3	331.0		347.4		364.4
	FJ	228.8	291.6	319.4	341.1		357.2		373.8
	GN	259.9	296.8	316.6	334.1		348.2		363.8
	IM	267.9	306.8	326.9	344.3		358.0		373.3
	AP	157.5	199.4	225.5	250.0		268.9		288.1
	BO	206.2	258.6	284.3	306.4		323.6		341.5

Tablica 1. Koeficijent k_i za različit broj i raspored tlačnih jastuka (ISRM, 1986.)

- Dubina vlačne pukotine (h) ovisi o međusobnom odnosu maksimalnog testnog pritiska, početnog stanja naprezanja i vlačne čvrstoće stijenske mase:

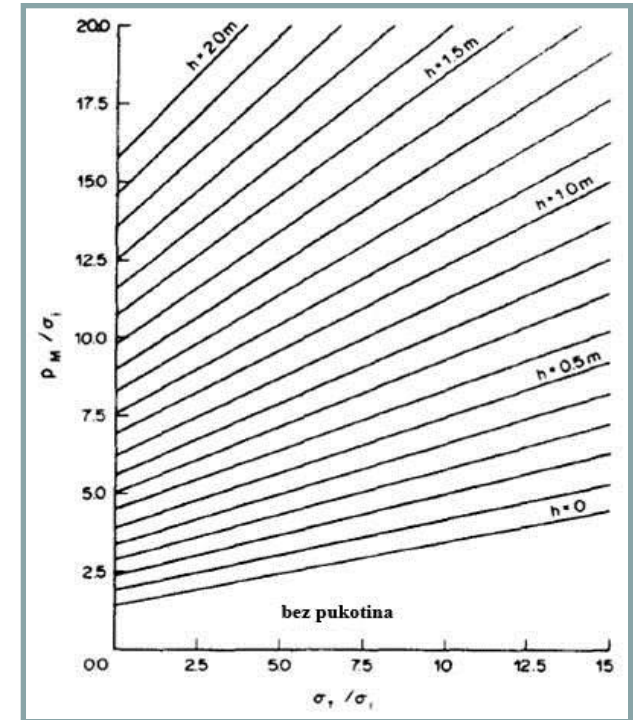
gdje je: $p_m = f_1 \cdot \sigma_i + f_2 \cdot \sigma_t$

p_m – maksimalni testni pritisak

σ_i – početno stanje naprezanja u stijenskoj masi

σ_t – vlačna čvrstoća stijenske mase

f_1 i f_2 – koeficijenti koji ovise o obliku testne komore, broju tlačnih jastuka i dubini pukotine h



- Koeficijente f_1 i f_2 moguće je jedino odrediti numeričkim modeliranjem (Pinto, 1980). Za praktično određivanje dubine vlačne pukotine, za slučaj da su poznati početno stanje naprezanja i vlačna čvrstoća stijenske mase, ISRM (1986.) daje dijagrame u slučaju korištenja jednog, dva ili tri paralelna tlačna jastuka.

- Najvjerojatnija vrijednost **modula deformacija** stijenske mase u slučaju da su deformacije mjerene u i mjernih mjesta iznosi:

$$E_m = (1 - \nu^2) p \frac{\sum k_i}{\sum k_i d_i}$$

- U slučaju da početno stanje naprezanja i vlačna čvrstoća stijenske mase nisu poznati predlaže se primjena metode najmanjih kvadrata gdje će se, za odabrani broj i raspored tlačnih jastuka te za sve vrijednosti dubine vlačne pukotine (h) iz tablice 1. izračunati moduli deformacije stijenske mase prema prethodnom izrazu.
- Tako dobivene vrijednosti modula deformacije stijenske mase omogućavaju proračun sume kvadrata za različite dubine pukotina:

$$\Delta = \sum_i \left(d_i - \frac{1 - \nu^2}{E_m} p k \right)^2$$

- Najvjerojatnija dubina pukotina je ona za koju suma kvadrata Δ ima najmanju vrijednost. Najvjerojatniji modul deformacije je onaj dobiven za tu dubinu pukotine prema prethodnom izrazu za modul deformacije.
- Ovakav način određivanja modula deformacije zahtijeva najmanje 6 mjernih točaka, odnosno najmanje 2 paralelna velika tlačna jastuka.
- Da bi se pokušalo izbjeći dvojbe oko dubine vlačne pukotine Rocha i Silva (1980.) predlažu da se prorezi za postavljanje tlačnih jastuka prošire za po još jednu širinu tlačnog jastuka i prodube do željene dubine. U tom slučaju dubina produbljenja proreza može se smatrati dubinom vlačne pukotine pomoću koje se onda iz *tablice 1.* odredi koeficijent k_i .
- Pokus koji se primjenjuje u potpunosti je u skladu s preporukama ISRM (1986.) i daje vrlo pouzdane rezultate no njegova složena primjena, cijena i trajanje ispitivanja smanjili su njegovu primjenu u posljednje vrijeme (Hoek i Diederich, 2006.)

FLEKSIBILNI DILATOMETAR

(Flexible Dilatometer)

- Ispitivanje krutosti stijenske mase fleksibilnim dilatometrom (Flexible Dilatometer) zasniva se na **mjenju promjene radijusa bušotine izazvanog radijalnim širenjem dilatometarske sonde postavljene na određenoj dubini.**
- Radijalno opterećivanje stijenki bušotine vrši se širenjem fleksibilne membrane dilatometra izazvane povećanjem tlaka u dilatometarskoj sondi, hidraulički, pomoću komprimiranog zraka, ulja ili vode. Fleksibilna membrana prenosi ravnomjerno raspodjeljeno opterećenje na stijenke bušotine. Za mjerenje promjena radijusa bušotine koriste se dva tipa dilatometarskih sondi (ISRM, 1987.)
 - A) Kod prvog tipa sondi registrira se promjena volumena bušotine iz koje se izračunava promjena radijusa.
 - B) Kod drugog tipa sondi pomoću ugrađenih mjerača izravno se mjeri promjena radijusa bušotine.

- Veliki značaj za primjenu i razvoj dilatometarskih ispitivanja bila je činjenica da se tim ispitivanjima relativno brzo može provesti više ispitivanja unutar jedne bušotine i time dobiti **raspodjelu deformacijskih karakteristika stijenske mase po dubini**. To je značajna prednost dilatometarskih ispitivanja u odnosu na ostala ispitivanja kod kojih se deformacijska svojstva mogu ispitati isključivo u okolišu opterećene površine.

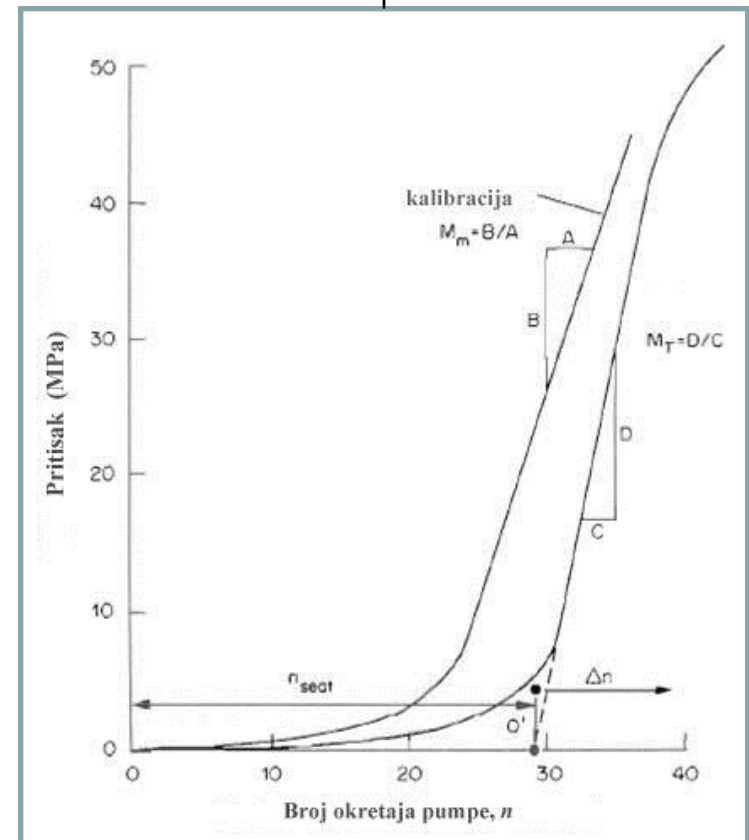


FLEKSIBILNI DILATOMETAR

- Obzirom da se ispitivanja provode u bušotinama promjera 76 do 101 mm, **zahvaćen je vrlo mali volumen stijenske mase**, obično manje od $1/3 \text{ m}^3$. Takav volumen nikako ne može reprezentirati stijensku masu što bitno umanjuje značaj i iskoristivost ovog pokusa.
- Povezivanje modula deformacije dobivenih dilatometarskim pokusima sa rezultatima opterećenja pločom ili velikim hidrauličkim jastucima te povratne numeričke analize iz rezultata mjerenja za vrijeme izvedbe omogućavaju primjenu dilatometra na stijensku masu velikog promjera (Panek, 1970.). Dodatni problem predstavlja činjenica da se u vertikalnim bušotinama ustvari ispituje horizontalna krutost, dok je za npr. temeljenje znatno važnija vertikalna krutost. Promjer bušotine treba biti 0,5 do 30 mm veći od promjera dilatometarske sonde prije početka pokusa. Veća bušotina značajno bi smanjila maksimalni pritisak koji se može postići prilikom ispitivanja.

- Prije početka testiranja preporuča se specijalnom kamerom provjeriti stijenke bušotine u namjeri da se izbjegne oštećenje membrane zbog razlomljenosti stijene i eventualnog prisustva manjih kaverni. Ukoliko stijenke bušotine nisu stabilne ili mogu oštetiti membranu preporuča se zacijevljenje ili cementiranje testnog dijela bušotine.
- Pokus se provodi kroz najmanje tri ciklusa opterećenja i rasterećenja. Maksimalni pritisak treba biti što je moguće veći tako da u deformacijski proces uključi što je moguće veći volumen stijenske mase, ali ne smije prelaziti pritisak koji dopušta oprema kojom se ispituje. U svakom novom ciklusu opterećenja treba povećavati maksimalni pritisak tako da se u slučaju oštećenja membrane mogu koristiti rezultati ispitivanja na manjim pritiscima.

DIJAGRAM 1.
Rezultat mjerenja
promjene volumena
dilatometarske sonde



- U nastavku je dan postupak određivanja **modula deformacije** pri ispitivanju fleksibilnim dilatometrom.
- Uz pretpostavku linearno elastičnog ponašanja dilatometarske sonde, modul smicanja kalibracijskog cilindra (G_c), koji ima modul elastičnosti (E_c), i Poissonov koeficijent (ν_c) može se izraziti kao:

$$G_c = \frac{E_c}{2(1 + \nu_c)}$$

- Krutost kalibracijskog cilindra (M_c) može se izračunati iz izraza:

$$M_c = \frac{\alpha G_c}{\pi L a^2 \left[\frac{1 + B_c (1 - 2\nu_c)}{1 - B_c} \right]}$$

gdje je:

α – konstanta pumpe (volumen istisnute tekućine za jedan okret kotača pumpe)

L – duljina membrane,

a – unutarnji radijus i b – vanjski radijus kalibracijskog cilindra i $B_c = (a/b)^2$.

- Krutost hidrauličkog sustava (M_s) se može odrediti iz rezultata kalibracije (*slika 3.*):

$$M_s = \frac{M_c M_m}{M_c - M_m}$$

- Krutost stijenske mase (M_R) može odrediti iz rezultata ispitivanja (*slika 3.*):

$$M_R = \frac{M_s M_T}{M_s - M_T}$$

- Dilatometarski modul smicanja stijenske mase (G_D) izračunava se iz izraza:

$$G_D = M_R \frac{\pi L a^2}{\alpha}$$

- **Dilatometarski modul elastičnosti** stijenske mase (E_D) izračunava se iz izraza:

$$E_D = 2(1 + \nu_R) G_d$$

gdje je ν_R Poissonov koeficijent stijenske mase.

- Ukoliko se zbog diskontinuiranosti stijenske mase kao rezultat ispitivanja dobije nelinearna krivulja pritiska i volumena, uz pretpostavku nulte vlačne čvrstoće stijenske mase, dilatometarski modul smicanja se određuje kao (Ladany, 1976.):

$$G_D = p_{i,corr} \frac{\pi L a^2}{\alpha \Delta n_{corr}} \left[(1 - \nu_R) \ln \left(\frac{p_{i,corr}}{2 p_0} \right) + 1 \right]$$

gdje je:

$p_{i,corr}$ – korekcija tlaka očitano na pumpi (p_i): $p_{i,corr} = p_i - nm$

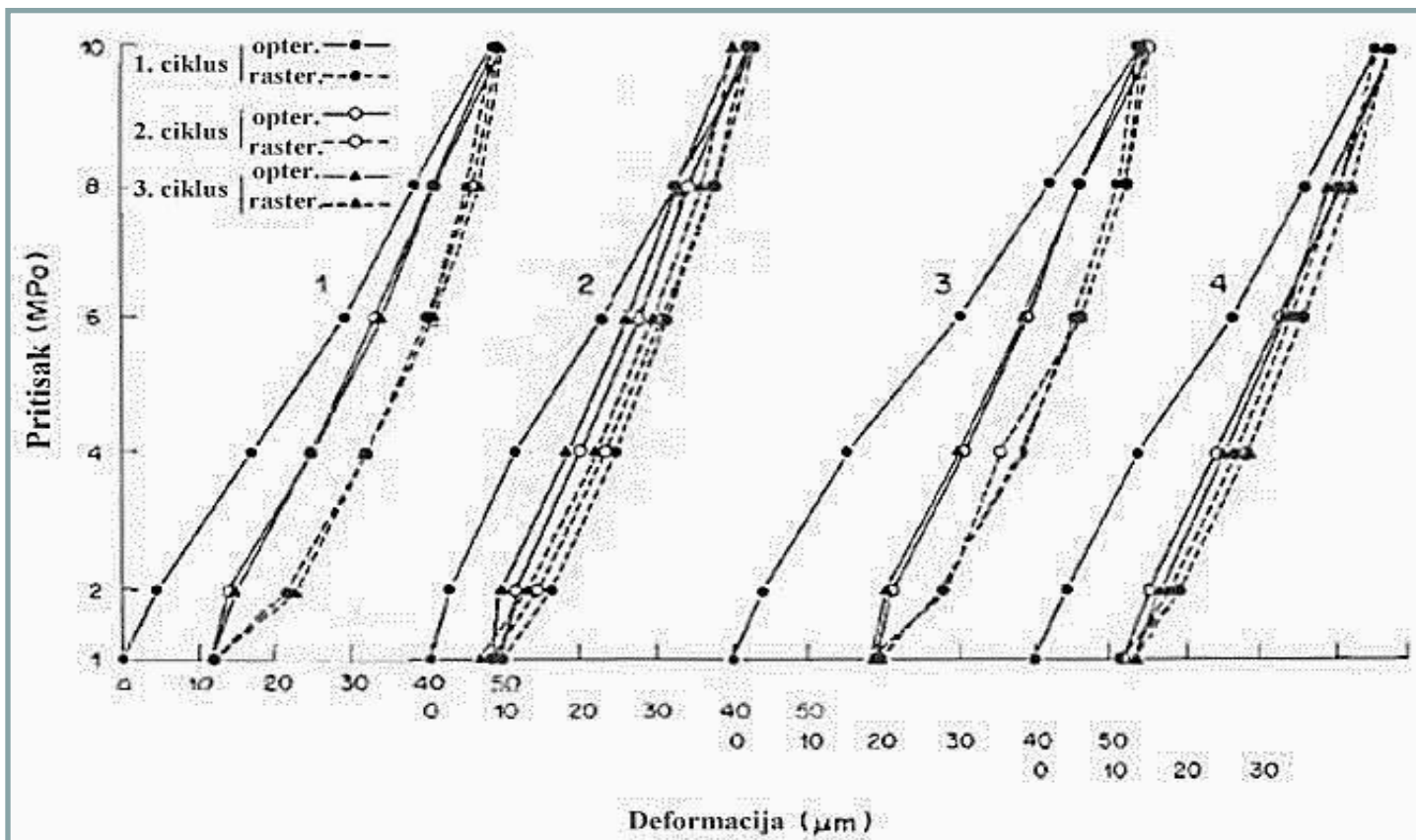
n – ukupan broj okretaja pumpe da se dostigne p_i ,

m – faktor korekcije za krutost membrane.

Δn_{corr} – korekcija broja okretaja pumpe: $\Delta n_{corr} = n - n_{seat} - p_i/M_s$

n_{seat} – rezultat mjerenja sa slike (4.3) i

p_0 – prosječno naprezanje u okolici bušotine.



DIJAGRAM 2.
Rezultat mjerenja
promjene radijusa
dilatometarske sonde
(mjerenja promjene
radijusa bušotine na 4
mjerna mjesta unutar
dilatometarske sonde)

- Uz pretpostavku linearno elastičnog ponašanja stijenske mase i razmakom pukotina većim od duljine sonde odgovarajući **dilatometarski modul elastičnosti** se može izraziti kao:

$$E_d = (1 + \nu_R) \cdot D \cdot \frac{\Delta p_i}{\Delta D}$$

gdje je:

Δp_i – inkrement tlaka

D – početni promjer bušotine

ΔD – srednja promjena promjera bušotine

- Ako se pokus provodi u raspucaloj stijenskoj masi i ako je $p_i \geq 2p_0$ sve radijalne pukotine će se otvoriti pa se **dilatometarski modul elastičnosti** izračunava prema izrazu:

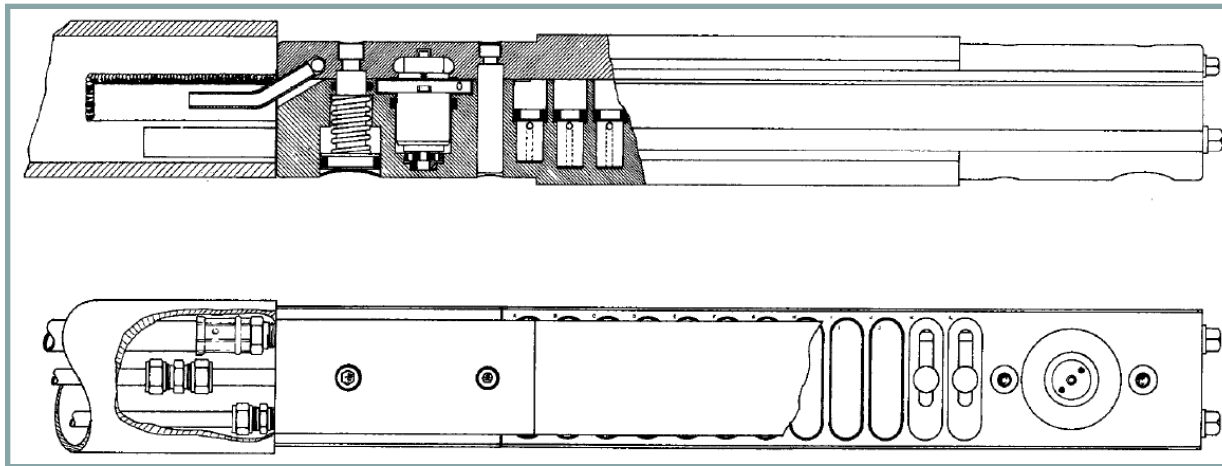
$$E_d = (1 + \nu_R) \cdot D \cdot \frac{\Delta p_i}{\Delta D} \cdot \left[(1 - \nu_R) \cdot \ln \left(\frac{p_i}{2p_0} \right) + 1 \right]$$

ΔD – srednja promjena promjera bušotine kada se tlak povećava od 0 do p_i .

KRUTI DILATOMETAR (Stiff Dilatometer)

- Ispitivanje krutosti stijenske mase krutim dilatometrom (Stiff Dilatometer) zasniva se na **mjerenju promjene radijusa bušotine izazvanog širenjem krute dilatometarske sonde postavljene na određenoj dubini.**
- Opterećenje na stijensku masu prenosi se preko dvije krute zakrivljene ploče dilatometra čije je međusobno razmicanje izazvano hidrauličkim povećanjem tlaka u dilatometarskoj sondi pomoću komprimiranog zraka, ulja ili vode. Krute ploče prenose ravnomjerno raspodijeljene pomake duž cjelog ispitivanog područja.

- Kruti dilatometar poznatiji je pod nazivom **NX Borehole Jack**, odnosno *Goodman Jack*. Različiti modeli dilatometra mogu se koristiti kako za krute tako i za meke stijene.



NX BOREHOLE JACK

- Kao i u slučaju fleksibilnog dilatometra, relativno brzo se može provesti više ispitivanja unutar jedne bušotine i time dobiti raspodjela deformacijskih karakteristika stijenske mase po dubini što je značajna prednost u odnosu na druga ispitivanja kod kojih se deformacijska svojstva mogu ispitati isključivo u okolišu opterećene površine.



- Ispitivanja se provode u bušotinama promjera 76,2 mm čime je zahvaćen mali volumen stijenske mase koji ne može reprezentirati volumen stijenske mase zahvaćen izvedbom geotehničkih konstrukcija, što umanjuje značaj i iskoristivost ovog pokusa.
- Prednost ovog tipa dilatometra je mogućnost ispitivanja u svim, pa i u horizontalnom smjeru, čime se dobija vertikalna krutost značajna za temeljenje objekata na stijeni, što se ne može dobiti korištenjem fleksibilnog dilatometra.
- Zakretanjem krutih dilatometarskih ploča moguće je ustanoviti stupanj anizotropije stijenske mase po dubini u odnosu na krutost.

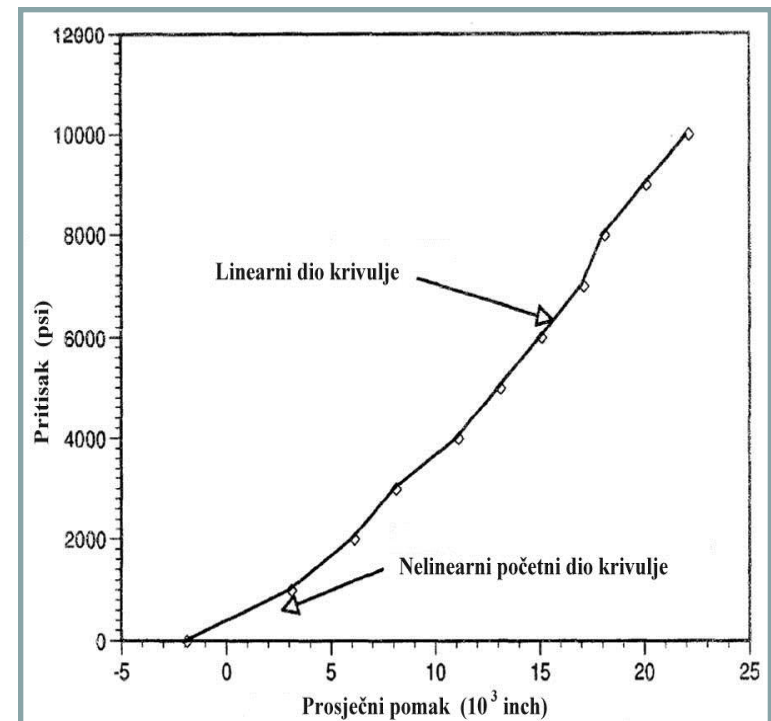


- U slučaju da se želi provesti više ispitivanja unutar jedne bušotine, u cilju dobivanja raspodjele deformacijskih karakteristika stijenske mase po dubini, prvo ispitivanje treba provesti na najdubljoj željenoj poziciji.
- Kruti dilatometar može prenijeti velika naprezanja na stijenke bušotine što može izazvati slom stijenske mase i onemogućiti daljnja ispitivanja dublje od mjesta gdje se provodilo ispitivanje.
- Visinski razmak između dva ispitivanja mora biti veći od 30,5 cm.

- Pokus se započinje nametanjem minimalnog pritiska od 0,35 MPa u cilju postizanja kontinuiteta pomaka između stijenki bušotine i krutih dilatometarskih ploča. Mjerenja pomaka se provode sa dva mjerača čija razlika očitavanja ne smije biti veća od 0,5 mm.
- Maksimalni željeni pritisak treba biti dostignut kroz najmanje 10 jednakih inkremenata. Nakon toga stijenske se rasterećuju inkrementalnim spuštanjem pritiska na početnu minimalnu vrijednost.
- Ukoliko se želi, moguće je ponoviti cikluse opterećenja i rasterećenja u cilju analize utjecaja cikličnog opterećenja na deformacijska svojstva stijenske mase.

- Ako se pojavi histereza između krivulje opterećenja i rasterećenja nužno je analizirati da li se radi o oštećenju zidova bušotine prilikom opterećivanja ili o neelastičnom ponašanju stijenske mase.
- Ako je promjer bušotine značajno veći od 76,2 mm pojavljuje se nelinearni početni dio krivulje opterećenja zbog namještanja krutih ploča u bušotini.
- Ukoliko je promjer bušotine unutar 0,5 mm od traženih 76,2 mm, nelinearni početni dio krivulje opterećenja je najvjerojatnije pokazatelj nelinearnog ponašanja stijenske mase (You, 1993.)

REZULTAT MJERENJA KORIŠTENJEM KRUTOG DILATOMETRA



- **Modul deformacije stijenske mase (E_{calc})** računa se prema izrazu (Heuze i Amadei, 1985.):

$$E_{calc} = 0.86 \cdot 0.93 \cdot D \cdot (\Delta Q_h / \Delta D) \cdot T$$

gdje je:

0,86 – koeficijent kojim se uzima u obzir 3D djelovanje

0,93 – hidraulička efikasnost dilatometra

D – promjer bušotine

ΔD – promjena promjera bušotine

ΔQ_h – inkrement nametnutnog pritiska

T – koeficijent ovisan o Poissonovom koeficijentu

$\Delta Q_h / \Delta D$ – nagib linearnog dijela krivulje opterećenja

- Osim pretpostavke linearno elastičnog ponašanja stijenske mase, u proračunu modula deformacije pretpostavlja se da je ostvaren potpun kontakt između krutih dilatometarskih ploča i stijenki bušotine.
- Shuri (1981.) je proveo ispitivanja utjecaja nepotpunog kontakta. Heuze i Amadei (1985.) proširili su njegov pristup i predložili kriterije po kojima će se prihvaćati rezultati testiranja zasnovani na promjeru bušotine i rezultirajućem modulu deformacije. Axelrod et al. (1988.) su pokazali da takav pristup može dovesti do prihvaćanja pogrešnih i odbacivanja ispravnih rezultata ispitivanja.
- Iz tih razloga je nužna iskustvena ocjena svakog pojedinog rezultata ispitivanja.

- Iako su dilatometarske ploče relativno krute ne može se izbjeći njihovo savijanje za vrijeme ispitivanja, posebice kod ispitivanja krutih stijena. Zbog toga se moduli deformacije dobiveni pomoću izraza za modul deformacije stijenske mase moraju korigirati.

- Korekcija modula deformacije, dobivena numeričkom simulacijom i verificirana terenskim ispitivanjima, prikazana je na slici desno. Gornja granica modula deformacije za koju se korekcija može primjenjivati je 100 GPa. Za module manje od 6,9 GPa nije potrebna korekcija zbog savijanja dilatometarskih ploča.

↓

**KOREKCIJA MODULA
DEFORMACIJE ZBOG SAVIJANJA
DILATOMETARSKIH PLOČA ZA
VRIJEME ISPITIVANJA**

