

Određivanje deformabilnosti stijenske mase in situ pokusima

Grubešić, Mario

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:138820>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-22**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



Određivanje deformabilnosti stijenske mase in situ pokusima

Grubešić, Mario

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:138820>

Rights / Prava: [In copyright](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2020-11-10**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET**

Mario Grubešić

***ODREĐIVANJE DEFORMABILNOSTI STIJENSKE MASE
IN SITU POKUSIMA***

DIPLOMSKI RAD



VARAŽDIN, 2016.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET**

DIPLOMSKI RAD

***ODREĐIVANJE DEFORMABILNOSTI STIJENSKE MASE
IN SITU POKUSIMA***

**KANDIDAT:
MARIO GRUBEŠIĆ**

**MENTOR:
Doc.dr.sc. BORIS KAVUR**

VARAŽDIN, 2016.

Autor

Ime i prezime: <i>Mario Grubešić</i>
Datum i mjesto rođenja: <i>03. 12. 1991. Travnik BiH</i>

I. Diplomski rad

Naslov: ODREĐIVANJE DEFORMABILNOSTI STIJENSKE MASE IN SITU POKUSIMA
Broj stranica: 58
Broj slika: 28
Broj tablica: 6
Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen: <i>Geotehnički fakultet</i>
Znanstveno područje: <i>Tehničke znanosti</i>
Znanstveno polje: Geotehnika
Znanstvena grana: Geotehnička opažanja
Mentor: <i>Doc. dr. sc. Boris Kavur</i>
Oznaka i redni broj rada:

II: Diplomski rad

Datum i prijava teme:
Datum kada je diplomski rad prihvaćen:
Sastav povjerenstva koje je ocijenilo diplomski rad: <i>Doc. dr. sc. Boris Kavur</i> <i>Doc. dr.sc. Mario Gazdek</i> <i>Izv. prof. dr. sc. Stjepan Strelec</i>
Datum obrane diplomskog rada:
Sastav povjerenstva pred kojim je branjen diplomski rad: <i>Doc. dr. sc. Boris Kavur</i> <i>Doc. dr.sc. Mario Gazdek</i> <i>Izv. prof. dr. sc. Stjepan Strelec</i>

Sažetak

U uvodu su kratko opisane mogućnosti određivanja deformabilnosti stijenske mase direktnim i indirektnim postupcima, te je definiran cilj rada. U drugom poglavlju se detaljno opisuju principi ispitivanja i načini interpretacije rezultata pokusa opterećenja pločom (PJT) i pokusa velikim tlačnim jastukom (LFJ). Tu je također opisana i opća problematika određivanja deformabilnosti stijenske mase. U trećem poglavlju opisana su PJT i LFJ ispitivanja koja su obavljena na projektu Karun 3 u Iranu, kao i značajke ispitivanog stijenskog masiva. U četvrtom poglavlju objašnjena je metodologija usporedbe PJT i LFJ rezultata na spomenutom projektu. Obavljena je reinterpetacija PJT rezultata korištenjem metode najmanjih kvadrata i rješenja za fleksibilni tip ploče. Reinterpretirani PJT moduli su uspoređeni s LFJ modulima. Na temelju raspoloživih PJT i LFJ modula kao i RMR ocjena kvalitete ispitivanih stijena napravljena je korelacija za indirektnu procjenu deformabilnosti vapnenačke stijenske mase.

Ključne riječi:

deformabilnost stijenske mase, pokus opterećenja pločom, pokus velikim tlačnim jastukom, modul deformabilnosti

Sadržaj

1. Uvod	1
2. In situ ispitivanja deformabilnosti stijenske mase	4
2.1. Općenito o problematici ispitivanja deformabilnosti stijenske mase	4
2.2. Pokus opterećenja pločom (PJT)	6
2.3. Pokus velikim tlačnim jastukom (LFJ).....	12
3. PJT i LFJ ispitivanja na projektu Karun 3 u Iranu	21
3.1. Značajke stijenskog masiva na projektu Karun 3	21
3.2. Opis obavljenih PJT ispitivanja.....	22
3.3. Opis obavljenih LFJ ispitivanja.....	30
4. Usporedba LFJ i reinteretiranih PJT rezultata.....	45
4.1. Usporedba PJT i LFJ rezultata	45
4.2. Reinterpretacija PJT pokusa	46
4.3. Indirektna procjena deformabilnosti stijenske mase.....	52
5. Zaključak.....	53
6. Literatura	55
7. Popis slika.....	57
8. Popis tablica.....	59

1. Uvod

Za potrebe analiza mehaničkog ponašanja stijenske mase kod projektiranja objekata temeljenih na stijenskoj masi ili objekata koji se grade u njoj neophodno je poznavati njene mehaničke značajke. Deformabilnost je jedna od najvažnijih značajki koja upravlja mehaničkim ponašanjem stijenske mase (Bieniawski 1978). Deformabilnost iskazujemo modulom koji predstavlja odnos između apliciranog opterećenja i rezultirajuće deformacije koja uključuje njenu elastičnu i plastičnu komponentu. Deformabilnost ovisi o stupnju raspucalosti stijene, stišljivosti pukotina i intaktnog stijenskog materijala, te smjeru i trajanju opterećenja.

Određivanje deformabilnosti stijenske mase još uvijek predstavlja vrlo značajan problem mehanike stijena (Kavur i sur. 2015). Zbog poznatog problema utjecaja mjerila odnosno zbog utjecaja veličine ispitnog uzorka deformabilnost stijenske mase ne može se odrediti na malim laboratorijskim uzorcima intaktnog stijenskog materijala. S povećanjem volumena stijene koji je uključen u ispitivanje raste broj prirodnih oslabljenja, pukotina i prslina, što utječe na rezultat ispitivanja. Unatoč tome, deformabilnost vrlo često određujemo na malim uzorcima u laboratoriju, a dobivene laboratorijske rezultate pokušavamo ekstrapolirati na stijensku masu koristeći se podacima terenskih opažanja (npr. RQD) do kojih možemo doći relativno jeftinim metodama (Kavur i sur. 2015). Često se koriste indirektne procjene deformabilnosti na temelju empirijskih metoda baziranih na kvantitativnim ocjenama kvalitete stijenske mase korištenjem nekog od postojećih klasifikacijskih sustava.

Do sada je razvijeno više metoda za terensko ispitivanje deformabilnosti stijenske mase koje se međusobno razlikuju prema načinu ispitivanja i volumenu stijenske mase obuhvaćene pokusom (Kavur 2000). S povećanjem volumena ispitivane stijene jako rastu troškovi ispitivanja tako da se od terenskih metoda najčešće koriste metode ispitivanja u bušotinama pomoću dilatometara fleksibilnog i krutog (Goodman jack) tipa koji su relativno pristupačni cijenom. Volumen stijene uključene u dilatometarski pokus ovisi o promjeru sonde odnosno bušotine u kojoj se ispitivanja provode, a volumen ispitivane stijene je nešto veći od laboratorijskih uzoraka. Dilatometarskim pokusom se zbog toga ne može odrediti modul deformabilnosti stijenske mase, što se nažalost u praksi vrlo često ignorira. Rezultat takvog ispitivanja naziva se stoga dilatometarskim modulom i smatra se indeksnim pokazateljem deformabilnosti (Vrkljan i sur. 2006).

Od velikih in situ ispitivanja, pokus opterećenja pločom (engl. plate loading test, PLT) se danas najčešće koristi (Hoek i Diederichs 2006). U pokusu se koristi jedna ili češće dvije ispitne ploče koje opterećuju nasuprotne strane podzemne prostorije širine oko 2 m i visine 2 do 2,5 m. Podzemna prostorija za provedbu pokusa se najčešće kopa tehnikom bušenja i miniranja. Pokus se može provoditi i na površini terena, kao i na dnu bušotine većeg promjera, pod uvjetom da se osigura protuteret za nanošenje opterećenja. Najveći nedostatak ovog pokusa je činjenica da se opterećenje nanosi na površinu stijene koja je manje ili više poremećena iskopom podzemne prostorije (Kavur i sur. 2006). U nastojanju da se eliminiira ovaj nedostatak pokus je unaprijeđen mogućnošću mjerenja rezultirajućih deformacija po dubini stijene odnosno u neporemećenim dijelovima stijenske mase pomoću višestrukih bušotinskih ekstenzometara. Ova verzija pokusa naziva se „plate jacking test“ (PJT). Nažalost, ovo rješenje je samo polovično uspješno jer za interpretaciju pokusa osim rezultirajuće deformacije trebamo poznavati i iznos naprezanja (opterećenja) u mjernoj točki kojoj je izmjeren pomak. Za interpretaciju PJT pokusa zato se koriste zatvorena rješenja izvedena na temelju teorije elastičnosti. Mjerenjem kontaktnog opterećenja na površini (ploča), naprezanje u dubini stijenske mase računamo uz pretpostavku da se stijenska masa pod opterećenjem ponaša kao elastični poluprostor. Nažalost, ova pretpostavka često nije opravdana te su interpretirane vrijednosti modula upitne (Kavur i sur. 2015). Na problematičnu interpretaciju PJT pokusa primjenom Bousinesq-ovog rješenja za fleksibilnu ploču koje preporuča ISRM (1979) upozorava i Boyle (1992) te navodi da su moduli za dublju stijensku masu koji su izračunati navedenim rješenjem često veći od modula intaktne stijene što naravno nije moguće.

Znatno kvalitetnije i po uključenom volumenu stijene veće in situ ispitivanje predstavlja pokus velikim tlačnim jastukom (engl. „large flat jack“, LFJ) koje je razvijeno upravo da bi se doskočilo nedostacima ispitivanja pločom. LFJ pokus se obavlja umetanjem tlačnog jastuka u prorez izrezan u stijenskoj masi pomoću dijamantne pile. LFJ pokus se tako obavlja u neporemećenoj stijenskoj masi i to je njegova glavna prednost u usporedbi s drugim in situ metodama (Wittke 1990). Aplicirano opterećenje (tlak ulja u jastuku) se mjeri i kontrolira tijekom pokusa, a otvaranje proreza pod djelovanjem opterećenja se mjeri osjetilima pomaka ugrađenim u jastuk. Provedba LFJ pokusa i interpretacija rezultata se obavljaju prema postupcima koje je predložio ISRM (1986). Ovakvo ispitivanje je nažalost znatno skuplje i zahtjevnije za provedbu od ispitivanja pločom te se zbog toga vrlo rijetko provodi (Vrkljan i Kavur 2006). LFJ pokusom se općenito dobivaju kvalitetni rezultati i logične vrijednosti modula (Kavur i sur. 2015).

Navedeni veliki in situ pokusi predstavljaju značajan financijski trošak i zahtijevaju dosta vremena za pripremu i provedbu te se zbog toga koriste uglavnom na skupim projektima kao što su gradnje visokih lučnih betonskih brana, gradnje velikih podzemnih strojarnica, dubokih tunela i slično. Rezultate takvih pokusa koristi se za razvoj baza podataka mehanike stijena kao i empirijskih metoda za jeftine procjene deformabilnosti jer bi takvi podaci trebali biti pouzdani. Međutim, rezultati ispitivanja dobiveni različitim in situ metodama se često dosta razlikuju pa je upitna pouzdanost takvih rezultata, a nažalost rijetki su projekti na kojima su različite metode smisljeno korištene tako da se omogući valjana usporedba njihovih rezultata (Bieniawski 1989).

U praktičnom dijelu (poglavlje 4) ovog rada koristit će se metodologija usporedbe PJT i LFJ ispitivanja iz ranije studije (Kavur i sur. 2015) i podaci PJT i LFJ ispitivanja koje je tijekom 90-ih godina obavila hrvatska firma Geotehnika iz Zagreba na velikom hidroenergetskom projektu Karun 3 u Iranu. Ovi in situ pokusi su planirani i obavljeni tako da je pružena jedinstvena mogućnost usporedbe njihovih rezultata (Kavur i sur. 2015).

Cilj ovog rada bio je pokazati mogućnost uspješne interpretacije PJT pokusa obavljenih krutim pločama primjenom rješenja za fleksibilni tip ploče i metode najmanjih kvadrata (Boyle 1992, Unal 1997) te redukcije na temelju kalibracije LFJ pokusom (Kavur i sur. 2015). U ranijoj studiji (Kavur i sur. 2015) interpretacija istih PJT pokusa je obavljena korištenjem rješenja za krutu ploču i odgovarajuće metode najmanjih kvadrata (Unal 1997). Usporedba s LFJ rezultatima pokazala je da su PJT moduli u dubini stijenske mase, iako višestruko veći, u korelaciji s LFJ modulima i da ih treba reducirati utvrđenim kalibracijskim faktorima (Kavur i sur. 2015). PJT rezultati dobiveni primjenom rješenja za fleksibilni tip ploče i metode najmanjih kvadrata su također uspoređeni s LFJ rezultatima. Na temelju ovdje dobivenih PJT i ranije utvrđenih LFJ rezultata napravljena je i korelacija između interpretiranih vrijednosti modula i kvalitete stijene kvantificirane RMR klasifikacijom da bi se pružila mogućnost indirektno procjene deformabilnosti karbonatne stijenske mase.

2. In situ ispitivanja deformabilnosti stijenske mase

2.1. Općenito o problematici ispitivanja deformabilnosti stijenske mase

Osnovni preduvjet uspješnog projektiranja je poznavanje i definiranje mehaničkih svojstava i stanja naprezanja stijenske mase. Mehanička svojstva stijenske mase koji kontroliraju njeno ponašanje su čvrstoća i deformabilnost. Sposobnost promijene oblika stijenske mase pod utjecajem opterećenja ili rasterećenja naziva se deformabilnost. Ona ovisi o porozitetu i stupnju ispucalosti stijene. Glavni elementi deformacija su pore i pukotine koje svojim zatvaranjem odnosno otvaranjem mijenjaju cjelokupan oblik. Prema ranijim istraživanjima (Franklin i sur. 1989.) primarni cilj većine projektnih istraživanja je predviđanje deformacija u vidu predviđanja slijeganja stijenke. Deformabilnost stijenske mase ispituje se u laboratoriju ili na terenu (in situ). Prema rezultatima dobiva se odnos naprezanja i deformacija stijene prikazanih u grafu pomoću krivulje naprezanje-deformacija te matematički u obliku konstitutivne jednadžbe. Logično je da se rezultati dobiveni ispitivanjem malog uzorka razlikuju od rezultata ispitivanja većeg uzorka. U manjem uzorku prisutan je i manji broj prslina i pukotina pa je tako i njihov utjecaj u konačnici manji. Prema istom principu razlikuje se krivulja naprezanje-deformacija koja isto tako može biti različita u odnosu rezultata in situ pokusa. Zabilježeno je smanjenje krutosti odnosno povećanje deformabilnosti s povećanjem dimenzija uzorka ispitivane stijene (Kavur,2000).

U mehanici se ova pojava naziva „scale effect“ odnosno utjecaj mjerila. Veličina uzorka ovisi o veličini površine na koju se primjenjuje opterećenje i magnitudi opterećenja te ovisi o vrsti pokusa. Što je ispitivanje veće to je veći volumen stijene uključen u ispitivanje. Najmanji uzorak stijene prisutan je u laboratorijskim ispitivanjima. Za pokuse deformabilnosti u bušotinama je nešto veći uzorak. Zatim još veći za pokuse opterećenja pločom i tlačnim jastukom. Najveći uzorak ostvaren je u pokusima radijalnom prešom i i pokusnim probnim komorama (Kavur 2000).

Prema ranijim studijima (Kavur 2000) izbor mjerila pokusa ovisi o prirodi i utjecaju pukotinskih sistema u stijenskoj masi. Ono postaje manje važno u slučaju ako su pukotine zatvorene i raspoređene u većem razmaku ili ukoliko je stijena mekana i deformabilnija.

S obzirom da je ponašanje mnogih stijena neelastično, za karakteriziranje deformabilnosti nije dovoljno obuhvatiti samo parametre elastičnosti. (Goodman 1989). Na malim laboratorijskim uzorcima čvrste stijene pokazuju elastično ponašanje pod utjecajem opterećenja i rasterećenja. U prirodnim uvjetima gdje stijenska masa obuhvaća prsline, pukotine, slojne plohe, trošne zone, otvorene pukotine s glinenom ispunom, stijene ne pokazuju jednako elastično ponašanje.

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. 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.

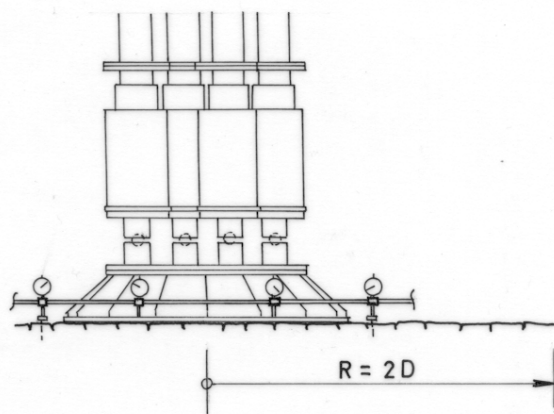
Za određivanje deformabilnosti stijenske mase postoji više terenskih (in-situ) pokusa. Neki od njih kao što su pokus opterećenja pločom (PLT-Plate Load Test ili PJT-Plate Jacking Test), pokusi malog (SFJ-Small Flat Jack) i velikog (LFJ-Large Flat Jack) tlačnog jastuka, te dilatometarski pokus postali su gotovo standardni u primjeni. In situ ispitivanja deformabilnosti imaju cijeli niz poznatih prednosti. Glavni nedostaci ovih pokusa su veliki troškovi, dugotrajnost ispitivanja i problemi interpretacije mjerenih podataka (Bieniawski 1978). Bitno je naglasiti da se tijekom interpretacije rezultata in-situ mjerenja često javljaju problemi.

Metode in-situ ispitivanja zahvaćaju različite volumene stijenske mase koji su u većini slučajeva značajno veći od laboratorijskih uzoraka i kao takvi mogu reprezentirati ponašanje stijenske mase. 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.

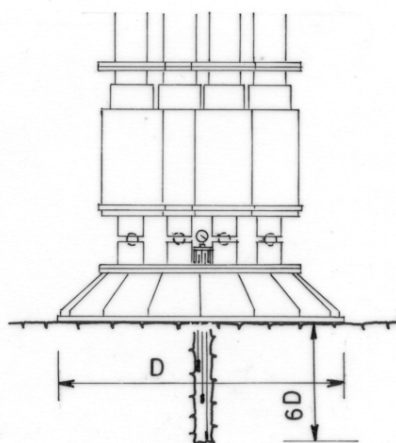
2.2. Pokus opterećenja pločom (PJT)

Pokus podrazumijeva primjenu opterećenja na površinu stijene pomoću kružne ploče koju se tlači hidrauličkom prešom ili pomoću hidrauličkog tlačnog jastuka (koji se umeće između ploče i površine stijene) pri čemu se mjere pomaci pojedinih točaka stijenske mase u zoni utjecaja apliciranog opterećenja. Princip je jednostavan te je iz dobivenih podataka i uz poznavanje Poisson-ovog koeficijenta moguće izračunati modul deformabilnosti. Pomake koji su posljedica ovog pokusa moguće je izmjeriti na dva načina, kao na slici 1.a), te mjerenjem pomaka točaka u dubini opterećene zone pomoću višestrukih ekstenzometara, kao na slici 1.b).

a)



b)



Slika 1. Zone mjerenja pomaka kod pokusa pločom; a) mjerenje pomaka u ravni opterećenja; b) mjerenje pomaka u dubini opterećene zone

Kod prvog načina mjerenja točke pomaka raspoređene su u zoni čiji je polumjer jednak dvostrukom promjeru ploče. Pomaci se mogu mjeriti neovisno za svaku od ploča, što predstavlja bolju varijantu, te kao promjenu konvergencije, što mjeri ukupan pomak identično lociranih točaka obiju ploča. Ovaj način mjerenja nije pouzdan. Osnovni je nedostatak to što izmjereni pomak predstavlja posljedicu poremećenosti stijenske mase uslijed iskopa te se dobiva manji modul odnosno veća deformabilnost od realnog. Nedostatak je također što nije moguće izbjeći utjecaj poremećene zone pri iskopu podzemne prostorije i pripremi površine za ispitivanje.

Iz prethodno navedenih razloga preporuča se pouzdanije mjerenje pomaka u dubini zone utjecaja pokusa. Mjerenja se vrše višestrukim ekstenzometrima postavljenih u bušotine koje se buše u centrima opterećenih površina. Dubina bušotine predstavlja stabilnu točku ekstenzometrate ona treba biti oko 6 promjera ploče. U preporukama ISRM-a (ISRM 1979) moguće je pronaći upute za lociranje stabilnih točaka ekstenzometara. Prednost ove varijante ispitivanja, koju se naziva Plate Jacking Test (PJT), jest u tome što se isključuje utjecaj poremećene zone te omogućuje određivanje modula u funkciji dubine. Instrumenti za mjerenje pomaka trebaju imati razlučivost bolju od 0,01 mm ako se ispitivanje obavlja u stijenskoj masi s modulima većim od 35 GPa. Ekstenzometarskim mjerenjima riješene su poneke nedoumice prilikom interpretacije rezultata mjerenja.

Pokusom opterećenja pločom odnosno varijantom PJT mogu se odrediti različiti moduli deformabilnosti (npr. modul opterećenja, rasterećenja, ponovnog opterećenja, dugotrajnog opterećenja i sl.), svojstva tečenja stijenske mase, anizotropije stijenske mase ukoliko se obavlja više različito orijentiranih pokusa na jednoj lokaciji.

Za interpretaciju rezultata PJT ispitivanja koriste se rješenja izvedena iz teorije elastičnosti. Stijenska masa se predstavlja izotropno elastičnim poluprostorom koji je na površini opterećen pločom kružnog oblika. Pri tome, ovisno o krutosti ploče razlikujemo:

- Pokus s fleksibilnom pločom tj. tlačnim jastukom;
- Pokus s krutom pločom.

Kruta ploča je dobro rješenje kod ispitivanja tla i mekših stijena. U tvrdim stijenama, ploča promjera većeg od 1 m često puta nema zahtjevanu krutost što komplicira sliku raspodjele naprezanja (Van Heerden 1976). S povećanjem promjera ploče sve je teže zadovoljiti krutost. Krutost ploče mora biti najmanje dvostruko veća od krutosti stijenske mase (Lama i sur. 1978).

Za stijensku masu veće krutosti bolje rješenje je fleksibilna ploča. Fleksibilni kontakt postiže se umetanjem tlačnih jastuka između krutih ploča i stijenske mase. U ovom slučaju opterećenje se može postići na 2 načina:

- pomoću hidrauličkih preša kao i u slučaju krute ploče (tlačni jastuci su zatvoreni);
- hidrauličkim tlačenjem jastuka (hidrauličke preše se zamijene razuporama).

Pretpostavka idealno elastične (fleksibilne) ploče podrazumijeva jednoliku raspodjelu naprezanja, a idealno kruta ploča jednoliku raspodijeljen pomak ispod ploče.

Rješenje preporučeno od Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM 1979) se odnosi na fleksibilnu ploču odnosno na Boussinesq-ovo rješenje tj. pretpostavku jednoliko raspodijeljenog naprezanja, gdje se pomak u bilo kojoj točki ispod središta ploče može odrediti preko izraza (1):

$$w_z = \frac{2q(1-\nu^2)}{E_m} \left((a^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} - z \right) - \frac{qz(1+\nu)}{E} \left(z(a^2 + z^2)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right) \quad (1)$$

gdje su:

w_z – pomak mjerne točke u smjeru apliciranog opterećenja,

z – udaljenost opterećene površine i točke u kojoj je pomak izmjeren,

a – polumjer opterećene kružne ploče,

q – aplicirano opterećenje,

ν – Poisson-ov koeficijent,

E_m – modul deformabilnosti.

Jednadžba (1) može se prikazati i u obliku (2) za računanje tzv. instant modula u točki u kojoj je izmjeren pomak kao rezultat opterećenja pločom:

$$E_m = \frac{q}{w_z} (K_z) \quad (2)$$

Modul deformabilnosti stijenske mase koja se nalazi između točaka dubine z_1 i z_2 tzv. intervalni modul može se izračunati prema (3):

$$E_m = q \left[\frac{K_{z_1} - K_{z_2}}{w_{z_1} - w_{z_2}} \right] \quad (3)$$

Preporučena metoda ISRM-a ne navodi rješenje za opterećenje krutom pločom. Jednadžba (4) za izračun pomaka ispod krute ploče (Pells 1983), uz pretpostavku jednoliko raspodijeljenog pomaka ispod ploče:

$$w_z = \frac{Q}{E_m D \sqrt{2\pi}} \left[2(1-\nu^2) I_{101}(\psi) + z(1+\nu) I_{103}(\psi) \right] \quad (4)$$

gdje su:

w_z – pomak mjerne točke unutar opterećenog poluprostora,

Q – ukupno primjenjeno opterećenje,

D – promjer ploče,

z – udaljenost opterećene površine i točke u kojoj je pomak izmjeren.

Poulos daje rješenja integrala $I_{101}(\psi)$ i $I_{103}(\psi)$ kako slijedi (Poulos i sur. 1974):

$$I_{101}(\psi) = \left\{ \frac{2}{\pi} \right\}^{\frac{1}{2}} \sigma_o \quad (5)$$

$$I_{103}(\psi) = \left\{ \frac{2}{\pi} \right\}^{\frac{1}{2}} N_o^{-1} \sin \frac{1}{2} \lambda_o \quad (6)$$

gdje:

$$\sigma_o = \arcsin \left\{ 2 \left[(\psi^2 + (1+r)^2)^{\frac{1}{2}} + (\psi^2 + (1-r)^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \right\} \quad (7)$$

$$N_o = \left\{ (\psi^2 + r^2 - 1)^2 + 4\psi^2 \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

$$\lambda_o = \arctan \left\{ 2\psi(\psi^2 + r^2 - 1)^{-1} \right\} \quad (9)$$

gdje je:

r - radijalna udaljenost od središnje osi ploče.

Za izotropni materijal je $\psi = z$. Jednadžba (4) se pojednostavljeno može izraziti u obliku (10) za pomak točke u središnjoj osi (gdje je $r = 0$). U jednadžbi (10) izvršena je zamjena $D=2a$ i opterećenje Q je izraženo kao prosječno naprezanje q_{av} na površini πa^2 :

$$w_z = \frac{q_{av} a}{2 E_m} \left[2(1-\nu^2) \sigma_o + (1+\nu) \frac{z}{z^2+1} \right] \quad (10)$$

Vrlo često rješenja za fleksibilnu i krutu ploču daju module stijenske mase veće od modula intaktnog stijenskog materijala što je nemoguće ako se zna da stijenska masa sadrži diskontinuitete koji doprinose smanjenju modula odnosno povećanju deformabilnosti (Vrkljan

i sur. 1995). Ove greške, između ostalog, prouzročene su i zbog razlika između stvarnih uvjeta u kojima se pokus odvija i pretpostavljenih pri izvođenju jednadžbi. Jednadžbe su izvedene pod pretpostavkom da kružna ploča prenosi jednoliko opterećenje (elastična ploča) ili jednoliki pomak (kruta ploča) na homogeni, izotropno elastični, beskonačan poluprostor za koji se pretpostavi vrijednost Poisson-ovog koeficijenta. Na žalost, u najvećem broju slučajeva ovi uvjeti nisu ispunjeni.

Boyle (1992) je numerički simulirao pokus pločom da bi procijenio utjecaje raspucalosti stijenske mase i geometrije iskopa na određivanje modula. Interpretacija simuliranih pokusa ISRM-ovom metodom pokazala se problematičnom. Modul raspucane stijenske mase bio je veći od modula neraspucane, a obadva modula su bili veći od ulaznog modula kojim je simulirana intaktna stijena. Zbog toga, Boyle predlaže alternativnu metodu interpretacije koja u osnovi polazi od Bousinesq-ovog rješenja odnosno rješenja za fleksibilnu ploču, ali njegovo rješenje koristi metodu najmanjih kvadrata.

Metodom najmanjih kvadrata pretpostavlja se funkcija ϕ koja se definira kao suma kvadratnih razlika između prognoziranih i izmjerenih pomaka u pokusu (11):

$$\phi = \sum_{i=1}^n (y_{pi} - y_{mi})^2 \quad (11)$$

gdje su:

y_{mi} – izmjereni pomak u nekoj dubini uključujući i površinu stijene,

y_{pi} – prognozirani pomak u istoj dubini i pri istom stanju naprezanja kao za y_{mi} ,

n – broj točaka u kojima se mjeri pomak tijekom pokusa.

Ako se u jednadžbi (11) prognozirani pomak y_{pi} izrazi kao w_z u jednadžbi (1) dobit će se prošireni oblik jednažbe u kojoj su poznati svi parametri osim E_m i ν . Deriviranjem proširene jednažbe prvo po parametru E_m , a zatim po parametru ν dobiju se dvije nove jednažbe. Prognozirani pomaci će najbolje odgovarati izmjerenim pomacima kada funkcija ϕ ima minimalnu vrijednost. To znači da je novonastale jednažbe (12) i (13) potrebno izjednačiti s nulom.

$$\frac{d\phi}{dE_m} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d\phi}{d\nu} = 0 \tag{13}$$

Rješavanje sustava jednažbi (12) i (13) podrazumijeva da se E_m u jednažbi (12) izrazi u smislu ν , te se kao takav uvrsti u jednažbu (13). Time jednažba (13) postaje polinom 4-tog reda gdje je jedina nepoznanica ν . Ovaj polinom se može riješiti numerički ili analitički. Rješenje polinoma koje pada u interval $0 < \nu \leq 0,5$ predstavlja vrijednost Poisson-ovog koeficijenta. Uvrštenjem vrijednosti ν u jednažbu (12) odredi se vrijednost modula deformabilnosti E_m .

Metoda najmanjih kvadrata pruža mogućnost da se u interpretaciju uvrste svi izmjereni pomaci u pokusu (na različitim dubinama) te tako omogućava izračun jedinstvenog ili ukupnog modula (E_{mOA}) koji karakterizira deformabilnost cjelokupne stijenske mase uključene u pokus. Metoda zahtijeva unos pomaka za minimalno dvije mjerne točke u pokusu, ali što je najbitnije njome je moguće u interpretaciji izostaviti površinski dio stijene koji je poremećen iskopom podzemne prostorije.

Treba napomenuti da su se u Boyle-ovom rješenju (1992) potkrale izvjesne tipografske greške kod izvoda i prezentacije metode najmanjih kvadrata koje je uočio i ispravio Unal (1997). Detaljan izvod metode najmanjih kvadrata za fleksibilni i kruti tip ploče može se naći u studiji Unal (1997) zajedno s numeričkim primjerima koji su vrlo korisni za provjeru izvedenih rješenja.

Utjecaj vrijednosti Poisson-ovog koeficijenta na vrijednost modula deformabilnosti je relativno mali i zato se najčešće interpretacija rezultata pokusa provodi s pretpostavljenom vrijednosti ν odnosno korištenjem jednažbe (12).

2.3. Pokus velikim tlačnim jastukom (LFJ)

Pokus velikim tlačnim jastucima (Large Flat Jack, LFJ) najpouzdaniji je in situ pokus za određivanje deformabilnosti stijenske mase. Pokus pruža široke mogućnosti izbora veličine opterećene plohe kao i njenog položaja u prostoru. Slično drugim in situ pokusima i LFJ pokus je opterećen problemima interpretacije rezultata mjerenja (Kavur 2000).

Metoda velikih tlačnih jastuka uvedena je u praksu s ciljem eliminiranja nedostataka pokusa opterećenja pločom. Zato Lama i Vutukuri (1978) ovaj pokus tretiraju kao modificirani pokus pločom. Metodu su prvi put koristili Oberti, Breth i Talobre, te nešto kasnije Institut Jaroslav Černi iz Beograda (Kujundžić 1954). Bitno poboljšanje postupka izvršio je LNEC iz Portugala (Rocha 1966, Wittke 1991).

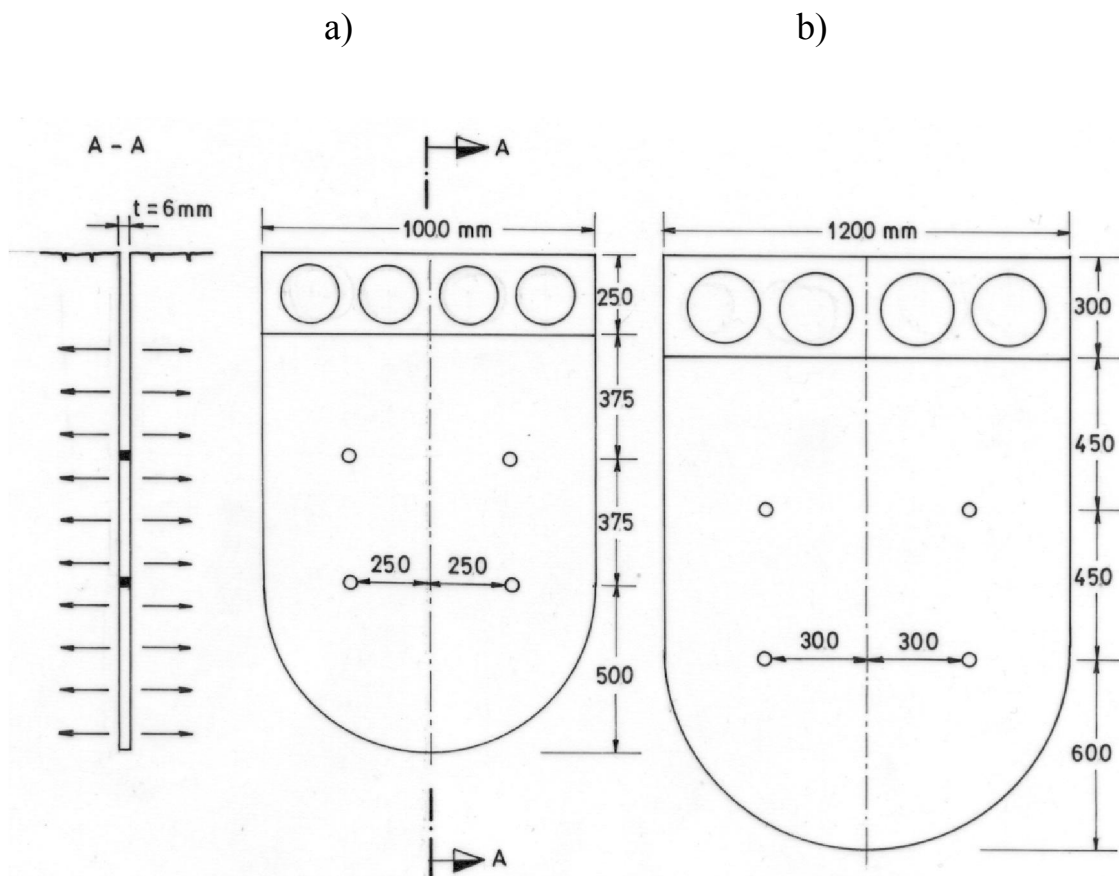
Princip LFJ pokusa je sljedeći:

- U iskopani ili izrezani prorez u stijenskoj masi umeće se tlačni jastuk.
- Povećanjem hidrostatskog tlaka u jastuku opterećuje se stijenska masa na suprotnim stranama proreza.
- Mjeri se povećanje otvora proreza u funkciji apliciranog naprezanja.
- Iz podataka o naprezanju i izmjenom pomaku računaju se moduli deformabilnosti stijenske mase.

Stručnjaci LNEC-a uočili su nedostatke metode koju je razvio Kujundžić (1954) te su razradili sasvim novi pristup ovom pokusu. Uveli su izmjene u tehnologiji izrade proreza, obliku jastuka, sistemu mjerenja pomaka i dr. Pokus je najavio Rocha na prvom kongresu ISRM-a 1966, a službeno je predstavljen 1968 (Rocha 1968). Detaljan opis i teoretska osnova metode prikazana je u dokumentu LNEC-a (1976). Glavne karakteristike ove metode su:

- Prorez se izvodi rezanjem pomoću dijamantne pile. Širina proreza je 6 mm.
- Prorez može imati proizvoljnu dubinu što ovisi o tehničkim karakteristikama opreme.
- Prorez može imati proizvoljan položaj u prostoru.
- Može se istovremeno koristiti više jastuka u jednoj ravnini čime se znatno povećava volumen utjecaja pokusa.
- Oblik jastuka je kombinacija kvadrata sa stranicom 1 m i polukruga promjera 1 m.
- Prorezi mogu djelomično ili potpuno ostati prazni radi stvaranja tzv zaštitne zone. Na ovaj način dobiju se jasniji rubni uvjeti pokusa što olakšava interpretaciju rezultata mjerenja.
- U svaki jastuk ugrađena su četiri mjerna uređaja za mjerenje promjene širine proreza.
- Nije uvijek potrebno injektiranje zone oko jastuka čime se izbjegava utjecaj stišljivosti injekcijske smjese na rezultat mjerenja.

Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM, International Society for Rock Mechanics) preporučilo je ovu metodu za upotrebu, te je 1986 izdalo tzv. *Suggested Method* (SM) u kome je opisana metodologija izvođenja i interpretacije rezultata mjerenja. Treba upozoriti da SM ostavlja otvorenim neke probleme interpretacije rezultata mjerenja što korisnicima stvara značajne probleme (Kavur 2000).



Slika 2. Tlačni jastuk: a) LNEC-ov jastuk; b) Interfels-ov jastuk (ELFJ)

Za interpretaciju rezultata pod pretpostavkom izotropno elastičnog naponsko deformacijskog ponašanja stijenske mase, modul deformabilnosti se računa po sljedećoj jednadžbi (LNEC 1976, ISRM 1986):

$$E_i = k_i (1 - \nu^2) \frac{P}{d_i} \quad (14)$$

i - Pozicija mjernog uređaja ugrađenog u jastuk

E_i - Modul deformabilnosti na mjernoj točki “ i ”

P - Inkrement primjenjenog naprezanja. $P = P_M - P_m$

P_M - Maksimalno naprezanje

P_m - Minimalno naprezanje

d_i - Inkrement otvaranja proreza u mjernoj točki “ i ” kao posljedica apliciranog naprezanja “ P ”

ν - Poisson-ov koeficijent (obično se uzima vrijednost 0.2-0.3). Utjecaj Poisson-ovog koeficijenta na modul je mali. Promjena vrijednosti ν s 0.2 na 0.3 uzrokuje promjenu modula za samo 5%.

k_i - Koeficijent koji ovisi o krutosti, obliku, broju i rasporedu tlačnih jastuka, lokaciji mjerne točke “ i ”, obliku podzemne prostorije u kojoj se pokus izvodi i dubini vlačne pukotine nastale u stijenskoj masi tijekom pokusa.

Problem izračunavanja modula nastaje pri pokušaju definiranja koeficijenta k_i u kome su sadržane sve aproksimacije koje se ne mogu izbjeći zbog vrlo kompliciranih rubnih uvjeta. Generalno gledajući postoje dva pristupa definiranju koeficijenta k_i (Kavur 2000).

SLUČAJA

Pod pretpostavkom korištenja jastuka standardnih dimenzija u podzemnoj prostoriji standardnog oblika, ISRM (1986) daje vrijednosti ovih koeficijenata za nekoliko kombinacija tlačnih jastuka uz pretpostavku poznavanja dubine vlačne pukotine. Tu nastaje problem. Dubina vlačne pukotine u pravilu se ne može izmjeriti s obzirom da se njena vrijednost mjeri u dubini stijenske mase, a ne na površini iskopa podzemne prostorije (vidi tablicu 1). Autori ove metode preporučuju dva rješenja:

1. Ako je poznata vlačna čvrstoća (σ_t) stijene i početno naprezanje u stijenskoj masi (σ_i) (što obično nije slučaj), dubina vlačne pukotine može se dobiti sa dijagrama prikazanog na slici 3. za slučaj korištenja jednog jastuka. Autori daju slične dijagrame i za tri paralelna jastuka (slika 4.). Kao što se vidi, čak i uz pretpostavku poznavanja vlačne čvrstoće i stanja naprezanja, pripremljeno rješenje koje se može direktno koristiti bez dodatnih numeričkih analiza (što izvršitelj obično ne želi raditi) postoji samo za tri kombinacije jastuka. Na taj način se 9 kombinacija iz tablice reducira na tri iskoristiva.

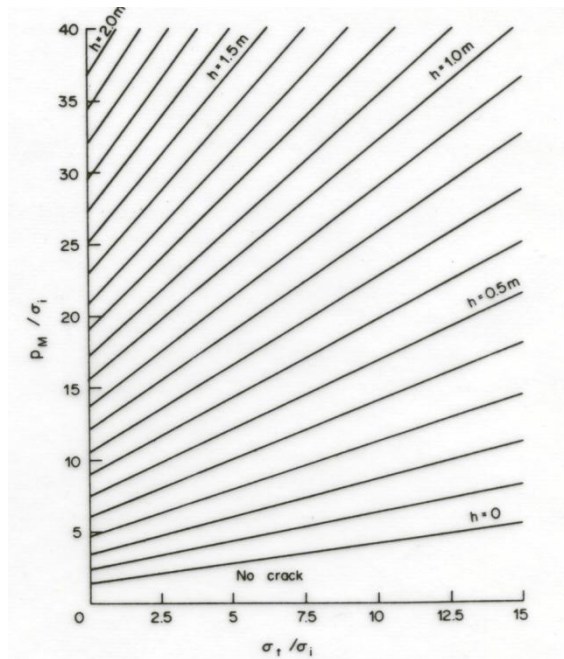
Najvjerovatnija vrijednost modula deformabilnosti stijenske mase u zoni utjecaja jastuka računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$E = (1 - \nu^2) P \frac{\sum_i k_i}{\sum_i k_i d_i} \quad (15)$$

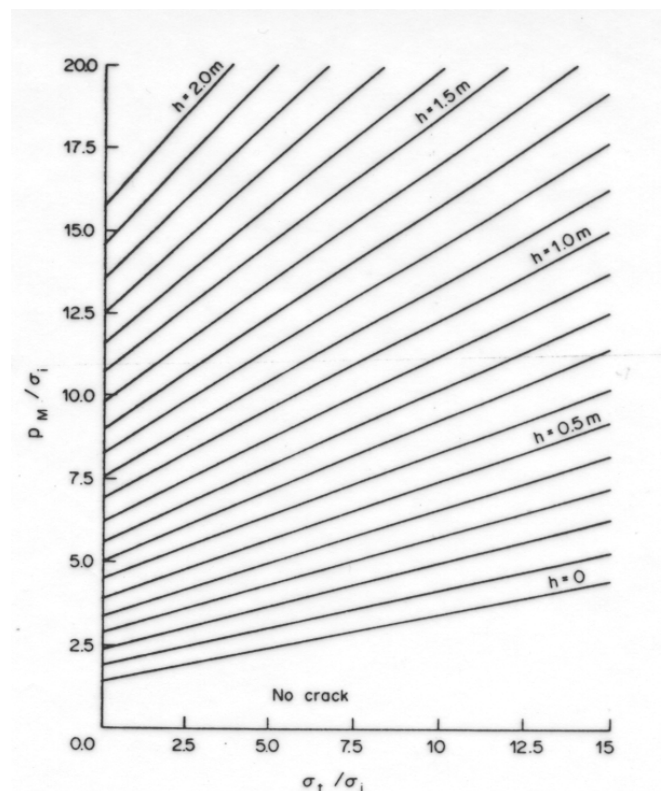
2. Ako vrijednosti vlačne čvrstoće i početnog stanja naprezanja nisu poznati, što je najčešći slučaj, autori preporučuju korištenje metode najmanjih kvadrata na taj način da se za odabrani slučaj iz tablice 1 izračunaju moduli za sve vrijednosti dubine vlačne pukotine prema jednadžbi (15). Ove vrijednosti omogućavaju izračunavanje sume kvadrata prema izrazu:

$$\Delta = \sum_i \left(d_i - \frac{1 - \nu^2}{E} P k_i \right)^2 \quad (16)$$

Najvjerovatnija vrijednost dubine vlačne pukotine je ona koja daje najmanju vrijednost “ Δ ” i najvjerovatnija vrijednost modula je ona koja se dobije iz jednadžbe (15) za ovu dubinu pukotine. Ovaj postupak zahtjeva najmanje 6 mjernih točaka što znači da se pokus mora obaviti s najmanje dva paralelna jastuka.



Slika 3. Promjena dubine vlačne pukotine $h(m)$ s promjenama početnog naprezanja (σ_i), vlačne čvrstoće stijenske mase (σ_t) i maksimalnog apliciranog naprezanja (P_M), za slučaj jednog proreza (ISRM 1986).



Slika 4. Promjena dubine vlačne pukotine $h(m)$ s promjenama početnog naprezanja (σ_i), vlačne čvrstoće stijenske mase (σ_t) i maksimalnog apliciranog naprezanja (P_M), za slučaj tri kontinuirana proreza (ISRM 1986).

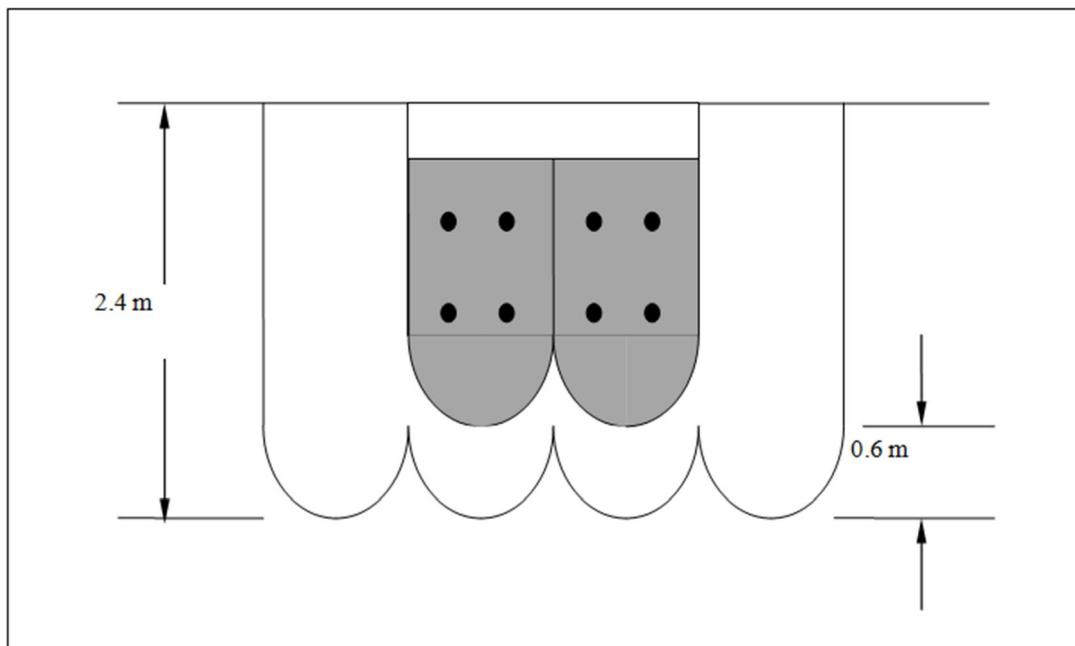
SLUČAJ B

Naprijed opisana metodologija ne može se primjeniti u sljedećim slučajevima:

- Ako se koriste jastuci drugačijeg oblika i/ili s drugačijim rasporedom mjernih točaka u odnosu na jastuk LNEC-a.
- Ako podzemna prostorija ima drugačiji oblik od onog prikazanog u referencama (LNEC 1976, ISRM 1986).
- Ako se primjenjuje kombinacija jastuka drugačija od onih u tablici.

Što učiniti ako neki od ovih zahtjeva nije ispunjen? Autori (LNEC 1976) preporučuju korisniku da vrijednosti koeficijenta k_i odredi numeričkim postupkom na način kako su to oni učinili za slučajeve prikazane u tablici 1. ISRM prihvaća ovakav pristup te upućuje korisnika na izvornu referencu (Pinto 1980). Ovakav pristup otvara cijeli niz problema koji mogu nastati u odnosima naručitelja i izvršitelja ispitivanja pošto se radi o proračunima s kojim izvršitelj obično nije familijaran.




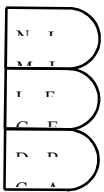



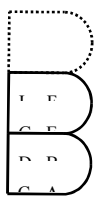
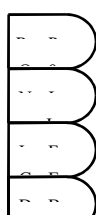
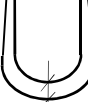
Uočavajući vrlo rano problem određivanja dubine vlačne pukotine, Rocha (1970) preporuča eliminiranje ovog problema stvaranjem tzv. zaštitne zone oko jastuka. Ova se zona izvodi zasjecanjem tzv. pasivnih proreza sa obje strane tzv. aktivnog proreza, te produbljenjem aktivnog proreza (slika 5). Jastuci se umeću samo u aktivne proreze. Dubina produbljenja aktivnog proreza širine 1m može se smatrati dubinom vlačne pukotine što omogućava korištenje koeficijenata k_i iz tablice 1.



Slika 5. Izvođenje zaštitnih zona radi reduciranja vlačnih naprezanja u stijenskoj masi na rubovima jastuka (Kavur 2000)

Danas se proizvode veći i manji jastuci od standardnog LNEC jastuka. Koeficijenti iz tablice 1 mogu se koristiti za slične jastuke. Pod sličnim se smatraju jastuci koji imaju oblik LNEC jastuka s proporcionalnim rasporedom mjernih točaka. Interfels-ov ELFJ (extra large flat jack, slika 4) jastuk je sličan LNEC jastuku, ali je proporcionalno 1.2 puta veći. Ekvivalentna dubina vlačne pukotine s kojom se odabiru vrijednosti koeficijenta k_i iz tablice 1. dobije se množenjem dubine ostvarene pukotine s koeficijentom $1/B$ gdje je B (m) širina užeg ili šireg jastuka.

Tablica 1. Koeficijent k_i (cm) za različite kombinacije tlačnih jastuka (ISRM 1986).

Slučaj		Dubina vlačne pukotine "h"(m)								
		0,0	0,2	0,5	1,0	1,5	1,7	2,0	3,0	∞
	AB	131.	163.	183.	196.			205.		22.4
	CD	136.	166.	184.	196.			205.		221.
	AF	150.	193.	214.	232.	240.		246.		280.
	BE	191.	239.	257.	273.	281.		286.		320.
	CI	160.	198.	217.	232.	240.		246.		279.
	D	215.	245.	260.	274.	281.		286.		319.
	A	137.	167.	185.	196.			205.		222.
	B	151.	175.	187.	196.			205.		222.
	C	144.	171.	186.	196.			205.		221.
	D	164.	179.	188.	196.			205.		221.
	AL	155.	199.	224.	242.	257.		267.		313.
	BJ	202.	255.	277.	294.	307.		316.		361.
	CN	167.	206.	228.	243.	257.		266.		312.
	D	231.	264.	282.	296.	308.		316.		361.
	EF	216.	273.	296.	312.	325.		333.		378.
	GI	249.	284.	301.	314.	325.		333.		378.
	AL	141.	178.	198.	213.			224.		254.
	BJ	159.	192.	209.	223.			233.		264.
	CN	149.	183.	200.	213.			223.		253.
	D	176.	198.	212.	224.			234.		263.
	EF	159.	182.	190.	196.			205.		222.
	GI	176.	187.	192.	196.			205.		221.
	A	137.	171.	187.	199.			205.		222.
	B	152.	177.	190.	199.			205.		222.
	C	145.	175.	188.	199.			205.		221.
	D	165.	182.	191.	199.			205.		221.
	A	152.	197.	213.	232.	240.		246.		280.
	B	195.	234.	256.	273.	281.		286.		320.
	C	163.	203.	217.	232.	240.		246.		279.
	D	221.	251.	261.	274.	281.		286.		319.
	E	200.	247.	258.	273.	281.		286.		320.
	F	175.	210.	220.	232.	240.		246.		280.
	G	228.	255.	263.	274.	281.		286.		319.
	I	197.	218.	224.	232.	240.		246.		279.
	AP	157.	199.	225.	250.		268.		288.	335.
	BO	206.	258.	284.	306.		323.		341.	388.
	CR	170.	209.	231.	252.		269.		287.	334.
	D	237.	271.	291.	309.		324.		340.	387.
	EL	223.	282.	309.	331.		347.		364.	411.
	FJ	228.	291.	319.	341.		357.		373.	420.
	G	259.	296.	316.	334.		348.		363.	410.
	IM	267.	306.	326.	344.		358.		373.	419.
										

3. PJT i LFJ ispitivanja na projektu Karun 3 u Iranu

3.1. Značajke stijenskog masiva na projektu Karun 3

Brana Karun 3 (K3) je 205 m visoka, dvostruko zakrivljena lučna betonska brana koja se nalazi na istoimenoj rijeci Karun u zapadnom dijelu Zagros planinskog lanca odnosno sjeveroistočnom dijelu provincije Khuzestan. Izgradnja brane je završena 2004. godine, a istražni radovi započeti su početkom 90-tih godina prošlog stoljeća.

Stijenski masiv na pregradnom mjestu brane čine dvije dominantne geološke formacije naboranih, oligocenskih i miocenskih sedimentnih stijena. Prvu formaciju čine vapnenci tzv. Asmari formacije. To su čvrsti, debelo uslojeni vapnenci i laporoviti vapnenci. Drugu, tzv. Pabdeh formaciju, čine srednje čvrsti slojevi lapora sa proslojcima laporovitog vapnenca. Najvažnija geološka značajka pregradnog mjesta je Keyfmalek antiklinala čiju jezgru tvori Pabdeh formacija. Temelji brane su smješteni u južnom krilu antiklinale u Asmari vapnencima. Geotehnički parametri stijenske mase na pregradnom mjestu brane Karun 3 prikazani su u tablici 2 (Ghazvinian 2004).

Tablica 2. Geotehnički parametri stijenskog masiva na pregradnom mjestu brane Karun 3 (Ghazvinian 2004)

Geotehnički parametar	Vapnenac	Laporoviti vapnenac	Lapor
UCS suho (MPa)	70-90	60	20-25
UCS vlažno (MPa)	60	50	15
RMR	40–70 (prosjek 58)	23–60 (prosjek 49)	12–45 (prosjek 38)
Karstifikacija	Visoka	Srednja	Niska
Trajnost	Visoka	Srednja do niska	Niska

U cilju određivanja mehaničkih značajki stijenske mase na pregradnom mjestu proveden je opsežan program istražnih radova sastavljen od tri metode in situ ispitivanja deformabilnosti. Na pregradnom mjestu iskopano je ukupno šest istražnih galerija (potkopa) i to četiri galerije u desnom i dvije u lijevom boku buduće brane.

Program in situ ispitivanja uključivao je 22 pokusa opterećenja pločom (PJT, pokus s dvije instrumentirane ploče, ukupno 44 pokusa), 12 pokusa velikim tlačnim jastukom (LFJ) i 39 pokusa fleksibilnim tipom dilatometra u bušotinama bušenim u istražnim galerijama. Detalji o provedenim istražnim radovima opisani su detaljno u završnim izvještajima: Geotecnika Co., Zagreb, Croatia (1993): Karun 3 Development Project, Iran Water and Power Resources

Development Company, Tehran – Iran, Final reports on plate load, large flat jack and dilatometer tests.

3.2. Opis obavljenih PJT ispitivanja

Pokusi opterećenja pločom su obavljani u istražnim galerijama s poprečnim presjekom dimenzija 2.5 x 2.5 m. Na projektu Karun 3 obavljani su pokusi u vertikalnom i horizontalnom smjeru (slika 6) i to sukladno pravcima opterećenja buduće brane. Obzirom na vrlo strm nagib slojeva (cca 80°) može se smatrati da horizontalni pokus daje deformabilnost stijenske mase u pravcu okomitom na slojeve, a vertikalni u pravcu paralelnom sa slojevima. Na projektu Karun 1 obavljani su i kosi pokusi kod kojih su ploče bile paralelne s ravninama slojevitosti (slika 7) (Kavur 2000).



Slika 6. Horizontalni pokus (Karun 3, 1992)



Slika 7. Kosi pokus (Karun 1, 1993)

Na odabranoj lokaciji pokusa izvršena je obrada površina koje su u kontaktu s pločama. Gruba obrada je vršena pomoću zračnog čekića, a fina pažljivo upotrebom čekića i dlijeta. U većini slučajeva na dubini od 30 cm nije više bilo vidljivih tragova oštećenja stijenske mase uslijed miniranja. Obradena površina imala je promjer cca 1,5 m. Kriterij ravnosti plohe bio je ± 5 mm, s tim da ravnine obiju ploha moraju biti paralelne. Izvršeno je vrlo detaljno snimanje svih vidljivih elemenata koji služe za opis stijenske mase u zoni utjecaja pokusa (Kavur 2000).

Korištena je mjerna oprema njemačke firme Interfels koja se u osnovi sastoji od dvije krute kružne ploče promjera 1 m, koje su razuprte pomoću osam hidrauličkih preša, a ostvareni pomaci u stijenskoj masi mjere se sustavom dvaju bušotinskih, višestrukih ekstenzometara (MPBX).

Ovo je oprema najvećeg kapaciteta (8 MN) koju je Interfels do tada proizveo i prvi puta je korištena na spomenutim projektima u Iranu. Do tada, najveći kapacitet Interfelsove opreme bio je 5 MN (Bock 1991).

Nakon obrade površina, u centrima opterećenih ploha buše se ekstenzometarske koaksijalne bušotine promjera 76 mm i dubine 6,5 m. Bušotine su okomite na plohe opterećenja i izvedene

su uz upotrebu dijamantnog pribora i dvostruke jezgrene cijevi kako bi se dobila što kvalitetnija jezgra. Jezgra je potrebna iz dva razloga:

- (a) položaj mjernih točaka ekstenzometara ovisi o položaju diskontinuiteta i položaju granica (litoloških i granica materijala različitih mehaničkih svojstava i sl.);
- (b) snimak bušotine je bitan element pri interpretaciji rezultata pokusa. Ocjenjeno je da se za promjer ploče od 1 m, stabilnom može smatrati točka na dubini 6,0 m. Točke ekstenzometra (MPBX) su se smještale od površine pa do dubine 3,0 m (ukupno 5 mjernih točaka na svakoj od ploča).

Površina stijene na koju naliže ploča nikada se ne može obraditi tako precizno da bi bilo moguće ostvariti potpun kontakt ploče i stijene. Kao standardni, usvojen je postupak izravnavanja površine cementnim mortom. ISRM preporuča da debljina cementnog morta ne pređe 30 mm. Neki autori preporučuju da se površina obradi cementnim mortom i da se tek nakon njegovog stvrdnjavanja pristupi montaži ploča. Ovaj postupak moguć je ako se koristi elastična ploča. U slučaju da se koristi kruta ploča ovim načinom ne može se postići zadovoljavajuća točnost obrade (ravnost površine). Zbog toga, pri korištenju krute ploče treba izvršiti zalijevanje prostora između ploče i stijene cementnim mortom odgovarajuće konzistencije. U fazi stvrdnjavanja morta (24 sata), stabilnost cijelog sistema (ploče, razupore i preše) se osigura malim tlakom što omogućava uklanjanje skele (skela nije potrebna ako se radi o vertikalnom pokusu). Nakon stvrdnjavanja morta montiraju se glave ekstenzometara i priključuju svi mjerni instrumenti.

Ispitivanja su obavljena sa pet ciklusa opterećenja i rasterećenja. Maksimumi pojedinih ciklusa bili su: 1,8; 3,6; 5,4; 7,2 i 9,0 MPa. Opterećenje i rasterećenje je vršeno u inkrementima s tim da se maksimum odnosno minimum jednog ciklusa dostigne u 5-6 inkremenata

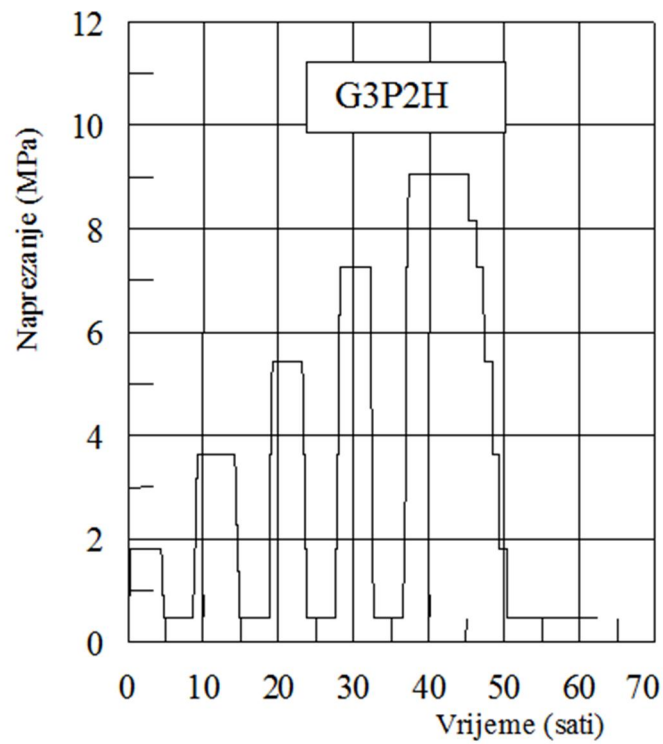
Ciklusi br. 1-4

Opterećenje jednog inkrementa povećavano je i smanjivano tijekom cca 1 min. Nakon postizanja željenog tlaka, isti je održavan stalnim tijekom 5 min. Čitanje pomaka vršeno je nakon prve, druge i pete minute. Nakon pete minute opterećenje je povećavano (smanjivano) bez obzira na brzinu pomaka. Maksimalni i minimalni tlak ciklusa održavan je stalnim najmanje 4 sata s čitanjem pomaka nakon 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 180 i 240-te min. Ako se mjerenja u posljednja dva sata razlikovalo za više od 0,01 mm, mjerenje je nastavljeno u vremenskim intervalima od po 1 sat sve dok ovaj uvjet nije bio ispunjen.

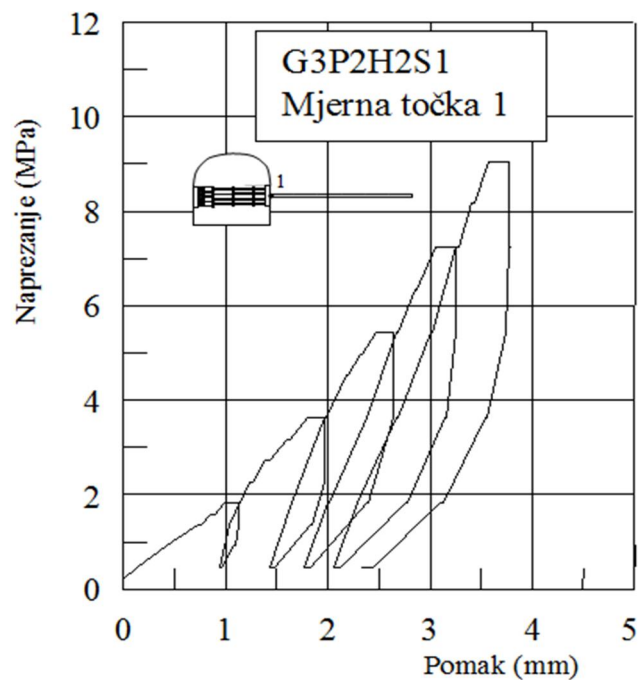
Ciklus br. 5

Opterećenje jednog inkrementa obavljeno je po istom programu kao i u prethodnim ciklusima. Pri rasterećenju, tlak jednog inkrementa održavan je konstantnim tijekom 1 sata s čitanjem pomaka u 1, 2, 4, 8, 15, 30 i 60-oj minuti. Maksimalni tlak petog ciklusa održavan je stalnim tijekom 8 sati s čitanjem pomaka u 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420 i 480-oj minuti. Ako se mjerenja u posljednja 2 sata razlikovalo za više od 0,01 mm mjerenje se nastavljalo u vremenskim intervalima od po jedan sat sve dok ovaj uvjet nije bio ispunjen. Minimalni tlak petog ciklusa (final recovery) održavan je stalnim tijekom najmanje 12 sati s čitanjem pomaka u 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120,.....720-oj minuti. Ako se mjerenja u posljednja 2 sata razlikuju za više od 0,01 mm mjerenje je nastavljeno u vremenskim intervalima od po jedan sat sve dok ovaj uvjet nije bio ispunjen. Pokus je trajao cca 62 sata.

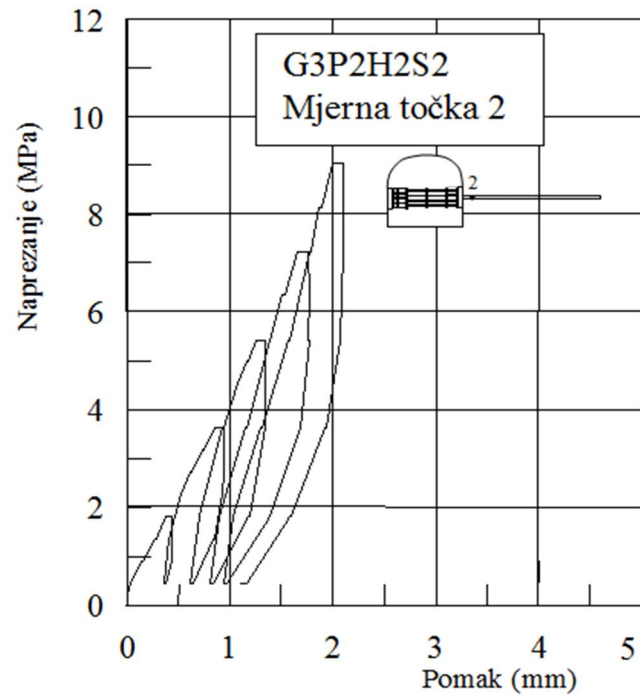
Primjer rezultata PJT ispitivanja prikazan je grafički na slikama 8 do 14 za pokus G3P2H ili P2BH (oznaka u tablicama usporedbi s LFJ rezultatima) . Prikazane su krivulje “naprezanje-pomak” za svaku od mjernih točaka ekstenzometra (Kavur 2000).



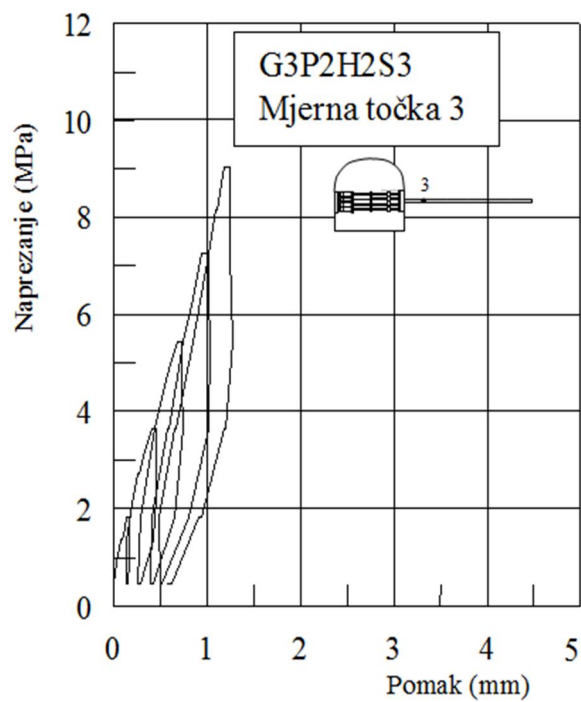
Slika 8. Vremenski tijek pokusa pločom G3P2HS1 (Karun 3, 1992)



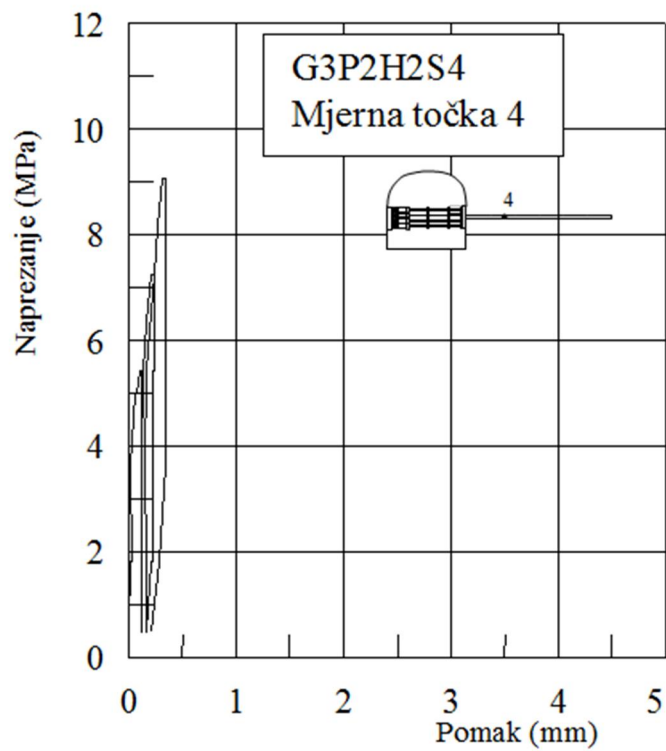
Slika 9. Krivulja „naprezanje-pomak“ u pokusu G3P2H, na ploči br.2, za mjernu točku 1 (Karun 3, 1992)



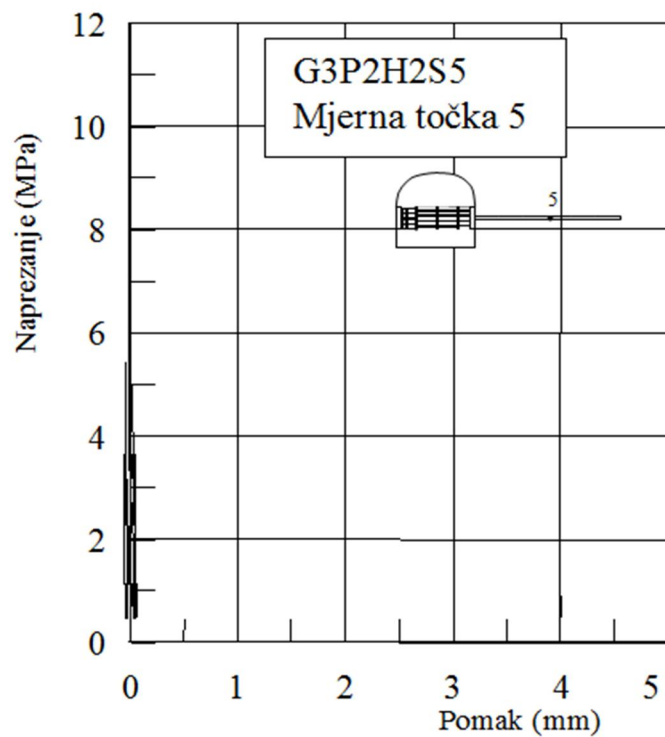
Slika 10. Krivulja “naprezanje-pomak” u pokusu G3P2H, na ploči br.2, mjernu točku 2 (Karun 3, 1992)



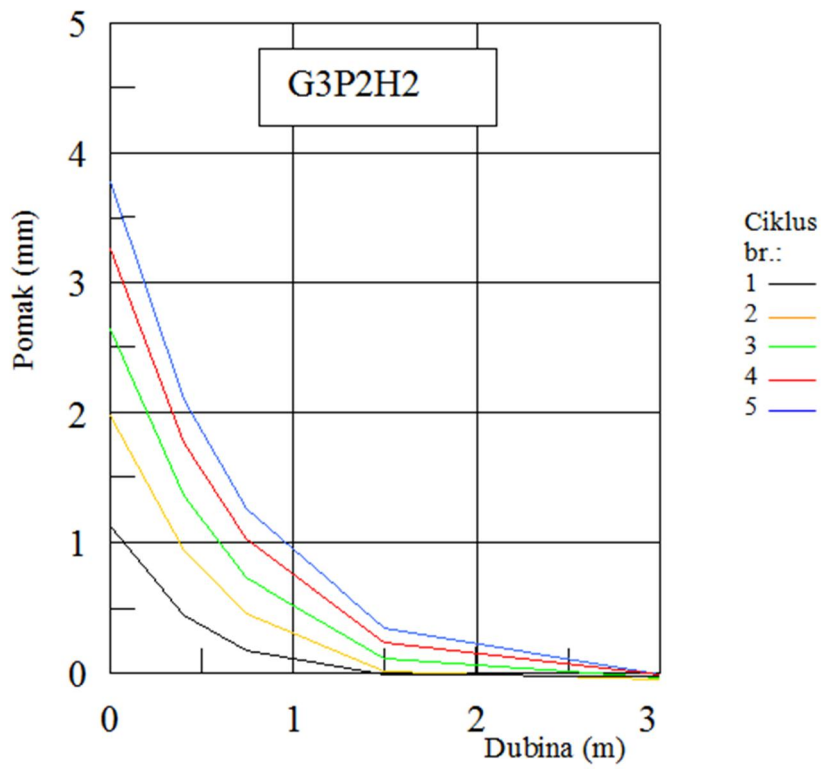
Slika 11. Krivulja “naprezanje-pomak” u pokusu G3P2H, na ploči br.2, za mjernu točku 3 (Karun 3, 1992)



Slika 12. Krivulja “naprezanje-pomak” u pokusu G3P2H, na ploči br.2, mjernu točku 4 (Karun 3, 1992)



Slika 13. Krivulja “naprezanje-pomak” u pokusu G3P2H, na ploči br.2, za mjernu točku 5 (Karun 3, 1992)



Slika 14. Distribucija ostvarenih pomaka po dubini stijenske mase u pokusu G3P2H na ploči br.2, za svaki od 5 ciklusa (Karun 3, 1992)

3.3. Opis obavljenih LFJ ispitivanja

Projektanta lučne brane Karun 3 interesirala je deformabilnost stijenske mase u pravcima maksimalnih naprežanja koje brana unosi u stijensku masu, te deformabilnost paralelno i okomito na plohe slojevitosti (Kavur 2000).

Oprema za bušenje centralne bušotine:

Tip sržne cijevi:	Jednostruka, s dijamantnom krunom
Promjer centralne bušotine:	250 mm
Pogonski motor bušilice:	Hidraulički

Oprema za piljenje proreza:

Promjer pile:	600; 900; 1200 mm
Debljina pile:	8,3 mm
Maksimalna dubina rezanja:	2300 mm
Pogonski motor pile:	Hidraulički
Položaj proreza u odnosu na centralnu bušotinu:	Ekscentričan

Pogon opreme za bušenje i rezanje:

Diesel-hidraulički agregat	Snaga= 26 kW
----------------------------	--------------

Veliki tlačni jastuk:

Širina	1190 mm
--------	---------

Visina	1805 mm
Efektivna visina	1500 mm
Efektivna površina na koju se aplicira opterećenje	1,65 m ²
Debljina jastuka	6 mm
Debljina lima	cca 1 mm
Efektivno opterećenje jastukom	0-16 MPa
Broj senzora pomaka	4
Rezolucija očitavanja pomaka	0.001 mm
Tekućina	Hidrauličko ulje
Hidraulička ručna pumpa	0-160 bar
Manometar 0-160 bar	klase 0,6

Za potrebe pripremnih radova na odabranoj mikrolokaciji pokusa izvršeno je proširenje istražne galerije kako bi se omogućila montaža opreme za bušenje i rezanje. Zatim je izvršena obrada stijenske mase tako da je obrađena ploha bila okomita na jastuk. Obrada podrazumjeva stvaranje ravne plohe uz uklanjanje stijenske mase poremećene miniranjem. Uklanjanje poremećene zone važno je iz dva razloga:

- (a) eliminira se utjecaj ove zone na rezultate mjerenja;
- (b) smanjuje se vjerojatnost ispadanja blokova tijekom rezanja proreza što može izazvati zaglavu pile.

Obrađena zona treba biti najmanje 2 m šira od širine aktivnih jastuka kako bi se mogao pratiti razvoj vlačnih pukotina u ravnini jastuka. Nakon završetka ovih radova, a prije montaže opreme za bušenje i rezanje izvršeno je detaljno inženjerskogeološko snimanje mikrolokacije pokusa.

Ovaj snimak zajedno s podacima dobivenim pregledom jezgre iz centralne bušotine daje vrlo detaljnu sliku inženjerskogeoloških karakteristika mikrolokacije (Kavur 2000).

U zoni budućeg aktivnog proreza (prorez s tlačnim jastukom) ugrađuju se tri para repera. Raspored repera za mjerenje pomaka na površini iskopa prikazan je na slici 16. Promjena međusobnog razmaka repera mjerena je mehaničkim deformetrom (Huggenberger) koji ima rezoluciju očitavanja od 1 μm (slika 21).

Nakon ugradnje, obavlja se nulto mjerenje razmaka. Daljnja mjerenja, obavljaju se redovito u svim fazama pripreme pokusa (bušenja centralne bušotine i rezanja proreza) i tijekom samog ispitivanja. Naprezanje kod kojeg se zabilježi nulti razmak repera je tzv. "cancellation pressure" i predstavlja informaciju o stanju naprezanja stijenske mase u zoni pokusa (Kavur 2000).

Potreba bušenja centralne bušotine uvjetovana je tehnologijom rezanja proreza. Za vrijeme rezanja u nju ulazi nosač pile s hidrauličkim motorom. Jezgra koja se dobije iz centralne bušotine omogućava detaljan uvid u stanje stijenske mase. Dubina bušotine je kod pokusa s jednim aktivnim prorezom bila 1.8 m, a kod pokusa sa jednim aktivnim i dva pasivna proreza 2 m. Promjer bušotine od 250 mm omogućava vizualni pregled njenih stijenki (slika 15).

Aktivnosti bušenja i rezanja odvijale su se sljedećim redoslijedom:

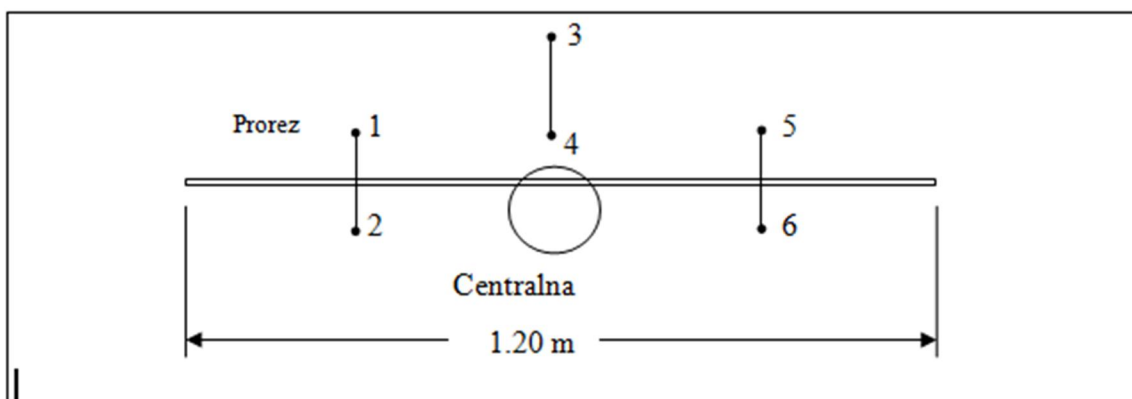
- (a) Nulto očitavanje međusobnog razmaka repera;
- (b) Bušenje bušotine i rezanje prvog pasivnog proreza;
- (c) Bušenje bušotine i rezanje drugog pasivnog proreza;
- (d) Bušenje bušotine i rezanje aktivnog proreza;

Čišćenje aktivnih proreza od komadića stijene ili pukotinske ispune koja je ispala nakon izvlačenja pile (Kavur 2000).



Slika 15. Fotografija stijenki bušotine (vidi se izrezani prorez)

Rezanje proreza ostvareno je sukcesivnim povećavanjem promjera pile (600, 900 i 1200 mm) kako bi se uspjelo dobiti zahtijevanu dubinu proreza.



Slika 16. Raspored repera u zoni aktivnog proreza

Slika 17 prikazuje dispoziciju opreme za bušenje centralne bušotine, a slike 18 i 19 dvije faze rezanja tri proreza za pokus sa jednim aktivnim i dva pasivna proreza na projektu Karun 3.



Slika 17. Bušenje centralne bušotine za horizontalni pokus (Karun 3, 1993)



Slika 18. Rezanje lijevog pasivnog proreza. Vide se reperi za mjerenje pomaka u zoni aktivnog proreza (Karun 3, 1993).



Slika 19. Rezanje srednjeg (aktivnog) proreza. Pasivni prorezi su izrezani. Vide se i reperi za mjerenje pomaka na površini iskopa (Karun 3, 1993).

Nakon završetka rezanja svih proreza i čišćenja aktivnog proreza pristupa se ugradnji jastuka (slika 20). Nakon završetka rezanja jastuk se mora što prije ugraditi kako bi se izbjeglo eventualno zatvaranje proreza. Nakon ugradnje, jastuk se pumpanjem, pažljivo napuni s uljem tako da se stijenske jastuka priljube uz stijenke proreza. Pri tome treba paziti da se jastuk ne deformira u području otvorene centralne bušotine. Također, treba paziti da se zrak iz jastuka u potpunosti istisne uljem. Nakon toga centralna bušotina se zapunjava cementnim mortom (Kavur 2000).

Preporuke ISRM-a (1986) ne predviđaju injektiranje uske zone oko jastuka. Međutim, praksa pokazuje da samo u izuzetnim situacijama stijenska masa ne sadrži diskontinuitete i šupljine koji mogu prouzročiti rano pucanje jastuka već pri malom opterećenju. Uostalom, deformabilnost stijenske mase bez diskontinuiteta može se odrediti i na mnogo prikladniji način u laboratoriju (intaktni materijal) (Kavur 2000).

Injektiranje zone oko jastuka vršeno je cementnim mlijekom uz pomoć ručne pumpe s vrlo malim tlakom (maksimalno 0,5 bar) i malom količinom smjese (do 5 lit). Injektiranjem je potrebno zapuniti samo otvorene diskontinuitete u zoni jastuka i to u dubini od nekoliko cm. Injektiranjem proreza pod većim tlakom i većom količinom smjese izvršila bi se konsolidacija

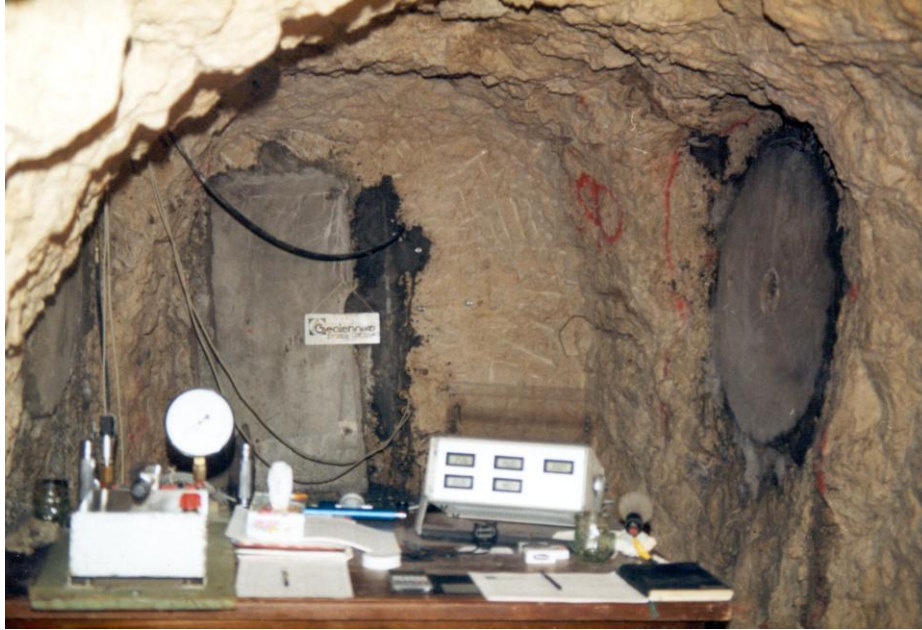
stijenske mase što bi utjecalo na rezultat mjerenja. Za vrijeme injektiranja na mjernom instrumentu su praćene promjene svakog od LVDT senzora ugrađenih u jastuku. Pokus je počinjao tri dana nakon injektiranja proreza (Kavur 2000).



Slika 20. Ugradnja jastuka u vertikalni prorez (Godar-E-Landar, 1992)



Slika 21. Mjerenje razmaka repera na površini iskopa u zoni aktivnog proreza (Karun 3, 1993)



Slika 22. Tlačni jastuk u čelu niše postavljen paralelno sa slojevima. Vide se obrađene površine za pokus pločom (Karun 3, 1993)

Svaki od izvedenih pokusa planiran je sa šest ciklusa opterećenja i rasterećenja. Kod prva tri ciklusa opterećenje se povećavalo i smanjivalo u inkrementima od po 0,2 MPa s čitanjem mjernih uređaja u 1, 2 i 4 minute svakog inkrementa. U posljednja tri ciklusa inkrement opterećenja iznosio je 0,5 MPa, a očitavanje je obavljano u istim vremenskim intervalima kao i kod prva tri ciklusa.. Maksimalno i minimalno opterećenje u prvih 5 ciklusa održavano je stalnim tijekom 2 sata, dok je maksimum šestog ciklusa održavan najmanje 4 odnosno 12 sati u slučaju tzv pokusa tečenja (“creep test”) (Kavur 2000).

Očitavanje mjernih uređaja kod maksimalnih i minimalnih opterećenja u jednom ciklusu obavljano je u 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 180, 240,...minuti. U slučaju da u posljednjem satu maksimalnog odnosno minimalnog opterećenja prirast pomaka bude veći od 0,003 mm, mjerenje je produljeno za jedan sat sve dok prirast nije bio manji od 0,003 mm/sat. Neki od pokusa bili su tzv “failure test” kod kojih je nakon šestog ciklusa opterećenje povećavano u inkrementima od 0.5 MPa sve do sloma stijene ili pucanja jastuka (Kavur 2000).

Moduli deformabilnosti izračunati su prema preporukama ISRM-a (1986). Kod pokusa tip “A”, dimenzije proreza su za nekoliko mm veće od dimenzija jastuka što znači da nije izvedena zaštitna zona. Vlačna pukotina se može, ali i ne mora svaki put pojaviti.

Na otvaranje vlačne pukotine ukazivali su sljedeći pokazatelji:

- (a) trenutna promjena nagiba krivulje “naprezanje-pomak”;
- (b) pojava vlačne pukotine na površini stijene;
- (c) zvučni efekti u trenutku loma stijene;
- (d) dostignuto opterećenje kod kojeg su reperi na površini stijenske mase došli na nulti razmak, na kojem su bili prije rezanja proreza (tzv. “cancellation pressure”).

U slučajevima kada je ocijenjeno da se pukotina nije stvorila, koeficijenti k_i izabrani su iz tablice 1 (ISRM 1986) za dubinu vlačne pukotine $h = 0$ m ($k_i = 131.4$ odnosno 136.8).

U slučajevima kada je ocijenjeno da je tijekom pokusa nastala vlačna pukotina primjenjen je sljedeći postupak:

- Do trenutka otvaranja pukotine moduli su izračunati uz pretpostavku da je dubina vlačne pukotine jednaka nuli.
- Nakon otvaranja pukotine moduli su određeni s izračunatom vrijednošću dubine vlačne pukotine.

Dubina vlačne pukotine izračunata je u skladu s preporukama ISRM (1986) uz pretpostavku poznavanja inicijalnog naprezanja stijenske mase i njene vlačne čvrstoće. Inicijalno naprezanje poistovjećeno je s tzv. “*cancellation pressure*” koji je ustanovljen tijekom pokusa praćenjem promjene razmaka repera ugrađenih na površini iskopa u zoni proreza. Vlačna čvrstoća

stijenske mase je procjenjena. Pri tome se vodilo računa o gustoći i položaju diskontinuiteta dotične mikrolokacije (Kavur 2000).

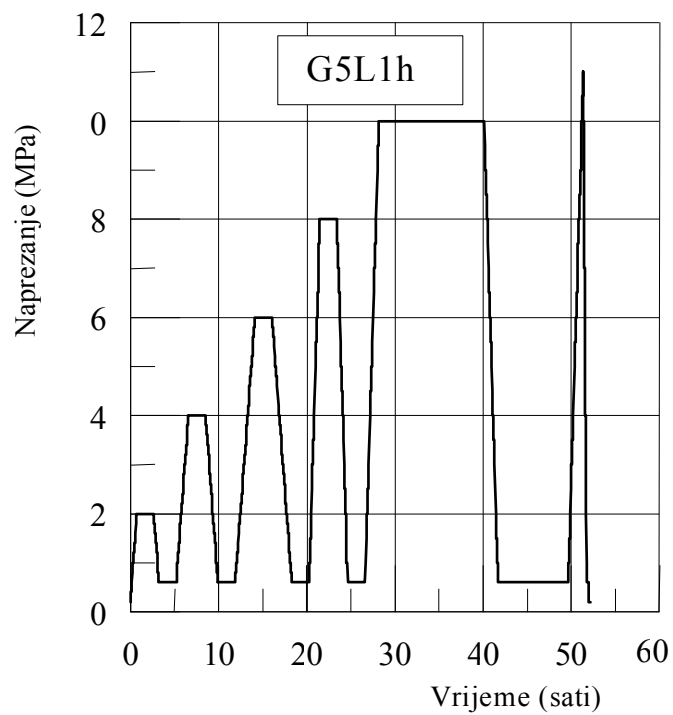
Kod pokusa tipa “B” izvedena je zaštitna zona sa svake strane jastuka širine 1.2 m i u dubinu od 0.6 m. Dubina zaštitne zone od 0.6 m kod ELFJ (širina jastuka od 1.2 m) odgovara dubini zaštitne zone od 0.5 m kod LFJ (širina jastuka od 1 m). Prema tome, moduli su izračunati s vrijednostima koeficijenta k_i od 190.4 i 192.3 (vidi tablicu 1).

Kod pokusa tipa “C” usvojena je pretpostavka da dubina zaštitne zone od 0.6 m odgovara dubini vlačne pukotine od 0.5 m, te su moduli izračunati sa sljedećim vrijednostima koeficijenata k_i : 187.2; 190.1; 188.6; i 191.7 (vidi tablicu 1).

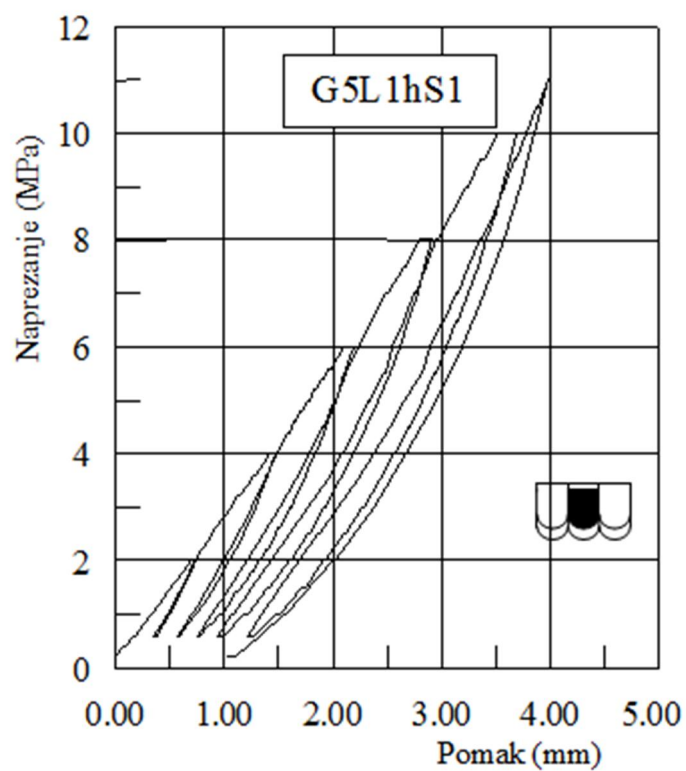
Rezultati LFJ pokusa su prikazivani grafički na način pokazan na slikama 23, 24 i 25. Na slici 23.a prikazan je vremenski tijek pokusa G5L1h ili L4H (oznaka u tablicama usporedbi s LFJ rezultatima), a na slikama 23.b-e prikazane su krivulje “naprezanje-pomak” za svaki od senzora u jastuku.

Tijekom provedenih ispitivanja postignuto je maksimalno naprezanje od 16 MPa, što odgovara sili od 26 400 kN.

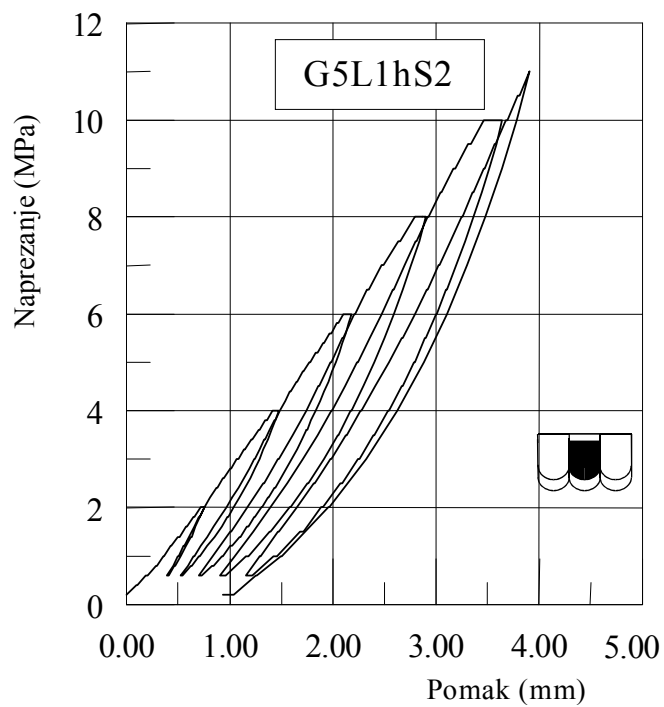
Na projektu Karun 3 LFJ ispitivanja su provedena u laporu i vapnencima različitih kategorija po RMR klasifikaciji (Kavur 2000).



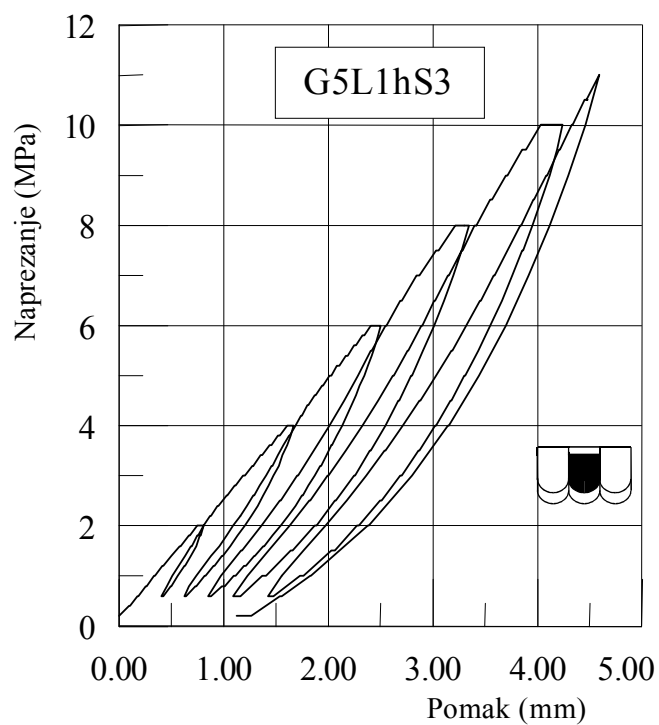
Slika 23.a) Vremenski tijek pokusa tlačnim jastukom G5L1h (Karun 3, 1993)



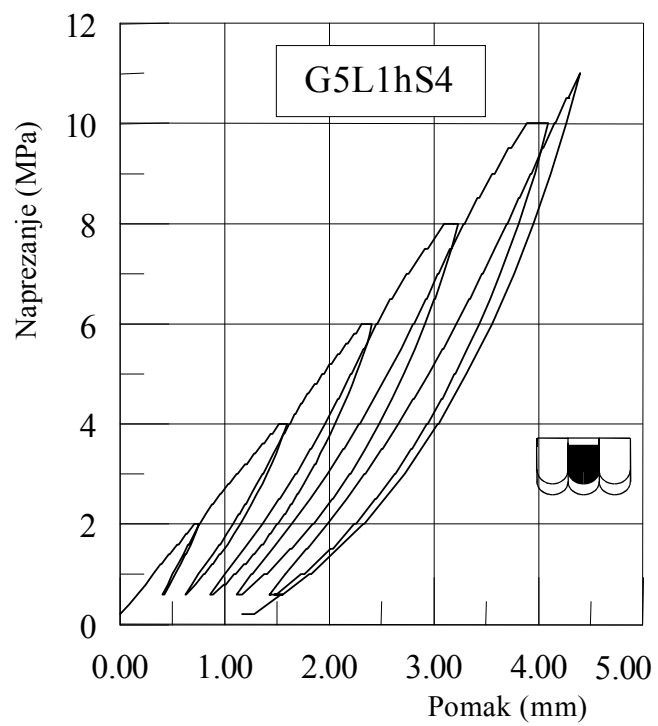
Slika 23.b) Krivulja “naprezanje-pomak” pokusa G5L1H za senzor 1 (Karun 3, 1993)



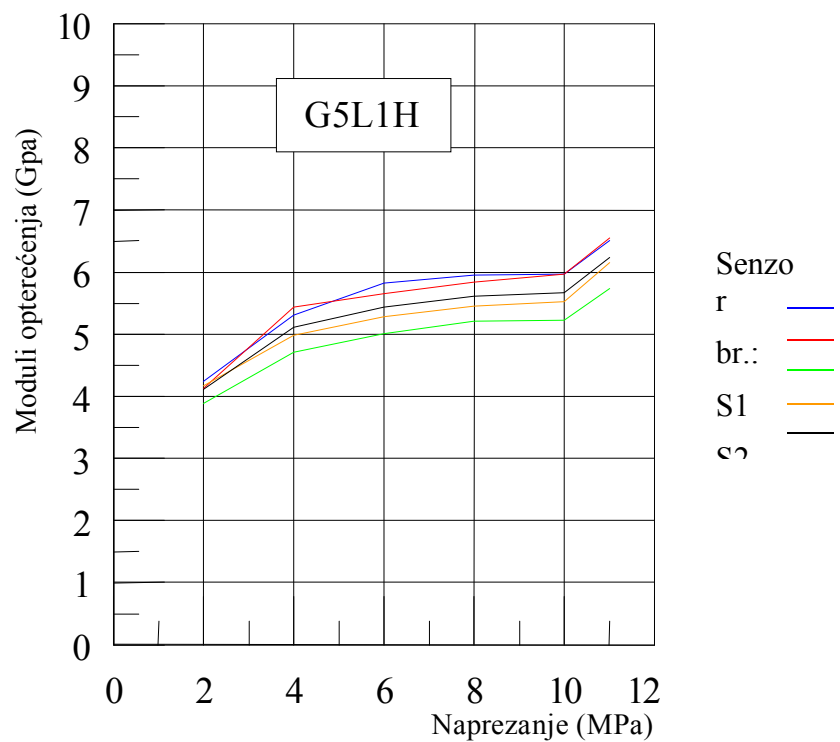
Slika 23.c) Krivulja “naprezanje-pomak” pokusa G5L1H za senzor 2 (Karun 3, 1993)



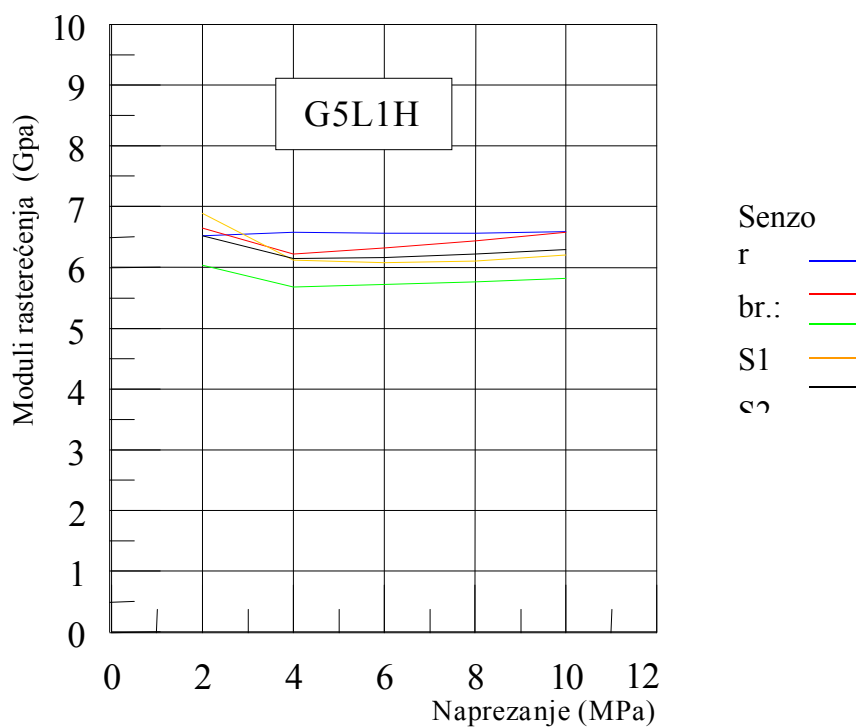
Slika 23.d) Krivulja “naprezanje-pomak” pokusa G5L1H za senzor 3 (Karun 3, 1993)



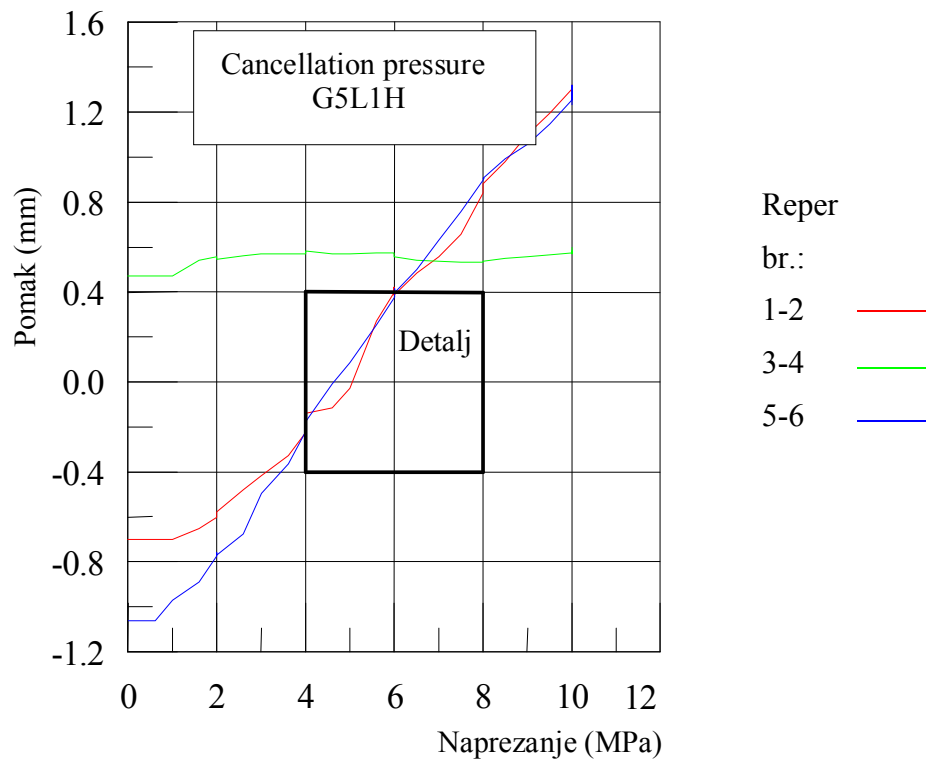
Slika 23.e) Krivulja “naprezanje-pomak” pokusa G5L1H za senzor 4 (Karun 3, 1993)



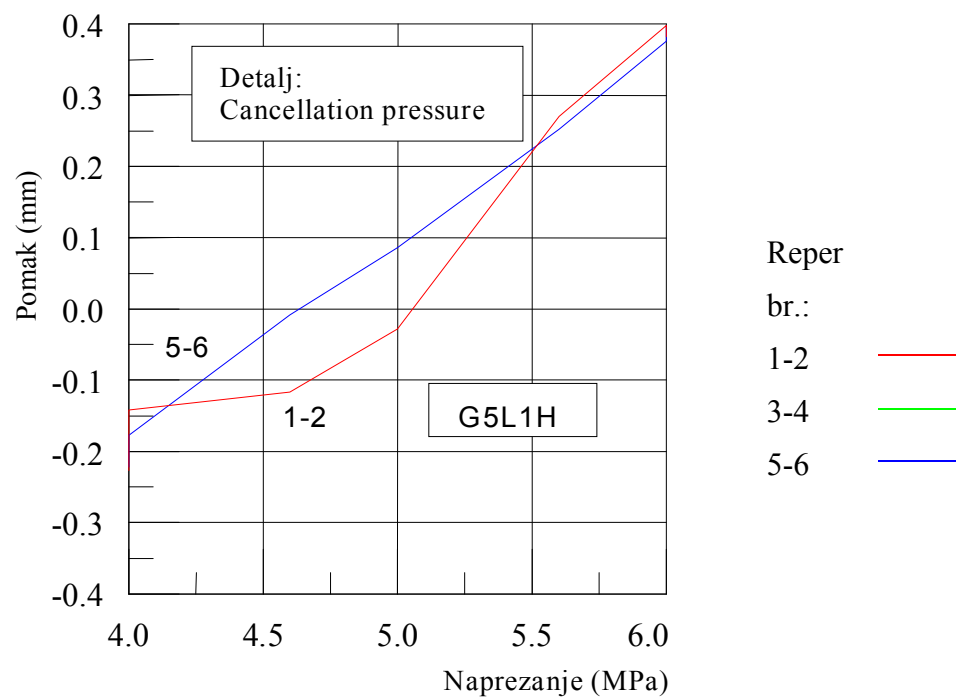
Slika 24.a) Moduli deformabilnosti u opterećenju u zavisnosti od razine naprezanja u pokusu (pokus G5L1H, Karun 3, 1993)



Slika 24.b) Moduli deformabilnosti u rasterećenju u zavisnosti od razine naprezanja u pokusu (pokus G5L1H, Karun 3, 1993)



Slika 25.a) “Canellation pressure” u pokusu G5L1H (Karun 3, 1993)



Slika 25.b) “Canellation pressure” dostignut na reperima 1-2 i 5-6

4. Usporedba LFJ i reinterpretiranih PJT rezultata

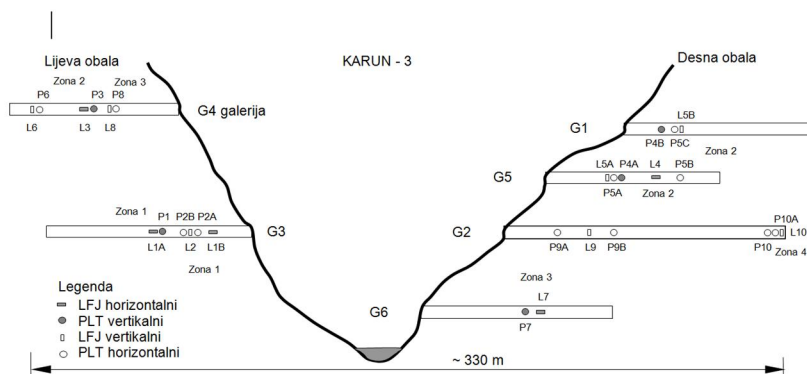
4.1. Usporedba PJT i LFJ rezultata

Pokusi opterećenja pločom (PJT) i velikim tlačnim jastukom (LFJ) na projektu Karun 3 obavljani su tako da su sve značajnije ispitne lokacije na pregradnom mjestu pokrivena s obje metode pri čemu se nastojalo da u najvećem dijelu istražnog programa bude omogućena usporedba rezultata ovih ispitivanja (Kavur i sur. 2015).

Pokusi opterećenja pločom su izvršeni na ukupno 22 ispitne lokacije unutar istraţnih galerija u lijevom i desnom boku brane, a pokusi velikim tlačnim jastukom na ukupno 12 ispitnih lokacija.

Usporedba PJT i LFJ rezultata omogućena je na ukupno 10 lokacija odnosno 10 grupa pokusa u koje je ukupno uključeno 16 dvostrukih PJT (32 pokusa) i 12 LFJ pokusa. Na svakoj od usporedbenih lokacija uključen je određeni broj PJT i LFJ pokusa koji su obavljani sa istim smjerom opterećenja na bliskim mikrolokacijama odnosno u relativno malom prostoru sa sličnim geološkim uvjetima ispitivane stijenske mase. Tako npr. u prvoj grupi pokusa nalaze se dva LFJ-a (L1AH i L1BH), oba s horizontalno orijentiranim jastukom (vertikalno nanošenje opterećenja), koji se uspoređuju s vertikalnim PJT pokusom (P1V) koji je izvršen na lokaciji udaljenoj 2 m od L1AH i 15 m od L1BH. U drugoj grupi, pokus L2V s vertikalno orijentiranim jastukom (horizontalno nanošenje opterećenja) uspoređuje se s dva horizontalno orijentirana PJT-a (P2AH i P2BH).

Poloţaji svih pokusa uključenih u usporedbu prikazani su na slici 26 kao projekcije na poprečni presjek pregradnog mjesta brane.



Slika 26. Poprečni presjek pregradnog mjesta brane Karun 3

Devet grupa pokusa je obavljeno u Asmari vapnencima. Te grupe su podijeljene u tri zone ovisno o deformabilnosti određene LFJ pokusima kao i različitom stupnju raspucalosti i trošenja stijenske mase. Kvaliteta stijene na svakoj od ispitnih lokacija je ocijenjena korištenjem RMR sustava (Bieniawski 1989). Najveće vrijednosti modula (manja deformabilnost) su izmjerene u Zoni 1 u kojoj su izvršene prve dvije grupe pokusa (1 i 2). Zona 1 se nalazi u donjem dijelu lijevog boka brane gdje je smještena istražna galerija G3. Zona 2 pokriva najveći dio pregradnog mjesta uključujući gornje dijelove lijevog (G4) i desnog boka (G1 i G5). U njoj su obavljene četiri grupe pokusa (3, 4, 5 i 6). Zona 3 uključuje tri manje lokacije: jednu u dijelu galerije G4 (grupa 8) i dvije u donjim dijelovima desnog boka unutar galerija G6 (grupa 7) i G2 (grupa 9), gdje je karbonatna stijenska masa jače izlomljena, trošna i karstificirana. Zona 4 nalazi se u laporima Pabdeh formacije kroz koju prolaze tri dovodna tunela za podzemnu strojarnicu K3. Zona 4 uključuje grupu pokusa 10.

4.2. Reinterpretacija PJT pokusa

PJT pokusi su u ovom radu reinterpetirani pretpostavljajući opterećenje beskonačnog elastičnog poluprostora fleksibilnom kružnom pločom. Ova pretpostavka podrazumijeva jednoliko naprezanje ispod ploče. Treba naglasiti da su u predmetnim PJT pokusima korištene tzv. "krute" ploče jer nije primjenjen tlačni jastuk na kontaktu između ploče i stijene. Za takve uvjete je logično koristiti rješenje teorije elastičnosti za idealno krute ploče kao u studiji Kavur i sur. 2015. Rješenje idealno krute ploče podrazumijeva jednolik pomak elastičnog medija ispod ploče.

Nažalost, obje pretpostavke (fleksibilne i krute ploče) ne zadovoljavaju stvarno stanje naprezanja i pomaka u pokusu opterećenja pločom tako da je moguće primjeniti oba rješenja. Ovdje će se namjerno primjeniti rješenje za fleksibilnu ploču kako bi se tako interpretirani rezultati usporedili s LFJ rezultatima te provjerila primjenjivost metode najmanjih kvadrata na uvjetno rečeno „krutu“ ploču.

Za reinterpretaciju PJT pokusa je dakle primjenjena metoda najmanjih kvadrata (vidi poglavlje 2.2) za fleksibilnu ploču koju je predložio Boyle (1992), a korigirao i razradio Unal

(1997). Unal (1997) je predložio definiranje tri različita modula deformabilnosti na temelju PJT podataka i to:

- a) Ukupnog modula (E_{mOA}) koji karakterizira deformabilnost cjelokupne stijenske mase uključene u pokus. Ukupni modul se računa metodom najmanjih kvadrata uzimajući u obzir pomake svih ili samo odabranih (minimalno dvije točke) mjernih točki (z_i) po dubini ispitivane stijenske mase.
- b) Instant modula (E_{mzi}) koji se može izračunati za bilo koju mjernu točku (z_i) u kojoj je izmjeren pomak tijekom pokusa.
- c) Intervalnog modula (E_{mzij}) koji se može izračunati za interval stijenske mase omeđen dvjema mjernim točkama (z_i i z_j) u kojima su izmjereni pomaci tijekom pokusa.

Navedeni moduli su računati iz krivulja naprežanje-pomak u posljednjim ciklusima opterećenja (L) i rasterećenja (U) u svakom PJT pokusu uz pretpostavljenu vrijednost Poissonovog koeficijenta 0,3. U Zoni 3 moduli su računati za niže raspone opterećenja koji su odgovarali ciklusima postignutim u LFJ pokusima. Tako reinterpretirani moduli su prikazani u tablicama 3,4,5,6.

Tablica 3. PJT i LFJ moduli u Zoni 1

Grupa	RMR	PJT	Ploča	Tip modula	PJT - Moduli deformabilnosti (GPa)								LFJ	RMR	Tip modula	LFJ E _m (GPa)					
					E _{m0A1}	E _{m0A2}	E _{m0A1r}	E _{mz1}	E _{mz2}	E _{mz3}	E _{mz24}	E _{mz24r}									
1	62	P1V	P1	L	51,1	14,0	10,2	8,7	31,2	/	19,0	7,6	L1AH	62	L	16,6					
				U	96,8	21,1	19,4	12,8	56,1	/	34,1	13,6			U	17,4					
			P2	L	46,9	20,3	9,4	13,7	43,3	43,4	31,6	12,6	L1BH	62	L	12,8					
				U	112,3	29,7	22,5	18,4	86,6	139,0	52,7	21,1			U	13,3					
2	57	P2AH	P1	L	118,1	26,2	23,6	16,0	98,6	136,9	60,0	24,0	L2V	57,0	L	8,1					
				U	/	37,1		20,8	/	/	/										
			P2	L	15,2	6,3	3,0	4,9	8,1	15,5	7,4	3,0									
				U	31,9	18,1	6,4	13,4	29,9	36,1	27,6	11,0									
	57	P2BH	P1	L	20,0	12,1	4,0	9,2	17,3	21,7	12,2	4,9					L2V	57,0	U	8,9	
				U	38,9	17,5	7,8	12,1	28,9	61,1	18,3	7,3									
			P2	L	5,4	5,1	1,1	4,8	4,9	5,2	3,5	1,4									
				U	6,2	5,9	1,2	5,6	5,7	5,8	4,0	1,6									
Svi pokusi - prosječni modul:					49,3	17,8	9,9	11,7	37,3	51,6	24,6	9,8				12,8					
PJT / LFJ omjer modula:					3,8	1,4	0,8	0,9	2,9	4,0	1,9	0,8									
Vertikalni smjer - prosječni modul:					76,8	21,3	15,4	13,4	54,3	91,2	34,4	13,7									15,0
PJT / LFJ omjer modula:					5,1	1,4	1,0	0,9	3,6	6,1	2,3	0,9									
Horizontalni smjer - omjer modula:					33,7	16,0	6,7	10,9	27,6	40,3	19,0	7,6					8,5				
PJT / LFJ omjer modula:					4,0	1,9	0,8	1,3	3,3	4,8	2,2	0,9									

Tablica 4. PJT i LFJ moduli u Zoni 2

Grupa	RMR	PJT	Ploča	Tip modula	PJT - Moduli deformabilnosti (GPa)								LFJ	RMR	Tip modula	LFJ E _m (GPa)
					E _{m0A1}	E _{m0A2}	E _{m0A1r}	E _{mz1}	E _{mz2}	E _{mz3}	E _{mz24}	E _{mz24r}				
3	56	P3V	P1	L	8,8	8,1	1,8	7,7	7,3	10,1	5,2	2,1	L3H	56	L U	7,0
				U	9,6	9,1	1,9	8,8	8,0	10,8	5,6	2,2				7,2
	52	P4AV	P1	L	95,0	9,5	19,0	5,5	59,6	51,9	31,1	12,4	L4H	52	L U	5,9
				U	105,6	12,3	21,1	7,0	86,6	86,1	45,3	18,1				
	52	P4BV	P1	L	8,8	7,8	1,8	7,1	8,7	8,1	8,0	3,2	L4H	52	L U	5,9
				U	9,6	8,9	1,9	8,5	9,3	8,9	8,3	3,3				
	51	P5AH	P1	L	17,0	11,3	3,4	8,8	16,6	12,9	10,1	4,0	L5AV	51	L U	5,4
				U	23,3	14,2	4,7	10,7	26,0	14,9	15,8	6,3				
	51	P5BH	P1	L	16,9	12,2	3,4	9,7	15,8	12,9	10,3	4,1	L5AV	51	L U	5,4
				U	23,8	16,2	4,8	12,5	21,2	17,8	11,6	4,6				
	51	P5CH	P1	L	8,1	7,1	1,6	6,5	7,7	8,1	7,7	3,1	L5BV	51	L U	5,1
				U	11,0	9,2	2,2	8,1	10,5	11,1	10,6	4,2				
	51	P5CH	P2	L	25,7	22,0	5,1	19,7	20,0	36,1	13,2	5,3	L5BV	51	L U	5,1
				U	29,6	26,2	5,9	23,9	22,2	45,1	14,4	5,8				
6	47	P6H	P1	L	16,0	9,4	3,2	7,4	10,1	97,8	6,6	2,6	L6V	47	L U	4,5
				U	20,2	11,7	4,0	9,1	11,9	/	7,0	2,8				4,9
			P2	L	28,8	15,5	5,8	11,2	17,8	/	11,3	4,5	L6V	47	L U	4,9
				U	35,4	19,2	7,1	14,0	21,1	/	12,8	5,1				4,5
Svi pokusi - prosječni modul:					26,8	13,3	5,4	10,5	22,1	27,2	15,4	6,2				5,8
PJT / LFJ omjer modula:					4,6	2,3	0,9	1,8	3,8	4,7	2,7	1,1				
Vertikalni smjer - prosječni modul:					32,5	11,3	6,5	8,7	26,8	27,1	19,2	7,7				6,6
PJT / LFJ omjer modula:					4,9	1,7	1,0	1,3	4,1	4,1	2,9	1,2				
Horizontalni smjer - omjer modula:					22,6	14,7	4,5	11,7	18,5	27,3	12,6	5,0				5,3
PJT / LFJ omjer modula:					4,3	2,8	0,9	2,2	3,5	5,2	2,4	1,0				

Tablica 5. PJT i LFJ moduli u Zoni 3

Grupa	RMR	PJT	Ploča	Tip modula	PJT - Moduli deformabilnosti (GPa)								LFJ	RMR	Tip modula	LFJ E _m (GPa)
					E _{m0A1}	E _{m0A2}	E _{m0A1r}	E _{mz1}	E _{mz2}	E _{mz3}	E _{mz24}	E _{mz24r}				
7	39	P7V	P1	L	13,4	12,2	2,7	11,5	12,0	13,2	8,7	3,5	L7H	39	L	2,2
				U	14,9	12,9	3,0	11,6	12,8	15,1	8,5	3,4				2,3
			P2	L	4,8	4,9	1,0	5,1	4,4	4,0	2,9	1,2			U	2,3
				U	5,7	5,9	1,1	6,1	5,3	4,6	3,4	1,4				
8	32	P8H	P1	L	8,8	5,0	1,8	3,7	7,0	11,9	4,8	1,9	L8V	32	L	0,8
				U	10,7	5,6	2,1	4,1	7,9	15,7	4,8	1,9				0,9
			P2	L	3,6	2,8	0,7	2,4	2,8	4,8	1,9	0,8			U	0,9
				U	3,9	3,0	0,8	2,6	3,1	5,1	2,1	0,8				
9	33	P9AH	P1	L	5,6	5,7	1,1	5,8	4,8	5,6	3,1	1,2	L9V	33	L	1,5
				U	5,9	5,9	1,2	5,8	5,3	5,6	3,4	1,4				1,7
	P2	L	9,0	9,3	1,8	9,5	8,6	7,0	5,4	2,2						
		U	10,1	10,4	2,0	10,7	9,4	8,1	5,7	2,3						
33	P9BH	P1	L	7,2	6,0	1,4	5,2	5,7	13,6	4,5	1,8			U	1,7	
			U	8,7	7,1	1,7	6,2	6,9	16,4	5,3	2,1					
			P2	L	9,5	7,7	1,9	6,7	8,1	10,6	5,8	2,3			U	1,7
				U	18,8	14,6	3,8	12,4	15,3	21,7	9,6	3,8				
Svi pokusi - prosječni modul:					8,8	7,4	1,8	6,8	7,5	10,2	5,0	2,0				1,6
PJT / LFJ omjer modula:					5,6	4,7	1,1	4,3	4,7	6,5	3,2	1,3				
Vertikalni smjer - prosječni modul:					9,7	9,0	1,9	8,6	8,6	9,2	5,9	2,4				2,3
PJT / LFJ omjer modula:					4,3	4,0	0,9	3,8	3,8	4,1	2,6	1,0				
Horizontalni smjer - omjer modula:					8,5	6,9	1,7	6,3	7,1	10,5	4,7	1,9				1,2
PJT / LFJ omjer modula:					6,9	5,6	1,4	5,1	5,8	8,6	3,8	1,5				

Tablica 6. PJT i LFJ moduli u Zoni 4

Grupa	RMR	PJT	Ploča	Tip modula	PJT - Moduli deformabilnosti (GPa)								LFJ	RMR	Tip modula	LFJ E _m (GPa)
					E _{m0A1}	E _{m0A2}	E _{m0A1r}	E _{mz1}	E _{mz2}	E _{mz3}	E _{mz24}	E _{mz24r}				
10	45	P10H	P1	L	25,0	7,9	5,0	4,9	36,8	17,8	22,4	9,0	L10V	45	L	11,9
				U	123,6	14,3	24,7	8,3	/	35,6	/					13,3
	P2	L	/	10,4		5,9	/	93,8	/							
		U	/	13,9		7,6	/	93,8	/							
45	P10AH	P1	L	32,1	21,6	6,4	17,1	30,2	25,6	18,4	7,4			U	13,3	
			U	58,8	33,8	11,8	25,2	55,3	46,3	33,6	13,4					
			P2	L	51,9	25,5	10,4	18,0	47,2	45,6	30,8	12,3			U	13,3
				U	93,9	52,1	18,8	38,2	73,7	112,6	44,8	17,9				
Svi pokusi - prosječni modul:					64,2	22,4	12,8	15,7	48,6	58,9	30,0	12,0				12,6
PJT / LFJ omjer modula:					5,1	1,8	1,0	1,2	3,9	4,7	2,4	1,0				

Reinterpretirani i tablično prikazani su slijedeći moduli:

E_{mOA1} – ukupni modul izračunat korištenjem pomaka izmjerenih u mjernim točkama z_2, z_3, z_4 i z_5 (bez pomaka mjenog na površini stijene z_1 odnosno na ploči);

E_{mOA2} – ukupni modul izračunat korištenjem svih mjerenih pomaka (z_1 do z_5);

E_{mOA1r} – ukupni modul E_{mOA1} reduciran faktorom $R_f = 5$;

E_{mz1} – instant modul računat za mjernu točku z_1 na površini stijene;

E_{mz2} – instant modul računat za mjernu točku z_2 na prvoj točki ekstenzometra;

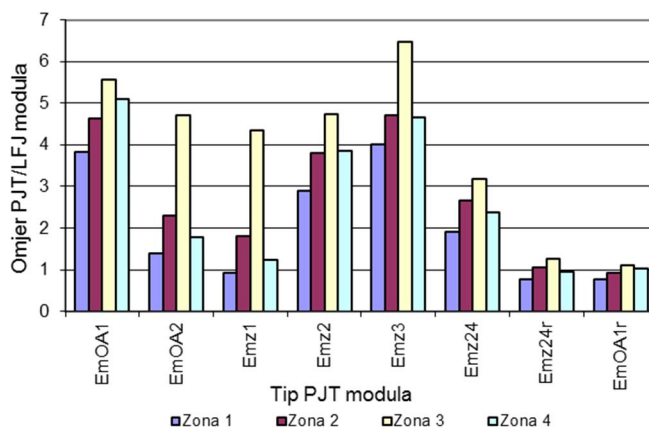
E_{mz3} – instant modul računat za mjernu točku z_3 na drugoj točki ekstenzometra;

E_{mz24} – intervalni modul računat za stijenu između mjernih točki z_2 i z_4 ;

E_{mz24r} – intervalni modul E_{mz24} reduciran faktorom $R_f = 2,5$.

Da bi se omogućila usporedba PJT i LFJ rezultata, LFJ moduli (E_m) su izračunati iz ciklusa opterećenja (L) i rasterećenja (U) (vidi poglavlja 2.3 i 3.3). U Zoni 3 gdje je stijenska masa bila jače deformabilna, maksimalna naprezanja u LFJ pokusu (1,8-7 MPa) su se morala prilagoditi mogućnostima mjerenja deformacije (otvaranje proreza) odnosno pomaka s ugrađenim osjetilima (maksimalni mjerni opseg 6-7 mm). Izračunati LFJ moduli su prikazani u tablicama 3,4,5,6 u odgovarajućim grupama pokraj PJT podataka pokusa.

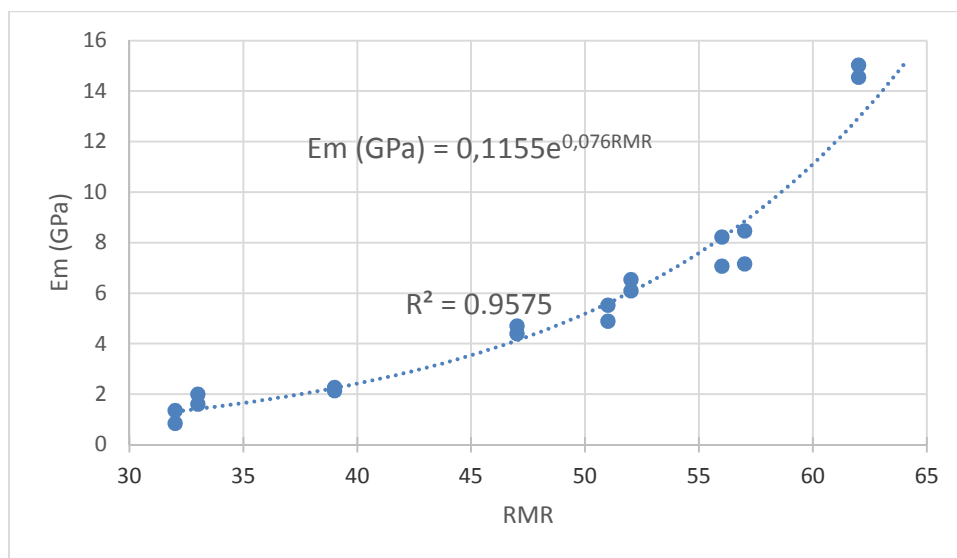
Omjeri PJT/LFJ modula određeni iz prosječnih vrijednosti za svaki tip PJT modula i LFJ modul su isto prikazani u tablicama 3,4,5,6. Omjeri PJT/LFJ modula su prikazani i stupčastim dijagramom na slici 27.



Slika 27. Omjeri PJT/LFJ modula

4.3. Indirektna procjena deformabilnosti stijenske mase

Na temelju prosječnih vrijednosti LFJ modula kao i reduciranih PJT modula (E_{mOA1r} i E_{mz24r}) interpretiranih u ciklusima opterećenja i rasterećenja (prikazani u tablicama 3,4,5,6 te kvalitete stijenske mase prema RMR-u, utvrđena je korelacija (slika 28.) za indirektnu procjenu deformabilnosti karbonatne stijenske mase.



Slika 28. Indirektna procjena deformabilnosti vapnenačke stijenske mase na temelju RMR-a

5. Zaključak

Određivanje deformabilnosti stijenske mase in situ pokusima predstavlja vrlo zahtjevan inženjerski zadatak.

Pokus opterećenja pločom (PJT) je najčešće korišten u praksi od velikih in situ pokusa zbog toga što je relativno jednostavan za izvođenje, cijena opreme je pristupačna i najjeftiniji je od velikih in situ pokusa. Treba i naglasiti da je kod ovog pokusa problematična interpretacija rezultata korištenjem zatvorenih rješenja teorije elastičnosti i zona ispitivanja je poremećena iskopom podzemne prostorije.

Pokus velikim tlačnim jastukom (LFJ) se preporuča zbog: minimalnih poremećaja stijenske mase u zoni ispitivanja, opterećenja velikog volumena stijenske mase, mogućnosti postizanja visokih opterećenja te mjerenja sekundarnih naprezanja u stijenskoj masi. Treba naglasiti da i ova metoda ima nedostatke kao što su visoka cijena opreme, pripreme i ispitivanja te potreba zaštite jastuka u zoni otvorenih pukotina.

Rezultati ovog rada su pokazali mogućnost uspješne interpretacije PJT pokusa obavljenih krutim pločama primjenom rješenja za fleksibilni tip ploče i metode najmanjih kvadrata. Usporedba interpretiranih PJT i LFJ rezultata u istoj stijenskoj masi pokazala je da su PJT moduli u prosjeku 4 do 5 puta veći od istih iz LFJ pokusa, ali su u dobroj korelaciji s istima ako se podaci dobiveni na površini stijenske mase eliminiraju iz proračuna PJT modula. PJT module treba interpretirati isključivo u neporemećenoj stijenskoj masi tj. u intervalu dubine od 0,5 do 1,5 promjera ploče (Kavur i sur. 2015).

Korištenjem interpretiranih PJT i LFJ modula i rezultata klasifikacije stijenske mase po RMR-u dobivena je dobra korelacija za indirektnu procjenu deformabilnosti vapnenačke stijenske mase.

6. Literatura

- Bieniawski, Z.T. (1978). Determining rock mass deformability: Experience from case histories. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr.* 15, pp. 237–247.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.
- Bock, H., (1991), *Geo - Instrumentation, and In Situ Testing of Rock*, *Interfels News*, No. 5., 1991, pp. 1-8.
- Boyle, W.J. (1992). Interpretation of plate load test data. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr.* 29(2), pp.133–142.
- Franklin J.A., Dusseault, M.B., (1989), *Rock Engineering*, McGraw-Hill Publishing Company, 600 p. (pp. 281-285).
- Goodman, R.E., (1980), *Introduction to Rock Mechanics*, Wiley, New York, pp. 183-184.
- Hoek, E., Diederichs, M.S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *Int J Rock Mech Min Sci.* 43, pp. 203–215.
- ISRM. (1979). Suggested methods for determining in situ deformability of rock. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr.* 16(3). pp.195–214.
- ISRM. (1986). Suggested method for deformability determination using a large flat jack technique. *Int J Rock Mech Min Sci.* 23(2), pp. 131–140.
- Ghazvinian, A.H. (2004). A review of geotechnical investigations of Karun 3 HEPP. *Proc. of the 5th Int. Conf. on Ground improvement techniques*. Malaysia, pp. 55–64.
- Kavur, B., Štambuk Cvitanović, N., Hrženjak, P. (2015). Comparison between plate jacking and large flat jack test results of rock mass deformation modulus. *Int J Rock Mech Min Sci.* 73, pp. 102-114.

- Kavur B. (2000). Ocjena i korelacija ispitivanja deformabilnosti stijenske mase in situ pokusima i drugim postupcima. Magistarski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- Kavur, B., Vrkljan, I., Štambuk Cvitanović, N., Kesić, S. (2006). Ispitivanje deformabilnosti stijenske mase pločom. 4. savjetovanje Hrvatskog geotehničkog društva, Opatija.
- Kujundžić. B., (1954), Prilog eksperimentalnom određivanju modula elastičnosti stene in -situ, Naše Građevinarstvo, br. 8.
- LNEC, (1976), Determinacao do modulo de deformabilidade dos macicos rochosos por meio de macacos planos de granda area, Proc. 45/13/3439.
- Lama, R.D., Vutukuri, V.S., (1978), Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Vol. 3., Trans Tech Publications, 406 p. (pp. 83 - 115).
- Unal, E. (1997). Determination of in situ deformation modulus: New approaches for plate-loading tests. Int J Rock Mech Min Sci. 34(6), pp. 897–915.
- Vrkljan, I., Kavur, B., Fifer-Bizjak, K. (2006). Dilatometarska ispitivanja u inženjerskoj mehanici stijena. Građevinar 58 (3), pp. 187-197.
- Vrkljan, I., Kavur, B. (2006). Ispitivanje deformabilnosti stijenske mase tlačnim jastucima. Građevinar 58 (1), pp. 5-14.
- Wittke, W., (1990), Rock Mechanics, Berlin (Springer), pp. 750-778.

7. Popis slika

Slika 1. Zone mjerenja pomaka kod pokusa pločom; a) mjerenje pomaka u ravnini opterećenja; b) mjerenje pomaka u dubini opterećene zone

Slika 2. Tlačni jastuk: a) LNEC-ov jastuk; b) Interfels-ov jastuk (ELFJ)

Slika 3. Promjena dubine vlačne pukotine $h(m)$ s promjenama početnog naprezanja (σ_i), vlačne čvrstoće stijenske mase (σ_t) i maksimalnog apliciranog naprezanja (P_M), za slučaj jednog proreza (ISRM 1986)

Slika 4. Promjena dubine vlačne pukotine $h(m)$ s promjenama početnog naprezanja (σ_i), vlačne čvrstoće stijenske mase (σ_t) i maksimalnog apliciranog naprezanja (P_M), za slučaj tri kontinuirana proreza (ISRM 1986)

Slika 5. Izvođenje zaštitnih zona radi reduciranja vlačnih naprezanja u stijenskoj masi na rubovima jastuka (Kavur 2000)

Slika 6. Horizontalni pokus (Karun 3, 1992)

Slika 7. Kosi pokus (Karun 1, 1993)

Slika 8. Vremenski tijek pokusa pločom G3P2HS1 (Karun 3, 1992)

Slika 9. Krivulja „naprezanje-pomak“ u pokusu G3P2H, na ploči br.2, za mjernu točku 1 (Karun 3, 1992)

Slika 10. Krivulja „naprezanje-pomak“ u pokusu G3P2H, na ploči br.2, mjernu točku 2 (Karun 3, 1992)

Slika 11. Krivulja „naprezanje-pomak“ u pokusu G3P2H, na ploči br.2, za mjernu točku 3 (Karun 3, 1992)

Slika 12. Krivulja „naprezanje-pomak“ u pokusu G3P2H, na ploči br.2, mjernu točku 4 (Karun 3, 1992)

Slika 13. Krivulja „naprezanje-pomak“ u pokusu G3P2H, na ploči br.2, za mjernu točku 5 (Karun 3, 1992)

Slika 14. Distribucija ostvarenih pomaka po dubini stijenske mase u pokusu G3P2H na ploči br.2, za svaki od 5 ciklusa (Karun 3, 1992)

Slika 15. Fotografija stijenki bušotine (vidi se izrezani prorez)

Slika 16. Raspored repera u zoni aktivnog proreza

Slika 17. Bušenje centralne bušotine za horizontalni pokus (Karun 3, 1993)

Slika 18. Rezanje lijevog pasivnog proreza. Vide se reperi za mjerenje pomaka u zoni aktivnog proreza (Karun 3, 1993)

Slika 19. Rezanje srednjeg (aktivnog) proreza. Pasivni prorezi su izrezani. Vide se i reperi za mjerenje pomaka na površini iskopa (Karun 3, 1993)

Slika 20. Ugradnja jastuka u vertikalni prorez (Godar-E-Landar, 1992)

Slika 21. Mjerenje razmaka repera na površini iskopa u zoni aktivnog proreza (Karun 3, 1993)

Slika 22. Tlačni jastuk u čelu niše postavljen paralelno sa slojevima. Vide se obrađene površine za pokus pločom (Karun 3, 1993)

Slika 23.a) Vremenski tijek pokusa tlačnim jastukom G5L1h (Karun 3, 1993)

Slika 23.b) Krivulja “naprezanje-pomak” pokusa G5L1H za senzor 1 (Karun 3, 1993)..

Slika 23.c) Krivulja “naprezanje-pomak” pokusa G5L1H za senzor 2 (Karun 3, 1993).

Slika 23.d) Krivulja “naprezanje-pomak” pokusa G5L1H za senzor 3 (Karun 3, 1993).

Slika 23.e) Krivulja “naprezanje-pomak” pokusa G5L1H za senzor 4 (Karun 3, 1993).

Slika 24.a) Moduli deformabilnosti u opterećenju u zavisnosti od razine naprezanja u pokusu (pokus G5L1H, Karun 3, 1993).

Slika 24.b) Moduli deformabilnosti u rasterećenju u zavisnosti od razine naprezanja u pokusu (pokus G5L1H, Karun 3, 1993).

Slika 25.a) “Canellation pressure” u pokusu G5L1H (Karun 3, 1993).

Slika 25.b) “Canellation pressure” dostignut na reperima 1-2 i 5-6.

Slika 26. Poprečni presjek pregradnog mjesta brane Karun 3.

Slika 27. Omjeri PJT/LFJ modula.

Slika 28. Indirektna procjena deformabilnosti vapnenačke stijenske mase na temelju RMR-a.

8. Popis tablica

Tablica 1. Koeficijent k_i (cm) za različite kombinacije tlačnih jastuka (ISRM 1986).

Tablica 2. Geotehnički parametri stijenskog masiva na pregradnom mjestu brane Karun 3 (Ghazvinian 2004).

Tablica 3. PJT i LFJ moduli u Zoni 1.

Tablica 4. PJT i LFJ moduli u Zoni 2.

Tablica 5. PJT i LFJ moduli u Zoni 3.

Tablica 6. PJT i LFJ moduli u Zoni 4.