

# Ispitivanje deformabilnosti stijenske mase tlačnim jastucima

Ivan Vrkljan, Boris Kavur

## Ključne riječi

stijenska masa, deformabilnost, tlačni jastuk, ispitivanje in situ, injektiranje, deformacijski modul

## Key words

rock mass, deformability, flat jack, in situtesting, grouting, modulus of deformation

## Mots clés

masse rocheuse, déformabilité, vérin plat, essai in situ, injection, module de déformation

## Ключевые слова

горная порода, деформируемость, воздушная подушка, испытание «in situ», инъектирование, модуль деформации

## Schlüsselworte

Felsmasse, Verformbarkeit, Druckkissen, Untersuchung in situ, Verpressung, Verformungsmodul

I. Vrkljan, B. Kavur

Izvorni znanstveni rad

## Ispitivanje deformabilnosti stijenske mase tlačnim jastucima

U Iranu su na više mjesta obavljena velika ispitivanja deformabilnosti stijenske mase in situ za potrebe temeljenja nekoliko građevina. U radu su prikazani rezultati i način izvođenja pokusa velikim tlačnim jastucima i dan je kritički osvrt na metode interpretacije rezultata mjerenja. Opisana je potreba injektiranja kontakta jastuka i stijenske mase. Uspostavljen je odnos izmjerenih deformacijskih modula i modula određenih empirijskim postupcima za vapnenačku stijensku masu.

I. Vrkljan, B. Kavur

Original scientific paper

## Testing rock mass deformability with large flat jacks

Large scale rock-mass deformability testing was conducted in situ on several locations in Iran in order to define foundation possibilities for several structures. Test results and methods, involving the use of large flat jacks, are presented, and a critical overview on the interpretation of measurement results is given. The need to grout contact zones between the flat jack and the rock mass is explained. The relationship between the measured moduli of deformation, and the moduli determined by empirical limestone testing procedures, is defined.

I. Vrkljan, B. Kavur

Ouvrage scientifique original

## L'essai de déformabilité de la masse rocheuse à l'aide du vérin plat

Les investigations de grande taille de la déformabilité de masse rocheuse ont été effectuées sur quelques localités en Iran afin de définir les possibilités de fondation de plusieurs ouvrages. Les résultats et les méthodes des essais, conduits à l'aide des vérins plats, sont présentés, et un aperçu critique sur l'interprétation des résultats de mesurage est fourni. La nécessité de procéder à l'injection aux contacts entre le vérin plat et la masse rocheuse est expliquée. Le rapport entre le module de déformation mesuré et le module de déformation déterminé par les essais empiriques effectués dans les couches calcaires, est défini.

И. Врклян, Б. Кавур

Оригинальная научная работа

## Испытание деформируемости горной породы подушками давления

В работе описывается, как в Иране на многих местах выполнены большие испытания деформируемости горной породы «in situ» для потребностей фондирования нескольких сооружений. В работе показаны результаты и способ выполнения опыта большими подушками давления и дан критический взгляд на методы интерпретации результатов измерений. Описана необходимость инъектирования контактов подушки и горной породы. Восстановлено отношение измеренных модулей деформации и модулей, определённых эмпирическими способами для известняковой породы.

I. Vrkljan, B. Kavur

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Untersuchung der Verformbarkeit der Felsmasse mit Druckkissen

In Iran waren auf vielen Stellen wegen der Gründung einiger Bauwerke grosse in situ Untersuchungen der Verformbarkeit der Felsmasse durchgeführt. Im Artikel sind die Ergebnisse und die Ausführungsweise der Experimente mit grossen Druckkissen dargestellt und ein kritischer Rückblick auf die Methoden der Interpretation der Messungsergebnisse vorgelegt. Beschrieben ist die Notwendigkeit den Kontakt zwischen Kissen und Felsmasse zu verpressen. Festgelegt ist das Verhältnis zwischen den gemessenen Verformungsmoduli und den durch empirische Verfahren erreichten Moduli für die Kalksteinmasse.

Autori: Prof. dr. sc. **Ivan Vrkljan**, dipl. ing. rud.; mr. sc. **Boris Kavur**, dipl. ing. rud.; Institut građevinarstva Hrvatske, Rakušina 1, Zagreb

## 1 Uvod

Ispitivanja u mehanici stijena nailaze na do danas neriješen problem koji se u mehanici tla ne susreće ili je mnogo manje izražen. To je učinak mjerila (*scale effect*). Iz ekonomskih i tehničkih razloga, za većinu geotehničkih problema nije moguće ispitati statičke parametre koji uključuju odgovarajuće mjerilo promatranja. Ova činjenica čini rezultate ispitivanja nepouzdanim što često može imati ozbiljne, a nekada i fatalne posljedice. Glavni uzrok nepouzdanosti jest diskontinualnost i heterogenost stijenske mase. Učinak mjerila Ladany [1] smatra jednim od najvećih problema mehanike stijena.

Metoda velikih tlačnih jastuka uvedena je u praksu radi uklanjanja nedostataka pokusa opterećenja pločom. Zato Lama i Vutukuri [4] ovaj pokus tretiraju kao modificirani pokus pločom. Metodom su se prvi put koristili Oberti, Breth i Talobre te nešto kasnije Institut Jaroslav Černi iz Beograda [5]. Bitno poboljšanje postupka obavio je LNEC (*Laboratorio Nacional de Engenharia Civil*) iz Portugala [6]. Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM) podržalo je LNEC metodu te je izdalo preporučenu metodu u kojoj je opisan postupak ispitivanja i način interpretacije mjerenih podataka [7]. Interpretacija rezultata mjerenja nije jednostavna i nekada zahtijeva provođenje proračuna što nije slučaj kod većine drugih metoda.

Kod visokih lučnih brana i drugih građevina koje su osjetljive na pomake, empirijske metode ne mogu zamijeniti velike *in situ* pokuse. Evert Hoek, jedan od autora danas najčešće primjenjivanoga empirijskog pristupa za određivanje čvrstoće i deformabilnosti stijenske mase, naglašava da je namjera empirijskih pristupa procjena svojstava u početnoj fazi projektiranja i da ih treba pažljivo rabiti. U kritičnim situacijama, strogo preporučuje

*in situ* mjerenja ili ponovljene proračune iz rezultata opažanja [8].

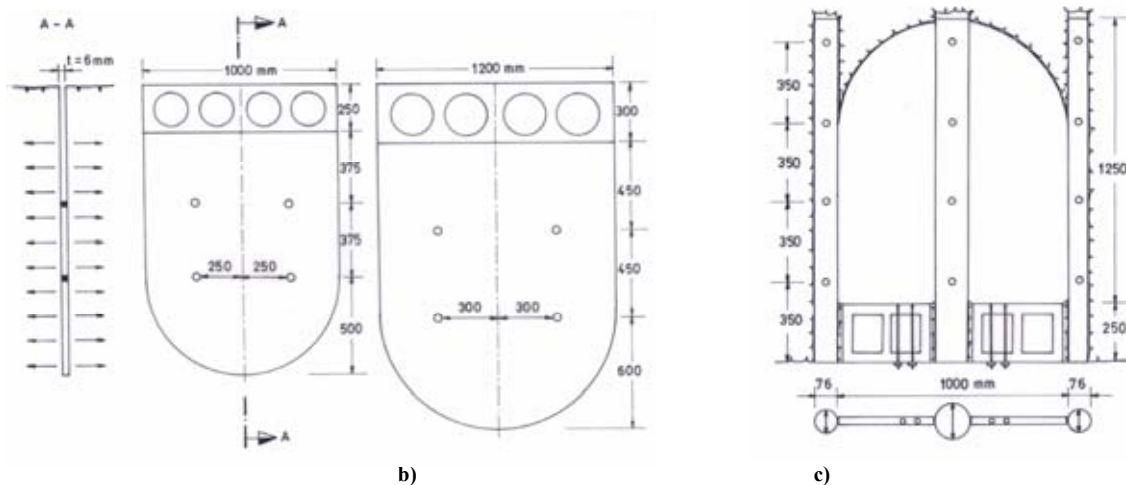
U radu je opisano iskustvo izvođenja pokusa i interpretacije rezultata mjerenja na hidrotehničkim građevinama u Iranu. Upozorava se na potrebu injektiranja kontakta jastuka i stijenske mase u gotovo svim slučajevima. Injektiranje treba obavljati vrlo pažljivo, kako ono ne bi postalo "konsolidacijsko" te tako utjecalo na rezultat mjerenja. Na većini ispitanih lokacija izmjereno je naprezanje u stijenskoj masi u području jastuka (tzv. cancellation pressure). Pokus velikim tlačnim jastucima pokazao se kao jedan od najprimjerenijih velikih *in situ* pokusa. Svi rezultati su logični i u granicama očekivanih.

Neke aspekte ovog pokusa i kritički osvrt na probleme interpretacije rezultata mjerenja autori ovog rada prikazali su u radovima [9] i [10].

## 2 Metode ispitivanja velikim tlačnim jastucima

Princip LFJ (*Large Flat Jack*) pokusa jest sljedeći: U iskopani ili izrezani preoz umeće se tlačni jastuk. Povećanjem hidrostatičkog tlaka u jastuku, opterećuje se stijenska masa u suprotnim stranama proreza. Mjeri se povećanje širine proreza u funkciji primijenjenog naprezanja. Iz podataka o naprezanju i izmjerenom pomaku proračunaju se moduli deformabilnosti stijenske mase.

Stručnjaci LNEC-a uočili su nedostatke metode razvijene u Institutu Jaroslav Černi [5] te su razradili sasvim nov pristup ovom pokusu. Uveli su izmjene u tehnologiji izrade zasjeka, obliku jastuka, sustavu mjerenja pomaka i dr. Pokus je najavio Rocha na prvom kongresu ISRM-a 1966. [11], a službeno je predstavljen 1968. [12]. Detaljni opis i teorijska osnova metode prikazani su u dokumentu LNEC-a [6]. Glavne su karakteristike ove metode (slika 1):



Slika 1. Tlačni jastuk: a) LNEC-ov jastuk; b) Interfelsov jastuk (ELFJ); c) nova dispozicija opreme za LFJ pokus [13]

- Zasjek se izvodi rezanjem dijamanom pilom. Kako se ovdje radi o rezanju stijene pilom debljine 6 mm, primjereno je umjesto naziva "zasjek" upotrijebiti naziv „prorez“. Širina proreza jednaka je debljini pile, dakle 6 mm.
- Prorez može imati proizvoljnu dubinu, što ovisi o tehničkim karakteristikama opreme.
- Prorez može imati proizvoljan položaj u prostoru.
- Može se istodobno rabiti više jastuka u jednoj ravni čime se znatno povećava volumen utjecaja pokusa.
- Oblik jastuka je kombinacija kvadrata sa stranicom 1 m i polukruga promjera 1 m (slika 1.a).
- Prorezi mogu djelomično ili potpuno ostati prazni radi stvaranja tzv. zaštitnog područja. Na ovaj se način dobiju jasniji rubni uvjeti pokusa što olakšava interpretaciju rezultata mjerenja.
- U svaki jastuk ugrađena su četiri mjerna uređaja za mjerenje promjene širine proreza što može ukazati i na neheterogenost stijenske mase.

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 interpretacija rezultata mjerenja [7]. Treba upozoriti da preporučena metoda ISRM-a ostavlja otvorenim neke probleme interpretacije rezultata mjerenja što korisnicima stvara značajne probleme.

Slika 1.b prikazuje tlačni jastuk većih dimenzija od standardnog LNEC-ova. Ovaj jastuk poznat je kao Interfelson ELFJ (Extra Large Flat Jack). Sve dimenzije kod ELFJ proporcionalno su povećane u odnosu na LNEC-ov LFJ. Proporcionalnost dimenzija ovih dvaju jastuka omogućava primjenu istog postupka za proračun modula.

U namjeri da uklone neke nedostatke standardnog LFJ pokusa, istraživači LNEC-a modificirali su pokus kako to pokazuje slika 1.c [13].

### 2.3.1 Interpretacija rezultata mjerenja

Postupak proračuna modula deformabilnosti detaljno je prikazan u radovima [6], [7] i [14]. Pod pretpostavkom izotropno elastičnog ponašanja stijenske mase, modul deformabilnosti proračuna se po sljedećoj jednadžbi:

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

$i$  – pozicija mjernog uređaja ugrađenog u jastuk

$E_i$  – modul deformabilnosti na mjernoj točki "i"

$P$  – inkrement primijenjenog naprezanja.  $P = P_M - P_m$

$P_M$  – maksimalno naprezanje

$P_m$  – minimalno naprezanje

$d_i$  – promjena širine proreza u mjernoj točki "i" kao posljedica unijetog naprezanja "P"

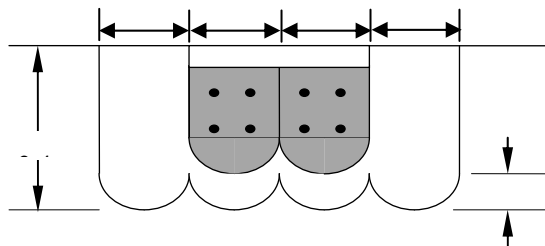
$\nu$  – Poissonov omjer (obično se uzima vrijednost 0,2 - 0,3).

$k_i$  – 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 proračuna modula nastaje pri pokušaju definiranja koeficijenta  $k_i$  u kojem su sadržane sve aproksimacije koje se ne mogu izbjeći zbog vrlo kompliciranih rubnih uvjeta. Koeficijent  $k_i$  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. Osnovni problem predstavlja određivanje dubine vlačne pukotine koja nastane tijekom pokusa kada naprezanja premaše vlačnu čvrstoću stijene. Ovaj su problem autori detaljno prikazali u radu [9].

Uočavajući vrlo rano problem određivanja dubine vlačne pukotine, Rocha i Silva [15] preporučuju rješenje stvaranjem tzv. zaštitnog područja oko jastuka. To se područje izvodi rezanjem tzv. pasivnih proreza sa obje strane takozvanog aktivnog proreza te produbljenjem aktivnog proreza. Jastuci se umeću samo u aktivne proreze. Dubina produbljenja aktivnog proreza od oko 0,5 m (za jastuk širine 1 m) može se smatrati dubinom vlačne pukotine, što omogućava uporabu koeficijenta  $k_i$  iz tablice s koeficijentima [7]. Dubina pukotine može biti i veća od 0,5 m, ali je taj utjecaj relativno mali.

Slika 2. prikazuje slučaj sa dva aktivna i dva pasivna proreza (ELFJ). Ako se rabi ELFJ, (širina jastuka 1,2 m) prorez treba produljiti na 0,6 m kako bi se mogli rabiti koeficijenti  $k_i$  [7] za standardni jastuk širine 1 m (koeficijenti koji odgovaraju dubini pukotine od 0,5 m kod LFJ-a).



Slika 2. Izvođenje zaštitnih područja radi eliminiranja problema određivanja dubine vlačne pukotine pri uporabi ELFJ-a (dva aktivna i dva pasivna proreza)

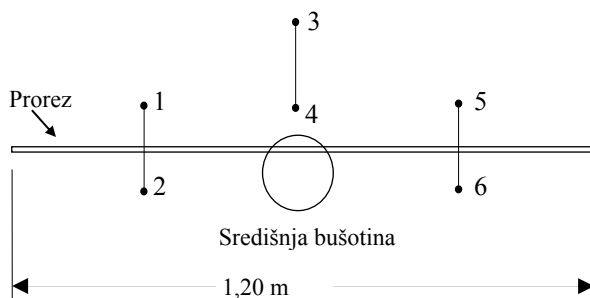
Danas se proizvode veći i manji jastuci od standardnog LNEC jastuka. Tablica s koeficijentima u radu [7] može se iskoristiti za jastuke istog oblika i s proporcionalnim rasporedom mjernih točaka. Jednakovrijedna dubina vlačne pukotine s kojom se odabiru vrijednosti koeficijenta  $k_i$  dobije se množenjem dubine ostvarene pukotine s koeficijentom  $1/B$  gdje je  $B$  (m) širina korištenog jastuka.

### 3. Primjeri iz prakse

Geotehnika d.d. iz Zagreba je u razdoblju od 1991. do 1994. obavila opsežna *in situ* ispitivanja stijenske mase na lokacijama triju velikih hidroenergetskih građevina u Iranu. Obavljeno je više od 100 dilatometarskih ispitivanja, 17 pokusa velikim tlačnim jastucima (ELFJ-*Extra Large Flat Jack*) i 28 pokusa pločom (PLT - *Plate Load Test*) promjera 1 m. Ispitana je i posmična čvrstoća kontakta beton-stijena na 3 serije po 5 pokusa (70 x 70 cm). Primarna (prirodna) naprezanja u stijenskoj masi određena su uporabom "CSIR" troosne sonde (35 pokusa) i "doorstopper" metodom (5 pokusa). Pripremni radovi (pristupni putovi, podzemne galerije) trajali su godinu dana, a samo ispitivanje iduće tri godine. Tijekom ispitivanja u skupini je radilo šest diplomiranih inženjera i desetak pomoćnih radnika.

Na projektima Karun 1 (postojeća lučna brana Shahid Abbaspour) i Godar-E-Landar HEPP, ispitivanja su obavljena za potrebe projektiranja podzemnih strojarnica, a na projektu Karun 3 za potrebe temeljenja najviše lučne brane u Iranu visine 205 m.

Stijenski masiv na lokaciji Karun 3 (slika 3.) sadrži dva litološka člana: vapnence i lapore koji geološki pripadaju tzv. Asmari formaciji Zagros masiva. Vapnenci su bankoviti s vrlo izraženim plohama slojevitosti. Inženjersko-geološkim istraživanjima ustanovljeno je postojanje 4 glavne porodice diskontinuiteta. Dominiraju međuslojni diskontinuiteti i oni imaju najveći utjecaj na stabilnost i površinskih i podzemnih iskopa. Međuslojne plohe javljaju se kao zatvorene i otvorene bez ispune, a ponekad su ispunjene glinom. Izražena je karstifikacija, tako da je pojava kaverna dimenzija od nekoliko cm do 1 m vrlo česta (prevladavaju kaverne manjih dimenzija).



Slika 4. Raspored repera u zoni aktivnog proreza. Snimka stijenki bušotine (vidi se izrezani prorez)



Slika 3. Betonska lučna brana Karun 3 u kanjonu rijeke Karun (brana je visoka 205 m)

Lapori se ne nalaze u samom pregradnom profilu brane nego dublje u desnom boku, na lokaciji optočnih tunela i ne utječu bitno na buduću branu. Vrlo su kompaktni s velikom čvrstoćom u suhom stanju. Jako su podložni raspadanju kada nakon sušenja dođu u dodir s vodom.

#### 3.1 Ugradnja opreme

Svi pokusi izvedeni su u podzemnim istražnim galerijama. Kako se iskop obavljao miniranjem, na lokacijama iskopa iskopano je poremećeno područje upotrebom zračnih čekića do dubine 60 cm. Obrađeno područje bilo je najmanje 2 m šire 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 inženjersko-geološko snimanje mikrolokacije pokusa. Ova snimka zajedno s podacima dobivenim pregledom jezgre iz središnje bušotine daje vrlo detaljnu sliku inženjersko-geoloških karakteristika mikrolokacije.

U području budućega aktivnoga proreza (prorez s tlačnim jastukom) ugrađuju se tri para repera. Raspored repera za mjerenje pomaka na površini iskopa prikazan je na slici 5. Početni razmak repera odredi se prije bušenja središnje bušotine i rezanja aktivnog proreza.

Nakon ugradnje repera pristupa se bušenju središnje bušotine što je uvjetovano tehnologijom rezanja proreza. Za rezanja proreza u nju ulazi nosač pile s hidrauličkim motorom. Jezgra koja se dobije iz središnje bušotine omogućava temeljit uvid u stanje stijenske mase. Dubina bu-





šotine je kod pokusa s jednim aktivnim prorezom bila 1.8 m, a kod pokusa s jednim aktivnim i dva pasivna proreza 2 m. Promjer bušotine od 250 mm omogućava vizualni pregled njezinih stijenki (slika 4.). Uporabljjeni su Interfelsovi ELFJ jastuci širine 1,2 m.

Slike 5. i 6. prikazuju rezanje triju proreza za pokus s jednim aktivnim i dvama pasivnim prorezima na projektu Karun 3.



Slika 5. Rezanje lijevoga pasivnoga proreza. Vide se reperi za mjerenje pomaka u području aktivnog proreza (Karun 3)



Slika 6. Rezanje srednjeg (aktivnog) proreza. Pasivni su prorezi izrezani. Vide se središnje bušotine i reperi za mjerenje pomaka na površini iskopa (Karun 3)

Nakon završetka rezanja svih proreza i čišćenja aktivnog proreza ugrađuje se jastuk (slika 7.). Jastuk se mora ugraditi što prije, kako bi se izbjeglo eventualno zatvaranje proreza. Nakon ugradnje jastuk se pažljivo napuni uljem tako da se stijenke jastuka priljube uz stijenke proreza. Pri tome treba paziti da se jastuk ne deformira u području otvorene središnje bušotine te da se zrak iz jastuka potpuno istisne uljem. Nakon toga središnja se bušotina zapunjava cementnim mortom.

Preporuke ISRM-a [7] ne predviđaju injektiranje uskog područja oko jastuka. Međutim, naša iskustva pokazuju

da samo u izuzetnim situacijama stijenska masa ne sadrži diskontinuitete i šupljine koji mogu uzrokovati rano pucaanje jastuka već pri malom opterećenju. Uostalom, deformabilnost stijenske mase bez diskontinuiteta može se odrediti i na mnogo prikladniji način u laboratoriju (intaktni materijal).

Injektiranje područja oko jastuka izvršeno je cementnim mortom uz pomoć ručne pumpe s vrlo malim tlakom (najviše 50 kPa) i malom količinom smjese (do 5 litara). Injektiranjem je potrebno zapuniti samo otvorene diskontinuitete u području jastuka i to u dubini od nekoliko cm. Injektiranjem proreza pod većim tlakom i većom količinom smjese konsolidirala bi se stijenska masa što bi utjecalo na rezultat mjerenja. Za injektiranja su na mjernom instrumentu praćene promjene svakog od mjerila pomaka ugrađenih u jastuku. Pokus je počinjao tri dana nakon injektiranja proreza i zapunjavanja središnje bušotine cementnim mortom.

Mjerenje razmaka repera obavlja se redovito u svim fazama pripreme pokusa (bušenja središnje bušotine i rezanja proreza) i tijekom samog ispitivanja. Naprezanje pri kojem se zabilježi početni (nulti) razmak repera jest tzv. *cancellation pressure* i dobra je indicacija stanja naprezanja stijenske mase u području pokusa.



Slika 7. Ugradnja jastuka u vertikalni prorez. Vide se dimenzije ispitnog mjesta u odnosu na veličinu istražne galerije (Godar-E-Lander)

### 3.2 Program ispitivanja


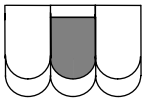
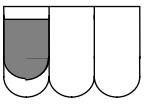
Svaki od izvedenih pokusa planiran je sa šest ciklusa opterećenja i rasterećenja. Kod prva se tri ciklusa opterećenje povećavalo i smanjivalo u koracima od po 0,2 MPa, s čitanjem mjernih uređaja u 1., 2. i 4. minuti svakog koraka. U posljednja tri ciklusa korak opterećenja iznosio je 0,5 MPa, a očitavanje se obavljalo u istim vremenskim intervalima kao i kod prvih triju ciklusa. Najveće i najmanje opterećenje u prvih 5 ciklusa održavalo se stalnim tijekom 2 sata, dok se maksimum šestog ciklusa

održavao najmanje 4 odnosno 12 sati u slučaju tzv. pokusa tečenja (*creep test*).

Očitavanje mjernih uređaja kod najvećih i najmanjih opterećenja u jednom ciklusu obavljalo se u 1., 2., 4., 8., 15., 30., 60., 120., 180. i 240. minuti. Ako bi u posljednjem satu najvećega odnosno najmanjega opterećenja prirast pomaka bio veći od 0,003 mm, mjerenje je produljeno za jedan sat sve dok prirast nije bio manji od 0,003 mm/h. Neki od pokusa bili su tzv. *failure test* tj. ispitivanje sloma kod kojih se nakon šestog ciklusa opterećenje povećavalo u koracima od 0,5 MPa sve do sloma stijene ili pucanja jastuka.

Na projektu Karun 3 obavljeno je ukupno 12 pokusa velikim tlačnim jastucima, a na projektu Godar-E-Landar 5 pokusa. Sva su ispitivanja obavljena s jednim aktivnim jastukom. Raspored jastuka na projektu Karun 3 prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Raspored aktivnih i pasivnih proreza na projektu Karun 3

Tip pokusa	Kombinacija jastuka	Br. izved. pokusa	Napomena
A		8	Dimenzija proreza odgovara dimenziji jastuka
B		3	Dubina produbljenja svih proreza = 60 cm
C		1	

Pri definiranju najvećih i najmanjih napreznja vodilo se računa o očekivanim napreznjima stijenske mase tijekom eksploatacije brane.

### 5.3 Rezultati ispitivanja

Moduli deformabilnosti izračunani su prema preporukama ISRM-a [7]. Kod pokusa tipa "A", dimenzije proreza bile su za nekoliko mm veće od dimenzija jastuka što znači da nije izvedeno zaštitno područje. Vlačna pukotina se pojavljivala, ali ne svaki put.

Na otvaranje vlačne pukotine ukazivali su sljedeći pokazatelji: (a) trenutna promjena nagiba krivulje "napreznje-pomak"; (b) pojava vlačne pukotine na površini stijene; (c) zvučni efekti u trenutku loma stijene; (d) dostignuto opterećenje pri kojem 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 s koeficijentima [7] za dubinu vlačne pukotine  $h = 0$  m ( $k_i = 131,4$  odnosno 136,8).

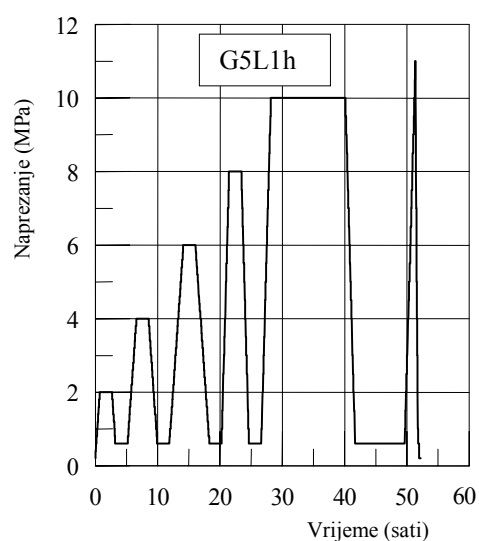
U slučajevima kada je ocijenjeno da je tijekom pokusa nastala vlačna pukotina, primijenjen je sljedeći postupak:

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

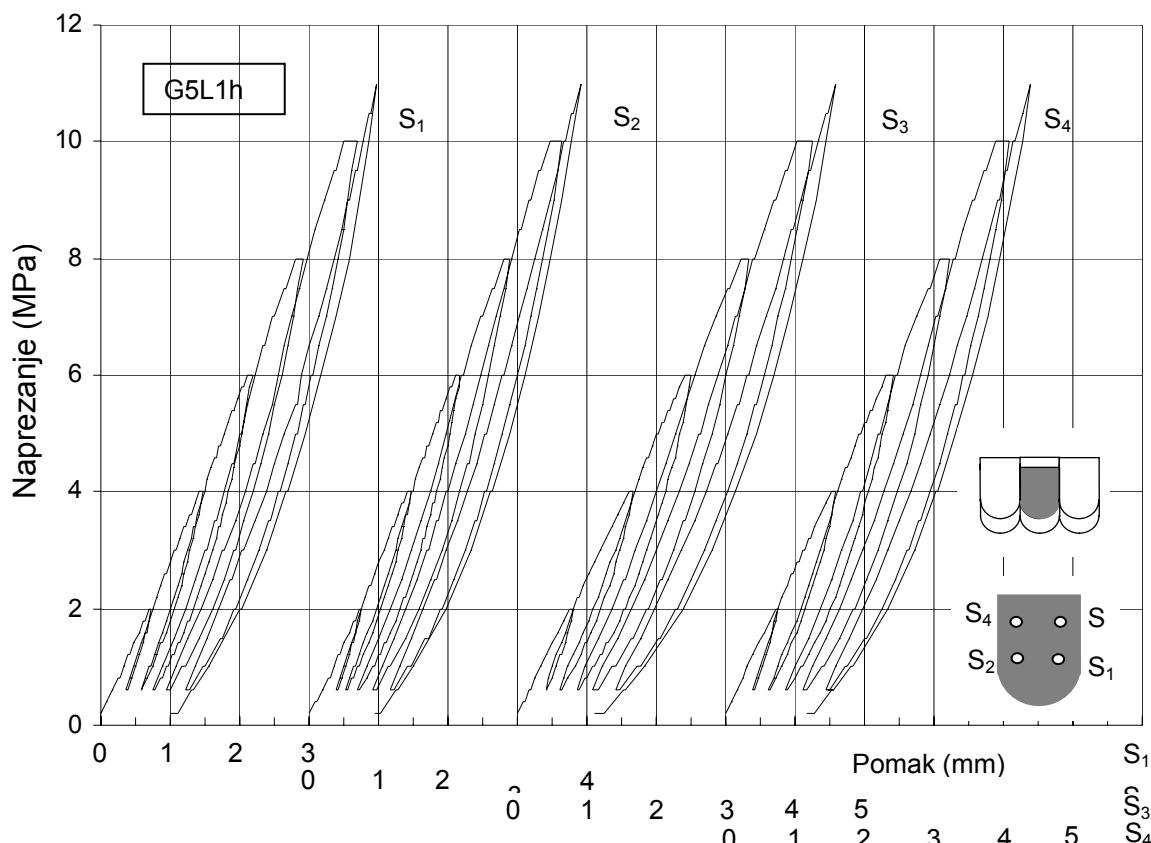
Dubina vlačne pukotine izračunana je u skladu s preporukama ISRM [7] uz pretpostavku poznavanja inicijalnog napreznja stijenske mase i njezine vlačne čvrstoće. Inicijalno napreznje poistovječeno je s tzv. *cancellation pressure* koji je ustanovljen tijekom pokusa praćenjem promjene razmaka repera ugrađenih na površini iskopa u području proreza. Vlačna čvrstoća stijenske mase je procijenjena. Pri tome se vodilo računa o gustoći i položaju diskontinuiteta dotične mikrolokacije.

Kod pokusa tipa B izvedena je zaštitno područje sa svake strane jastuka širine 1.2 m i u dubinu od 0,6 m. Dubina zaštitnog područja od 0,6 m kod ELFJ (širina jastuka od 1,2 m) odgovara dubini zaštitnog područja od 0,5 m kod LFJ (širina jastuka od 1 m). Prema tome, moduli su izračunani s vrijednostima koeficijenta  $k_i$  od 190,4 i 192,3 (vidi tablicu s koeficijentima u radu [7]).

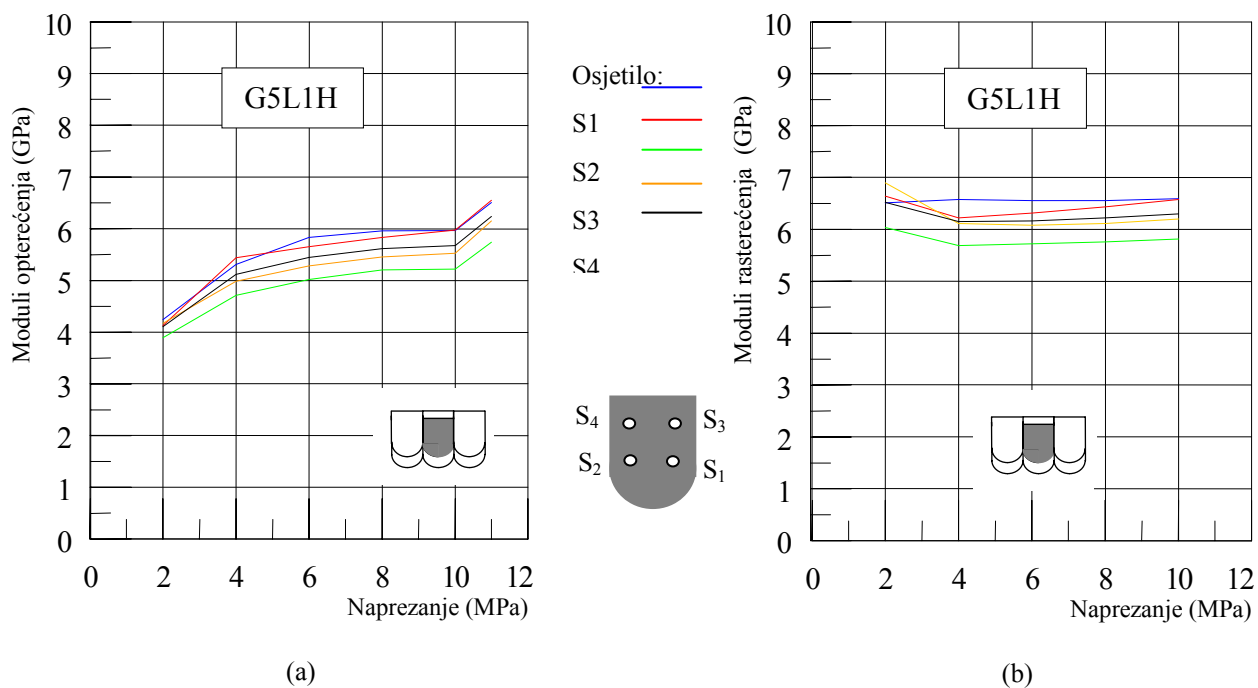
Kod pokusa tipa C usvojena je pretpostavka da dubina zaštitnog područja od 0,6 m odgovara dubini vlačne pukotine od 0,5 m te su moduli izračunani sa sljedećim vrijednostima koeficijenata  $k_i$ : 187,2; 190,1; 188,6; i 191,7 (vidi tablicu s koeficijentima u radu [7]).



Slika 8. Vremenski tijek pokusa tlačnim jastukom G5L1h (Karun 3)



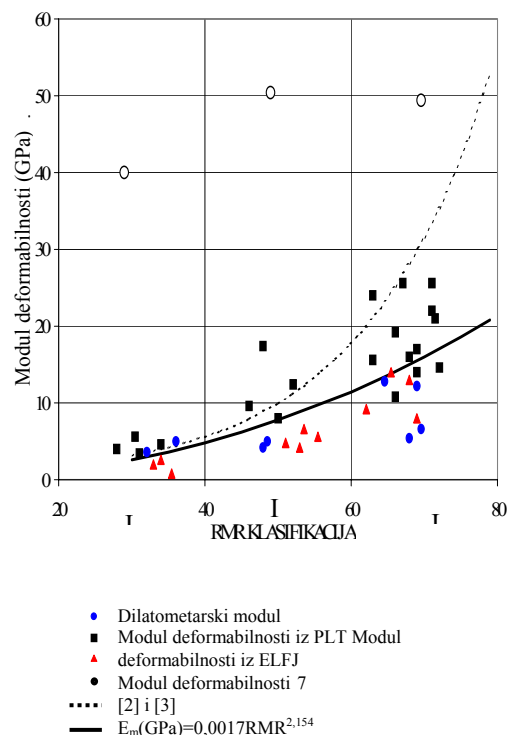
Slika 9. Naponsko-deformacijska krivulja za sve mjerne točke (Karun 3)



Slika 10. Moduli deformabilnosti u opterećenju (a) i rasterećenju (b) u ovisnosti od razine naprezanja u pokusu G5L1h (Karun 3)

Rezultati pokusa prikazani su tablično i grafički. Tablični prikaz ilustriran je tablicom 2., a neki od grafičkih prikaza dani su na slikama 8., 9. i 10. Prikazan je vremenski tijek jednog od obavljenih pokusa (slika 8.) te krivulje naprezanje-deformacija za sva četiri mjerila pomaka (slika 9.). Slika 10. prikazuje vrijednosti modula opterećenja i rasterećenja na pokusu G5L1h. Vidljivo je povećanje modula opterećenja s porastom naprezanja što ukazuje na zatvaranje diskontinuiteta u stijenskoj masi. Također se primjećuje ujednačenost modula rasterećenja. Tijekom provedenih ispitivanja postignuto je najveće naprezanje od 16 MPa, što odgovara sili od 26 400 kN.

Na projektu Karun 3 ispitivanja tlačnim jastukom provedena su u laporu i vapnencima različitih kategorija po RMR razredbi, a na projektu Godar-E-Landar u konglomeratima i pješčenjacima II. kategorije. Obavljeni pokusi grupirani su prema kategoriji (RMR) stijenske mase, te prema pravcu opterećenja. Statistička obrada uključivala je sljedeće: broj uzoraka, najmanju i najveću vrijednost modula, aritmetičku i geometrijsku srednju vrijednost modula, standardnu devijaciju i koeficijent varijacije. U tablici 2. prikazani su rezultati ispitivanja velikim tlačnim jastucima (ELFJ), dilatometrom i pločom promjera 1 m (PLT) u stijenskoj masi četvrte kategorije po RMR razredbi određeni različitim *in situ* metodama (vapnenac Asmari formacije, Karun 3, Iran) [16]. Slične tablice izrađene su i za ostale kategorije stijenske mase. Na slici 11. prikazane su izmjerene i empirijski određene deformabilnosti



Slika 11. Izmjerene i empirijski određene deformabilnosti vapnenca za tri kategorije RMR razredbe (Asmari formacija Zagros masiva u Iranu)

Tablica 2. Moduli deformabilnosti vapnenca četvrte kategorije RMR razredbe

Statistički pokazatelj	N	Projekt: Karun 3 MODULI DEFORMABILNOSTI (GPa)												Dilatometrijski modul		
		Paralelno sa slojevima						Okomito na slojeve						GPa		
		Opterećenje			Rasterećenje			Opterećenje			Rasterećenje			Opt	Rast	
		PLT	ELFJ		PLT	ELFJ		PLT	ELFJ		PLT	ELFJ				
ISRM	Boyle	ISRM	ISRM	Boyle	ISRM	ISRM	Boyle	ISRM	ISRM	Boyle	ISRM	ISRM	Boyle	ISRM		
Broj uzoraka	8	15,00	15,00	2,00	17,00	13,00	12,00	25,00	25,00	14,00	25,00	25,00	14,00	50,00	40,00	37,00
Minimalna vrijednost	$E_{min}$	2,49	1,34	0,51	4,01	2,05	1,83	0,84	0,54	0,33	1,02	1,17	0,76	1,04	2,60	0,33
Maksimalna vrijednost	$E_{max}$	4,85	2,26	4,35	8,29	4,24	4,07	6,39	4,52	0,75	16,74	13,85	0,91	7,39	8,88	24,83
Srednja vrijednost	$E_m$	3,95	1,99	2,09	5,61	2,82	2,64	3,34	2,21	0,53	4,69	3,30	0,83	3,62	5,04	6,46
Standardna devijacija	S	0,67	0,26	1,44	1,36	0,71	0,65	1,80	1,21	0,14	1,89	2,26	0,04	1,70	1,93	4,52
Koeficijent varijacije	$V_c$	16,90	13,20	68,9	24,30	26,10	24,80	54,00	54,30	26,30	72,30	83,6	4,90	47,00	38,30	70,00
Geometrijska sredina	$E_g$	3,89	1,97	1,65	5,47	2,71	2,58	2,85	1,89	0,51	3,91	2,64	0,85	3,23	4,70	5,05
Težina	$E_w$	1,09	0,55	0,88	1,71	0,56	0,52	0,92	0,61	0,15	0,93	0,65	0,16			
Pravac opterećenja				1,98			1,99			1,51			1,42			
Pravac rasterećenja				1,89			2,13			6,30			5,65			
Pravac opterećenja i rasterećenja				0,95			1,07			4,17			3,98			
Pravac rasterećenja				3,09			2,45			12,19			7,78			
Opis stijenske mase		Vapnenac, frakturnan, s porastom gline u međuslojnim plebanama. Kasnije ispunjene glinom. Primjećuju se laki nagovi i rastezanja zidova diskontinuiteta												RMR <sup>2</sup> [16] 43		



ne deformabilnosti vapnenca za tri kategorije RMR razredbe. Od empirijskih metoda rabile su se metode Hoeka i Browna [2] te Serafima i Pereire [3]. Izmjerene vrijednosti predstavljene su modulima iz pokusa velikim tlačnim jastucima (ELFJ), pokusima pločom (PLT) te iz dilatometarskih pokusa. Prikazane su i prosječne vrijednosti modula dobivene ispitivanjem intaktnih uzoraka u laboratoriju. Iz ovog prikaza može se vidjeti sljedeće:

- Moduli određeni pokusnom pločom znatno su veći od modula određenih ELFJ pokusom (naročito u II. i III. kategoriji stijenske mase).
- Rasipanje rezultata ispitivanja za sve pokuse smanjuje se s opadanjem kvalitete stijenske mase. U stijenskoj masi četvrte kategorije, empirijski i eksperimentalni moduli dobro se slažu. U kvalitetnoj stijenskoj masi empirijske metode daju preoptimistične prognoze modula deformabilnosti.

Iskustva s većeg broja obavljenih ELFJ pokusa pokazuju sljedeće:

- Rezultati svih pokusa u potpunosti su upotrebljivi. Sve izmjerene veličine uključene su u statističku obradu. Prosječni je koeficijent varijacije modula u vapnencima na projektu Karun 3 iznosi samo 24,5%, na projektu Godar-E-Landar u pješčenjaku 32,0% i u konglomeratu 35,5%.
- Na projektu Karun 3, moduli u pravcu okomitom na slojevitost niži su od modula u pravcu paralelnom s ravninama slojevitosti, što se s obzirom na stanje diskontinuiteta moglo očekivati.
- Na 10 od 17 pokusa dostignut je tzv. *cancelation pressure* što daje informaciju o stanju naprezanja stijenske mase u području pokusa.
- Kod svih se pokusa moralo, s obzirom na pojavu diskontinuiteta i kavernica u stijenkama proreza, obaviti injektiranje područja oko jastuka.
- Rezultati većine pokusa pokazuju vrlo malu razliku modula početnog opterećenja u odnosu na ponovljena opterećenja i gotovo konstantne vrijednosti modula ponovnog opterećenja neovisno o vrijednosti naprezanja. Ovo je vrlo bitno za donošenje konačne ocjene o prikladnosti stijenske mase za temeljenje lučne brane koja u masiv unosi velika opterećenja, a trpi relativno male pomake. Naime velika početna deformabilnost bez obzira na malu deformabilnost kod ponovljenog opterećenja može ugroziti stabilnost lučne brane. Velika početna deformabilnost obično je posljedica trajnog zatvaranja diskontinuiteta kod prvog opterećenja.

- Mogućnost proizvoljne orijentacije jastuka omogućava određivanje modula u pravcu najmanjeg naprezanja koje će građevina prouzročiti.
- Provedena istraživanja pokazuju dobro slaganje izmjerenih modula s empirijski određenim modulima za stijensku masu IV. kategorije RMR razredbe. Međutim, s povećanjem kvalitete stijenske mase, empirijski moduli znatno brže rastu u odnosu na izmjerene (slika 13.).

#### 4 Zaključak

LFJ pokus koji je preporučio ISRM [7] u potpunosti je djelo stručnjaka LNEC-a. To je najpouzdaniji veliki *in situ* pokus. Iskustva autora u vezi s ovim pokusom su izrazito pozitivna. Rezanje proreza osigurava najmanje poremećenje stijenske mase. Najmanja je udaljenost mjerila pomaka od površine iskopa 62,5 cm, što osigurava isključenje oštećenog područja stijenske mase.

Mjerni reperi u području aktivnog proreza pouzdano identificiraju deformiranje stijenske mase tijekom rezanja proreza (zatvaranje proreza) i tijekom pokusa (otvaranje proreza). Bez obzira na neke nejasnoće, izmjereni pomaci daju uporabljivu informaciju o stanju naprezanja u pravcu okomitom na ravninu jastuka ako se tijekom pokusa dostigne tzv. *cancelation pressure*. Na 10 od 17 pokusa dostignuta je vrijednost ovog naprezanja.

Provedena ispitivanja pokazuju da empirijski pristup daje optimističke module naročito u stijenskoj masi bolje kvalitete. Empirijski moduli veći su i od modula izmjerenih pločom a zna se da su moduli iz pokusa pločom najčešće precijenjeni.

U ispitnoj prostoriji stijenska masa poremećena miniranjem mora biti uklonjena iz dva razloga: (a) kako ne bi utjecala na rezultat mjerenja (b) kako bi se lakše uočila vlačna pukotina. Preporučujemo da dimenzija obrađenog područja u ravnini jastuka bude najmanje jednaka širini opterećenog područja (sa obje strane): Kako bi se lakše uočila pukotina, pokazalo se korisnim područje pojave pukotine prekriti tankim slojem morta.

Da bi se izbjegli problemi oko procjene dubine vlačne pukotine, preporučujemo da se uvijek, kada je to moguće, formiraju zaštitna područja oko aktivnih jastuka. Ove se područja formiraju rezanjem proreza dublje od ukupne visine jastuka te rezanjem tzv. pasivnih proreza s bočnih strana aktivnih proreza.

Iskustva pokazuju da će modificirani LNEC-ov pokus [12] naići na velike probleme u praksi jer se otvara problem zaštite jastuka injektiranjem. Naime, modificirani pokus ne predviđa mogućnost injektiranja jastuka, a naše iskustvo pokazuje da se u u stijenskoj masi čija defor-

mabilnost ima smisla mjeriti, pokus ne može izvesti bez injektiranja. Provedena istraživanja jasno su pokazala da se ne očekuju veliki pomaci bokova lučne brane Karun 3 pri prvom opterećenju (punjenja jezera). To je izuzetno važno jer su mnoge lokacije osjetljivih brana napuštene

zbog prevelike deformacije pri prvome opterećenju bez obzira što su moduli iz ponovljenih opterećenja zadovoljavali. Brana je uspješno završena i jezero je napunjeno vodom.

#### Zahvala

*Autori zahvaljuju kolegama G. Krstiću, D. Domoviću, S. Duspariću, T. Kalausu, J. Vukobratu na trudu koji su uložili tijekom ispitivanja u Iranu. Zahvaljuju i Geotehnici-Zagreb koja je omogućila ova istraživanja te stručnjacima Interfelsa GmbH na korisnim sugestijama i pomoći tijekom izvođenja ovih pokusa.*

#### LITERATURA

- [1] Ladanyi, B.: *Issues in Rock Mechanics: Personal View*, Proc 23<sup>rd</sup> US Symposium on Rock Mechanics, Berkeley, California, 1982.
- [2] Hoek, E.; Carranza-Torres, C.; Corkum, B.: *Hoek-Brown Failure Criterion-2002 Edition*, Proc. North American Rock Mechanics Society Meeting, Torino, 2002.
- [3] Serafim, J. L.; Pereira, J. P.: *Consideration of the Geomechanics Classification of Bieniawski*, Proc. Int. Symp. Eng. Geol. and Underground Construction, Lisbon, 1 (II) 33-44, 1983.
- [4] Lama, R. D.; Vutukuri, V. S.: *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*, Trans Tech Publications, Vol. 3, 1978.
- [5] Kujundžić, B.: *Prilog eksperimentalnom određivanju modula elastičnosti stene in-situ*, Naše građevinarstvo, 8, (1954).
- [6] LNEC: *Determinacao do modulo de deformabilidade dos macicos rochosos por meio de macacos planos de granda area*, Proc. 45/13/3439, 1976.
- [7] ISRM: *Suggested method for deformability determination using a large flat jack technique*, Int. Jour. of Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 23 (1986), 131-140.
- [8] Hoek, E.: *Estimates of Rock Mass Strength and deformation modulus*, <http://www.rocsience.com/>, 2004.
- [9] Vrkljan, I.; Kavur, B.; Mehinrad, A.; Ghiassi, S.: *Rock Mass Deformability by Extra Large Flat Jack*, Plate Load and Dilatometer Testings, Proceedings of the 8<sup>th</sup> Int. Congress on Rock Mechanics, Tokyo, Vol. 1, 185-191, 1995.
- [10] Vrkljan, I., Kavur, B.: *Experience gained in rock mass deformability testing by large flat jacks*, Proceedings of the ISRM regional Symposium (Rock Mechanics-a Challenge for Society), Eurock 2001, Finland, Sarka and Eloranta (eds), 191-196.
- [11] Rocha, M.: *Rock Mechanics in Portugal*, Proc. of the 1<sup>st</sup> Congress of the ISRM. Lisboa, Vol. 121 – 132, 1966.
- [12] Rocha, M.: *New techniques for the determination of the deformability and state of stress in rock masses*, Int. Symp. on Rock Mechanics, Madrid, 289-302, 1968.
- [13] Pinto, L. J.: *Determination of the Deformability and State of Stress in Rock Masses*, Eurock '93, 669-673, 1993.
- [14] Pinto, L. J.: *Determination of the deformability modulus of weak rock masses by means of large flat jacks*, Proc. Int. Symp. on Weak Rock, Tokyo, 447-452, 1981..
- [15] Rocha, M.; Silva, J. N.: *A new method for the determination of deformability in rock masses*, Proc. of 2<sup>nd</sup> Congr. of the Int. Society for Rock Mechanics, Belgrade, Vol. 1, 423-437, 1970.
- [16] Bieniawski, Z. T.: *Rock mass classification in rock engineering*. Proc. of the symp: Exploration for rockengineering., Bieniawski ed., Balkema. Cape Town, 97-106, 1976.