

Primljen / Received: 20.9.2016.

Ispravljen / Corrected: 28.11.2016.

Prihvaćen / Accepted: 17.12.2016.

Dostupno online / Available online: 10.1.2017.

# Mjerenje posmične čvrstoće meke stijene u uvjetima laboratorijski simulirane rastrošbe

## Autori:

Dr.sc. **Goran Vlastelica**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Katedra za geotehniku

[goran.vlastelica@gradst.hr](mailto:goran.vlastelica@gradst.hr)Prof.dr.sc. **Predrag Mišćević**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Katedra za geotehniku

[predrag.miscevic@gradst.hr](mailto:predrag.miscevic@gradst.hr)**Nataša Pavić**, dipl.ing.geol.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Katedra za geotehniku

[nata.pavic@gmail.com](mailto:nata.pavic@gmail.com)

Izvorni znanstveni rad

**Goran Vlastelica, Predrag Mišćević, Nataša Pavić**

## Mjerenje posmične čvrstoće meke stijene u uvjetima laboratorijski simulirane rastrošbe

U radu je opisano određivanje promjene čvrstoće temeljeno na simuliranju procesa rastrošbe u laboratorijskim uvjetima, koristeći uzorke lapora iz flišne formacije s područja Dalmacije. Na temelju provedenih ispitivanja zaključeno je da je predloženi postupak simuliranja rastrošbe u laboratoriju provediv unutar prihvatljivih vremenskih okvira. Zbog uočene promjene parametara posmične čvrstoće na vrijednosti koje odgovaraju čvrstoći materijala koji se opisuje kao tlo, ponekad je potrebno, zbog raspona veličine opterećenja koje se nanosi u pojedinom tipu uređaja, koristiti i uređaje za tlo.

### Ključne riječi:

rastrošba, meka stijena, lapor, posmična čvrstoća, izravni posmik

Original scientific paper

**Goran Vlastelica, Predrag Mišćević, Nataša Pavić**

## Testing the shear strength of soft rock at different stages of laboratory simulated weathering

Determination of the change in strength based on simulation of weathering process in laboratory conditions is described in the paper, using marl samples taken from flysch formations in the region of Dalmatia. The testing has revealed that the proposed weathering simulation in laboratory can be conducted within acceptable time frames. Because of the observed change of shear strength parameters as related to values corresponding to the strength of material described as soil, it is sometimes necessary to use soil testing devices so as to take into account the load range applied in individual types of testing devices.

### Key words:

weathering, soft rock, marl, shear strength, direct shear

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

**Goran Vlastelica, Predrag Mišćević, Nataša Pavić**

## Messungen der Scherfestigkeit weichen Gesteins unter im Labor simulierten Verwitterungsbedingungen

In dieser Arbeit wird die Ermittlung von Änderungen der Scherfestigkeit weichen Gesteins aufgrund simulierter Verwitterungsprozesse unter Laborbedingungen an Mergelproben aus den Flysch-Formationen der Region Dalmatien beschrieben. Aufgrund der Untersuchungen geht hervor, dass das vorgeschlagene Verfahren zur Simulation der Verwitterung im Labor in vertretbarem Zeitrahmen durchgeführt werden kann. Bedingt durch den Einfluss von Änderungen der Scherfestigkeit auf die Festigkeit des Materials, das als Boden beschrieben wird, ist es manchmal notwendig bei großen Unterschieden der aufgetragenen Lasten, je nach Gerätetyp, auch Geräte für Bodenproben zu verwenden.

### Schlüsselwörter:

Verwitterung, weiches Gestein, Mergel, Scherfestigkeit, direktes Abscheren

## 1. Uvod

Trajnost stijene se definira kao sposobnost zadržavanja mehaničkih i fizičkih svojstava u traženom vremenskom periodu s obzirom na postavljene inženjerske zahtjeve uporabljivosti [1], bilo da je riječ o njenom utjecaju na konstrukciju, druge stijene u geološkoj sredini ili njene uporabne vrijednosti kao gradiva. Meke stijene su kao materijal podložne intenzivnoj promjeni inženjerskih svojstava u vremenu, od početnog svojstva stijene pri iskopu do prašinstvo - glinovitih ostataka na kraju procesa, koje se mogu uslijed vanjskih utjecaja manifestirati unutar nekoliko mjeseci do nekoliko godina. Upravo takvo svojstvo trajnosti odredilo je "u praksi" pojam meke stijene kao materijala koji se u nedirnutom stanju ponaša kao stijena (s donje granice područja koje pokrivaju čvrste stijene), ali koji se podvrgnut procesu rastrošbe, u konačnici razgradi u sitnozrni materijal, uz izraženu promjenu fizikalno - mehaničkih svojstava u odnosu na početno stanje.

Rastrošba se općenito dijeli u dvije dominantne grupe [2]: fizičku (mehaničku) i kemijsku rastrošbu. Fizička rastrošba podrazumijeva razaranje stijene u manje komade bez promjene mineralnog sastava, dok kemijska rastrošba rezultira razlaganjem strukture minerala, одноšenjem nekih od oslobođenih elemenata i/ili stvaranjem novih elemenata od ostataka koji reagiraju sa sastojcima iz okoline. U praksi se često definira i biološka rastrošba, međutim, budući da biološki procesi mogu uzrokovati i fizičke i kemijske promjene, najčešće se u literaturi svrstava kao podgrupa fizičkog i kemijskog trošenja [3].

Dominantni proces koji uzrokuje raspadanje lapora (razaranje strukturnih veza unutar materijala) na području Dalmacije je ponavljani proces sušenja i vlaženja, kao glavni uzrok fizičke rastrošbe, kombiniran s kemijskom rastrošbom na površini materijala i zidovima pukotina, tj. svim površinama koje su u izravnom dodiru s vodom. Iako se formalno razdvajaju, oba procesa se u pravilu događaju istovremeno i međusobno se nadopunjuju [4]. Nastajanje pukotina procesima fizičke rastrošbe povećava se površina na kojoj se mogu razvijati kemijski procesi. S druge strane, kemijska rastrošba zamjenjuje čvrste minerale sa slabim glinama ili porama, pri čemu čine materijal podložnijim fizičkoj rastrošbi.

Degradacija lapora očituje se i u mehaničkom smislu kroz smanjenje njegove čvrstoće. Postavlja se pitanje: Je li, nakon uvođenja procesa koji uzrokuju degradaciju, moguće izmjeriti taj trend promjene čvrstoće? Čvrstoća stijene se najčešće prikazuje na osnovi jednoosne tlačne čvrstoće (eng. *Uniaxial Compressive Strength* - UCS), određene u hidrauličnoj preši na uzorcima oblika valjka, te su sve poznate klasifikacije mekih stijena definirane upravo prema toj čvrstoći [5]. Međutim, taj postupak zahtijeva monolitan uzorak pravilnih dimenzija, kakav je teško dobiti kod uzorkovanja lapora. Pojedini autori [6, 7] kod uzorkovanja mekih stijena predlažu uporabu metode klesanja i brušenja stranica brusnim papirom kako bi dobili što idealniji uzorak. Međutim, te tehnike u praksi nije moguće primijeniti kod uzoraka podvrgnutih rastrošbi, stoga ta metoda nije pogodna za

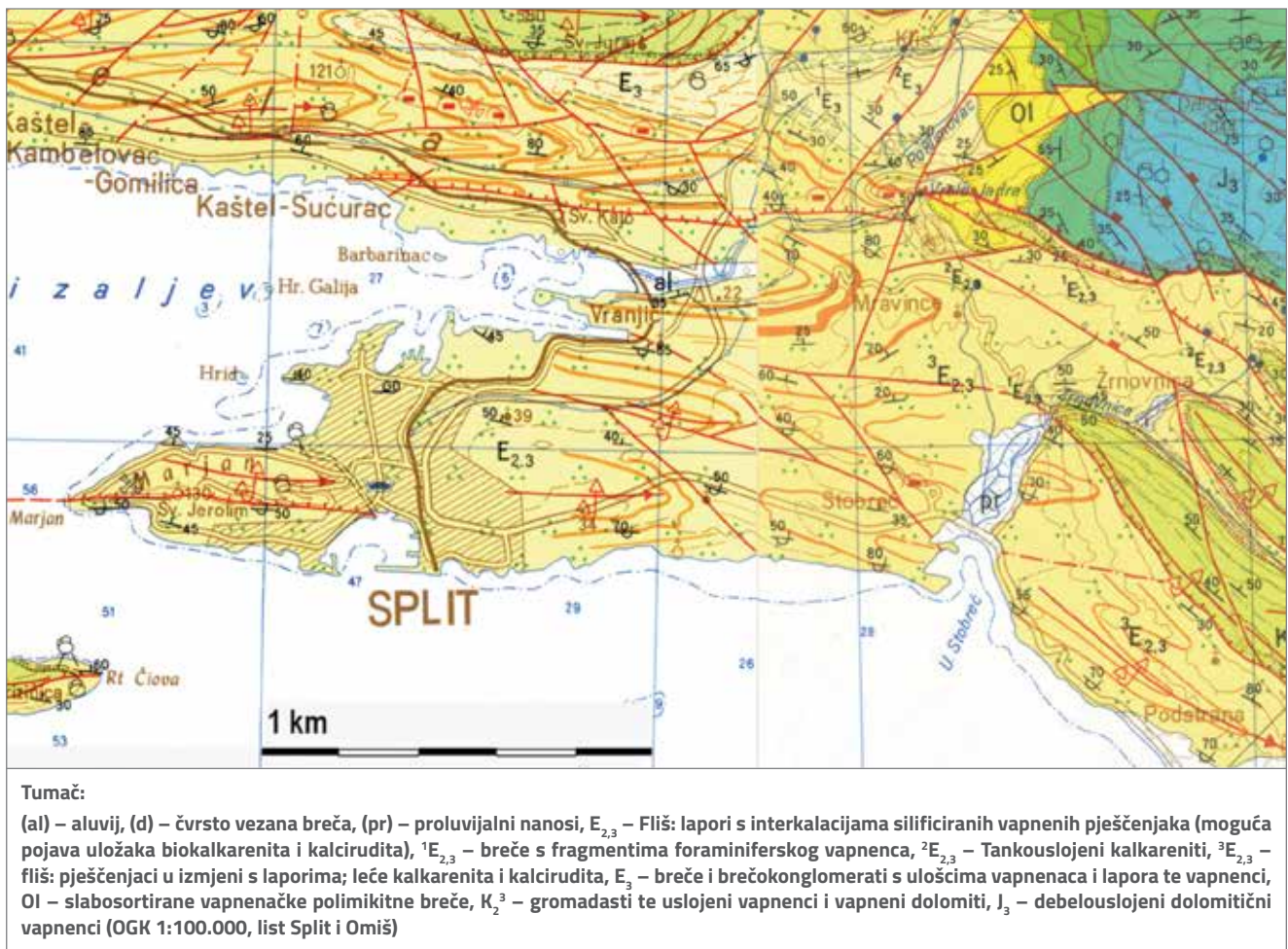
analizu promjene čvrstoće uslijed iste te je potrebno potražiti alternativu [4]. Sljedeći način kvantificiranja čvrstoće materijala je definiranje posmične čvrstoće, najčešće na osnovi Mohr - Coulombovog kriterija posmične čvrstoće. Međutim, i u ovom slučaju, klasična laboratorijska oprema nije prilagođena cijelom rasponu pojavnosti i stanja trošnosti lapora, te je potrebno osmisлити novu opremu prilagođenu samo ovom tipu materijala [8] ili prilagoditi postojeću opremu potrebama ispitivanja [9]. Budući da je upotreba postojeće opreme racionalnija s ekonomskoga gledišta, predlaže se jednostavniji pokus pomoću prijenosnog uređaja za izravni posmik stijene kojim se, uz manje modifikacije standardiziranog postupka [10], moguće testirati meke stijene u intaktnom i degradiranom stanju na uzorcima podvrgnutim laboratorijski simuliranom rastrošbom. Za rubne slučajeve (izrazito trošne lapore, podvrgnute velikom broju ciklusa rastrošbe) može se upotrijebiti uređaj za izravni posmik tla [11, 12], ali treba i jasno razlučiti kada je to prihvatljivo.

Poznavanje čvrstoće materijala u svim fazama uporabljivosti konstrukcije omogućava njezino racionalno oblikovanje, kao i smanjene troškove održavanja. Primjerice prilikom projektiranja građevnih jama, uz poznavanje atmosferskih prilika u pojedinom području, može se odabrati odgovarajuće rješenje koje je stabilno za traženi period bez dodatnih mjera zaštite pokosa [13]. Također, prilikom izgradnje zasjeka za potrebe prometnica ili platoa razne namjene [14], može se odabrati optimalan nagib koji isključuje potrebu za zaštitnom konstrukcijom, odnosno znatno smanjuje troškove održavanja tijekom uporabe.

## 2. Geološke postavke područja analiziranog primjera meke stijene

Fliš središnje Dalmacije je dio velikog flišnog bazena koji se prostire od Gorice u Italiji sve do Albanije [15]. U epohi eocena se razvija pirinejska orogenetska faza (nazvana prema Pirinejima zbog najznačajnijih naboranja u tom području), kao jedna od najznačajnijih tijekom alpske orogeneze. Tektonski pokreti iz tog geološkog razdoblja, zajedno s onim naknadnim, uzrokovali su oblik geoloških struktura na istočnoj obali Jadrana kakav vidimo i danas [16]. U geodinamskom pogledu, primarni odnosi slojeva su značajno izmijenjeni naknadnom navlačnom tektonikom. Posljedica tih tektonskih pokreta bilo je mjestimično jako suženje dijelova flišnog sedimentacijskog bazena u jadranskom pojasu i reducirano pojavljivanje tih stijena na površini terena [17], što dolazi do izražaja i u srednjoj i južnoj Dalmaciji. Na srednjodalmatinskom području te su naslage izdvojene na području Trogira, Kaštela i Splita te su definirane prema OGK (osnovna geološka karta) kao klastične i karbonatne naslage eocenskog fliša - E<sub>2,3</sub> (slika 1.).

Sa sjeverne strane flišne naslage pretežno su u anormalnom kontaktu s vapnencima Kozjaka iz doba krede, dok su na južnoj strani prekrivene Jadranskim morem. Prema petrološkim karakteristikama to su pretežito klastične naslage klasificirane kao vapnenačke breče, brečokonglomerati, kalciruditi, kalkareniti i biokalkareniti, kalcisiltiti i lapori. Lapori predstavljaju završne članove sekvenci u flišnoj seriji s



Slika 1. Osnovna geološka karta za šire područje grada Splita (Hrvatski geološki institut)

utvrđenom pojavnošću minerala kvarca, ilita, muskovita, plagioklasa, mikrolina i montmorilonita [18].

Šestanović [19] za naslage fliša na području grada Splita navodi da se sastoje od brečokonglomerata, breča, pješčenjaka, detritičnog vapnenca i lapora s različitim udjelom CaCO<sub>3</sub> sastavnice. Toševski [20] te iste članove flišnog slijeda dijeli na krupnozrnate i sitnozrnate (pelitne), pri čemu su krupnozrnati najčešće predstavljeni (bio) kalkruditima i (bio)kalkarenitima, brečama, konglomeratima i pješčenjacima, a pelitni članovi laporima i prahovnjacima. Krupnozrnati slojevi su zbog svog mineralnog sastava znatno otporniji rastrošbi nego sitnozrnati slojevi, čiji se intenzitet trošenja praktički može pratiti iz dana u dan. Upravo ta raznolikost članova te izraziti kontrast njihovih fizikalno - mehaničkih značajki (različita čvrstoća, različita otpornost na rastrošbu, itd.) kod zasjeka u flišnim stijenskim masama posebno ističe probleme trajnosti, različito stupnjevanje rastrošbe i lokalnih odranjanja [13, 21 - 23].

### 2.1. Fliš

Fliš je opisni termin za kompleks klastičnih sedimentnih stijena nastalih turbidnim (mutnim) tokovima, što može biti popraćeno

podmorskim klizanjima sedimentata koji su prethodno nastali brзом erozijom na kopnu [24]. Zbog svog sedimentnog podrijetla, naslage fliša su primarno postavljene vodoravno, međutim kao posljedica tektonskih procesa najčešće ih pronalazimo borane ili ukošene. Općenito, za flišne komplekse karakteristična je izmjena krupnozrnih i sitnozrnih sedimentata. Pojam krupnozrnatih struktura kod klastičnih stijena s geotehničkog aspekta najčešće obuhvaća psefitske strukture (veličine zrna > 2 mm) kao što su konglomerati i breče te psamitske (od 2 mm do 0,06 mm) kao što su pješčenjaci. Sitnozrnate strukture obuhvaćaju siltitske (od 0,06 do 0,002 mm) kao što su siltit i prapor ili les te pelitske (manje od 0,002 mm) u koju se ubraja i lapor [25].

### 2.2. Lapor

Lapor je po definiciji stijena na prijelazu između klastičnih i kemogenih (kristalastih) sedimentnih stijena jer sadrži klastični materijal dimenzije gline (< 0,002 mm) i karbonat (kalцит) izlučen iz otopine. Obično su svijetložute, sive, smeđe ili modrikaste boje, dok im uslojenost varira od nekoliko centimetara do nekoliko metara.

Tablica 1. Razredba karbonatnih stijena prema udjelu kalcita i glinovitih komponenti (prema EN 12407:2007) [27]

CaCO <sub>3</sub> [%]							
100	95	85	65	25	15	5	0
vapnenac	laporoviti vapnenac	vapnenački lapor	lapor	glinoviti lapor	laporovita glina	glina	
0	5	15	35	75	85	95	100
Nekarbonatna komponenta [%]							

Pretežni dio kalcita u laporima je kemogenog porijekla, tj. nastao je izlučivanjem iz morske ili jezerske vode, a manji dio je klastičan (karbonatni detritus - kršje) [26]. Laporom se obično smatra stijena koja sadrži između 15 i 85 % gline te 15 i 85 % karbonata (CaCO<sub>3</sub>), s pripadnim prefiksima opisanim u tablici 1. Lapor karakterizira njegov školjkasti lom i topivost u hladnoj solnoj kiselini (pri čemu se otapaju njegovi kalcitni dijelovi), te se ta činjenica najčešće uzima u obzir pri određivanju udjela karbonata postupkom kalcimetrije. Iako su lapori definirani kao smjesa gline i kalcita, u njima se najčešće nalazi i detritus dimenzija praha do sitnog pijeska. Pravi, čisti lapori izgrađeni samo od kalcita i gline razmjerno su vrlo rijetki. Detritus s dimenzijama praha uglavnom čine kvarc, feldspati i tinjci. Lapori koji uz glinu i kalcit sadrže i 10 - 30 % detritusa dimenzije praha, nazivaju se siltozni lapori, a ako uz silt sadrže i sitni pijesak, zovu se pjeskovito - siltozni lapori [26].

Lapori korišteni u ovom istraživanju preuzeti su s istih lokacija kao i u prethodnim studijama [28]. Prema mineraloškom sastavu, udjeli pojedinih minerala su u sljedećim rasponima: kalcit 40 - 77 %, dolomit 0 - 7 %, kvarc 3 - 11 %, plagioklas 1 - 9 %, klorit 0 - 9 %, smektit 6 - 20 %, vermikulit 0 - 6 % i tinjčasti minerali od 3 do 12 %. Naziv "tinjčasti minerali" upotrijebljen je za označavanje smjese koja vjerojatno sadrži illit i interstratificirani illit - smektit s malim udjelom smektitnih slojeva te možda muskovit.

### 3. Metodologija

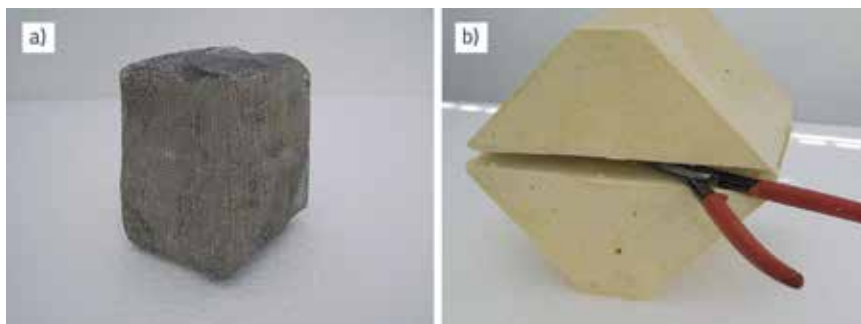
#### 3.1. Uzorkovanje i priprema za ispitivanje

Analizom procesa koji dovode do rastrošbe [2, 29] može se zaključiti da bitan utjecaj na razvoj većine procesa ima voda, koja svojim dugoročnim djelovanjem kroz različite procese dovodi do degradacije mehaničkih svojstava lapora. Iz tog je razloga analiza degradacije posmične čvrstoće, kao reprezentativnog i najznačajnijeg mehaničkog svojstva za geotehničko projektiranje, izvedena za utjecaj procesa sušenja i vlaženja [13]. Iako je vlaženje - sušenje dominantan proces, prezentiranom metodologijom su uključeni i ostali vodom indicirani procesi, iako nisu nužno kvantificirani.

Osnovni problem standardnih metoda ispitivanja je činjenica da se simuliranjem rastrošbe, uslijed intenzivnih promjena vlažnosti, testni uzorak vrlo brzo dezintegriira. Da bi se ispitivanje

moglo provesti, potrebno je osmisлити postupak pripreme uzoraka, kojim se bi se omogućila upotreba standardiziranih postupaka ispitivanja posmične čvrstoće, bilo da je riječ o prijenosnom uređaju za izravni posmik stijene ili uređaju za izravni posmik tla [10].

Prikupljanje uzoraka za ispitivanje provedeno je na širem području grada Splita sa svježe iskopanih zasjeka u otvorenim, sondažnim bušenjem u okviru trenutno izvođenih istražnih radova te u aktualnim iskopima građevnih jama. Uzorci su obrađeni piljenjem na dimenzije od približno 6 x 6 x 8 do 10 x 10 x 8 cm, bez upotrebe vode kako bi se onemogućio proces dezintegracije prije ispitivanja. Prije ugradnje u plaster za ispitivanje, uzorci su obavijeni metalnom mrežom koja se lako obavija oko uzorka (slika 2.a).



Slika 2. Priprema uzoraka za ispitivanje: a) uzorak obavijen mrežom prije ugradnje u plaster; b) primjer rezanja mreže ugrađenog uzorka u plaster za ispitivanje

Preliminarnim pokusima je utvrđeno, za raspon kvadratnih otvora oka od 0,5 do 10 mm, da je otvor oka mrežice od 2 mm najpogodniji. Odabrani otvor je dovoljno velik da plaster za ugradnju uzorka može prodrijeti do uzorka, a istovremeno dovoljno mali da se kod simuliranog procesa sušenja i vlaženja ne gubi znatna količina uzorka. Mreža se na uzorcima zadržava u postupku simulirane rastrošbe. Nakon ugradnje uzorka u uređaj za izravni posmik, neposredno prije početka ispitivanja, mreža se reže po unaprijed određenoj plohi smicanja (slika 2.b) kako bi se uklonio utjecaj čvrstoće mreže na rezultate ispitivanja.

#### 3.2. Indeksni pokazatelji ispitanih uzoraka

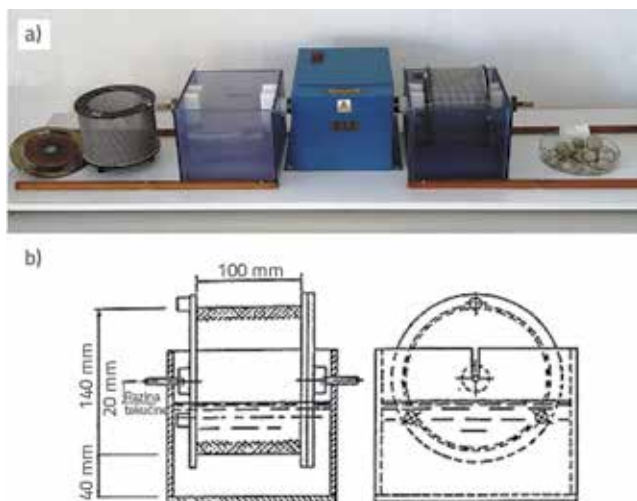
Na osnovi pregleda literature, zapažanja autora i kriterija jednostavnosti i dostupnosti laboratorijskog postupka, osim posmične čvrstoće materijala, na svim ispitanim uzorcima određena su sljedeća svojstva kao indeksni pokazatelji:

- udio karbonata u mineraloškom sastavu lapora
- upijanje vode
- suha jedinična težina stijene
- indeks točkaste čvrstoće
- indeks trajnosti (eng. "slake durability index" - SDI), [30]
- modificirani indeks trajnosti (eng. "loss slake index" - LSI), [31, 32].

Navedeni pokazatelji služe za procjenu maksimalnog uspravnog naprezanja, odnosno za procjenu podložnosti rastrošbi i odabir odgovarajućeg broja ciklusa. Njihova uporabna vrijednost je naknadno analizirana.

### 3.3. Indeksi trajnosti

Budući da su uzroci rastrošbe vrlo različiti, trenutačno ne postoji jedna mjerena veličina kojom bi se mogla opisati trajnost stijene, kao niti poopćenje na sve vrste stijena. Mnogi autori uveli su različite pokuse koji se općenito mogu podijeliti na statičke i dinamičke. Primjer statičkog pokusa je tzv. "Jar slake test" [33]. Glavni je nedostatak statičkih pokusa taj što su rezultati uglavnom opisni i ne vrednuju brojčani stupanj podložnosti rastrošbi. Zbog toga su u geotehničkim krugovima popularniji dinamički pokusi kao što je tzv. "Slake durability test" [30], te će se svi razmotreni indeksi trajnosti bazirati na varijantama ovog testa (slika 3.).



Slika 3. a) Uređaj za određivanje indeksa trajnosti stijene (Geotehnički laboratorij FGAG - a u Splitu); b) Dimenzije uređaja (ASTM, D4644 - 04, 2004)

Za normirano ispitivanje indeksa trajnosti odabire se 10 odlomaka stijene, na način da je ukupna masa uzorka oko 500 g. Odlomci trebaju biti približno oblika kocke, odnosno prilikom pripreme vrhovi uzorka trebaju biti zaobljeni. Nakon pripreme uzorak se smješta u standardizirani bubanj koji na vanjskom obodu ima sito s otvorima veličine 2 mm i suši se na temperaturi od 105 °C do stalnosti mase. Nakon sušenja bubanj s uzorkom

se hladi i vaganjem utvrđuje masa suhog uzorka te se ugrađuje u posudu s nosačem bubnja, gdje je djelomično uronjen u vodu. Bubanj se vrti brzinom od 200 okretaja u minuti tijekom 10 minuta. Nakon vrtnje, bubanj s uzorkom se suši i određuje masa preostalog uzorka. Postupak se može ponavljati po potrebi sve do potpunog gubitka mase. Također, može se varirati samo s vremenom trajanja ciklusa te kombinirano i s brojem ciklusa i vremenom trajanja. Indeks trajnosti  $I_{dn}$  nakon odabranog broja ciklusa izračunava se prema (1):

$$I_{dn} = \frac{m_n}{m_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

gdje su:

$m_0$  - masa uzorka na početku pokusa

$m_n$  - masa uzorka nakon  $n$  - tog ciklusa.

Prema Gambleu [30], najbolji pokazatelj trajnosti kod većine stijena je indeks dobiven nakon dva ciklusa vrtnje -  $I_{d2}$ . Pritom je moguće primijetiti da manje vrijednosti indeksa upućuju na mekše - nisko postojeće stijene, dok veće vrijednosti indeksa upućuju na tvrđe - postojeće stijene.

Međutim, dosadašnjim istraživanjima potvrđena je sumnja da ovako predložena razredba nije pogodna za sve vrste mekih stijena te se pojavila potreba za izmjenama ili dodatnim kriterijima. Jedan od načina je povećanje broja ciklusa na četiri ili više, pritom uzimajući jednu ili više vrijednosti kao mjerodavne. Drugi način je produženje trajanja uz zadržavanje samo jednog ciklusa vrtnje, a najpovoljnije je odabrati 10, 25, 60 i 120 minuta. U ovom slučaju indeks trajnosti se izračunava ovisno o vremenu trajanja prema (2):

$$SDI_{(vrijeme)} = \frac{m_{(vrijeme)}}{m_0} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

gdje su:

$m_0$  - masa uzorka na početku pokusa

$m_{(vrijeme)}$  - masa uzorka nakon ciklusa vrtnje za zadano vrijeme vrtnje (npr.  $m_{60}$  je masa uzorka nakon ciklusa od 60 min).

Iako se za izračun  $SDI_{(vrijeme)}$  indeksa najčešće koriste rezultati nakon jednog ciklusa vrtnje, nije isključeno koristiti dva ili više ponavljanja. U ovom radu koriste se rezultati nakon dva ciklusa ponavljanja, budući da se time dodatno naglašavaju razlike između različitih tipova lapora.

Odnos  $SDI_{10}/SDI_{(vrijeme)}$  predstavlja količinu materijala koji je rastrošen u promatranom vremenskom ciklusu vrtnje te je jedinstven za pojedini uzorak obrađen u ovom radu. Kad se omjer  $SDI_{10}/SDI_{(vrijeme)}$  prikaže na vremenskoj skali može se primijetiti da je stupanj zakrivljenosti regresijske krivulje različit za svaki materijal, ali i još važnije, stupanj zakrivljenosti se povećava u funkciji smanjenja trajnosti stijene [31]. Dakle, pomoću regresijske analize odnos između gore navedenih

Tablica 2. Prijedlog vizualne kategorizacije uzoraka nakon izvršena dva ciklusa vrtnje

Tip degradacije	Opis
I	Nakon dva ciklusa vrtnje, uzorak je gotovo nepromijenjen (početnih 10 komada), s eventualno malo sitnih komadića (ukupno 10 - 15) i s visokom vrijednosti indeksa trajnosti $I_{dt}$ (>95 %)
II	Nakon dva ciklusa, dio uzorka se znatno usitnio (ukupno 15 - 50 komadića) dok dio većih početnih komada ostaje nepromijenjen
III	Nakon dva ciklusa, uzorak sadrži samo sitne komadiće (više od cca 200), svi početni komadi su u potpunosti usitnjeni

vrijednosti može se opisati sljedećom logaritamskom funkcijom:

$$\log\left(\frac{SDI_{10}}{SDI_{(vrijeme)}}\right) = LSI(t - 10) \tag{3}$$

gdje je LSI - novi indeks trajnosti nazvan "modificirani indeks trajnosti". LSI predstavlja stupanj zakrivljenosti regresijske krivulje na dijagramu  $SDI_{10}/SDI_{(vrijeme)}$  - vrijeme trajanja ciklusa.

Ako se rezultati iscrtaju u polulogaritamskoj skali, LSI predstavlja nagib linije koja prolazi kroz točku (10,0). Za razliku od SDI indeksa koji je izražen na skali od 0 do 100, gdje nisko postojani materijali preuzimaju manje vrijednosti a visoko postojani veće, u ovom slučaju visoko postojani materijali uzimaju vrijednosti manje vrijednosti (teže prema nuli), dok nisko postojani materijali preuzimaju veće vrijednosti. Posebnost ovakvog iskaza je u tome što je rezultat prikazan u razlikama koje se broje u redu veličina (od 0,001 do 10) te su kao takve razumljivije i jednostavnije ih je interpretirati.

U ovom radu, uz prethodno navedene indekse, primjenjuje se i vizualni pregled ostatka u bubnju nakon obavljenog testa trajnosti, nakon dva odnosno četiri ciklusa vrtnje (prema ASTM, D4644 - 04, 2004), a objašnjen je u tablici 2. i prikazan na slici 4.



Slika 4. Primjer ostatka nakon 4. ciklusa vrtnje za tri tipa lapora: a) Tip I; b) Tip II; c) Tip III [28]



Slika 5. Simulacija procesa rastrošbe u laboratoriju sušenjem i vlaženjem uzorka u ciklusima: a) sušenja uzorka u sušioniku 24 sata; b) hlađenje uzorka pri laboratorijskoj temperaturi zraka; c) uranjanje uzorka u vodu na 24 sata; d) nakon odabranog broja ponavljanja a) do c) i ugradnje uzorka u plaster za ispitivanje izvodi se smicanje u prijenosnom uređaju za izravni posmik

### 3.4. Laboratorijsko simuliranje rastrošbe

Simulacija procesa rastrošbe u laboratoriju izvodi se sušenjem i vlaženjem uzorka u ciklusima. Jedan ciklus se sastoji od sljedećih faza (slika 5.):

- a) sušenja uzorka u sušioniku 24 sata pri konstantnoj temperaturi 105 °C
- b) hlađenja uzorka pri laboratorijskoj temperaturi zraka (24 h)
- c) uranjanja uzorka u vodu (24 h).

Nakon svakog ciklusa uzorci se važu i uspoređuju s početnom masom. Neke meke stijene mogu znatno degradirati ovim postupkom, te se nakon samo dva ciklusa raspadnu u prašinsti materijal koji prolazi kroz otvore mrežice. Stoga je odabrano da gubitak mase zabilježen vaganjem ne smije biti veći od 5 % početne mase uzorka. Materijale koji imaju veći gubitak mase nije moguće testirati u prijenosnom uređaju za izravni posmik stijene, već se za degradiranu fazu koristi uređaj za izravni posmik tla.

Broj ciklusa ovisi o vrsti materijala, odnosno o njegovoj podložnosti rastrošbi. U tu svrhu može se koristiti jednoosna tlačna čvrstoća materijala, kao jedan od pokazatelja podložnosti rastrošbi, ali i kao mjerilo na temelju kojeg se utvrđuje raspon uspravnog opterećenja korištenog pri ispitivanju. Određivanje jednoosne tlačne čvrstoće često je nepraktično (problemi s uzorkovanjem) za ove materijale te se za njenu procjenu u ovom radu koristi indeks točkaste čvrstoće. Osim indeksa točkaste čvrstoće, često se koristi i podatak o količini karbonata u stijeni. Jedno ispitivanje sastoji se od 4 serije uzoraka, pritom svaka serija sadrži najmanje 5 ispitnih primjeraka (ukupno najmanje 20 uzoraka). Prva serija se

testira pri prirodnoj vlažnosti materijala, dok se kod svake sljedeće serije povećava broj ciklusa sušenja i vlaženja. Za lapore koje se prema indeksu trajnosti [28] može svrstati u tip I koriste se dva, četiri, osam, pa i više ciklusa. Za tip II pokazalo se dovoljnim (mogućim) primijeniti jedan, dva i tri ciklusa. Za tip III ispitivanje na rastrošenim uzorcima nije moguće provesti u uređaju za izravni posmik stijene, osim za granične slučajeve s većim udjelom karbonata. Za tip III lapora preporučuje se upotreba uređaja za izravni posmik tla [11] na uzorcima podvrgnutim laboratorijski simuliranom rastrošbom.

### 3.5. Parametri posmične čvrstoće

Određivanje parametara posmične čvrstoće lapora urađeno je postupkom izravnog posmika prema preporukama ISRM - a [10] na intaktnom uzorku i na uzorcima u različitim stupnjevima rastrošbe, uz primjenu dodatka propisanom postupku i postupka simuliranja razvoja mehaničke rastrošbe u laboratoriju.

Ispitivanja su provedena na kompaktnim uzorcima bez uočljivih međuslojnih pukotina (uzorci izvađeni između dvije međuslojne pukotine, koji nisu sadržavali uočljive pukotine na svojoj površini). Procjena raspona maksimalnog naprezanja okomitog na kliznu plohu obavljena je uvidom u udio karbonata, indeksa rastrošbe nakon drugog ciklusa ispitivanja i indeksa točkaste čvrstoće. Posmična čvrstoća analizirana je prema Mohr-Coulombovom kriteriju posmične čvrstoće (4)

$$\tau_f = c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (4)$$

pri čemu su:

$\tau_f$  – posmično naprezanja pri slomu

$c$  – kohezija

$\sigma_n$  – naprezanje okomito na kliznu plohu

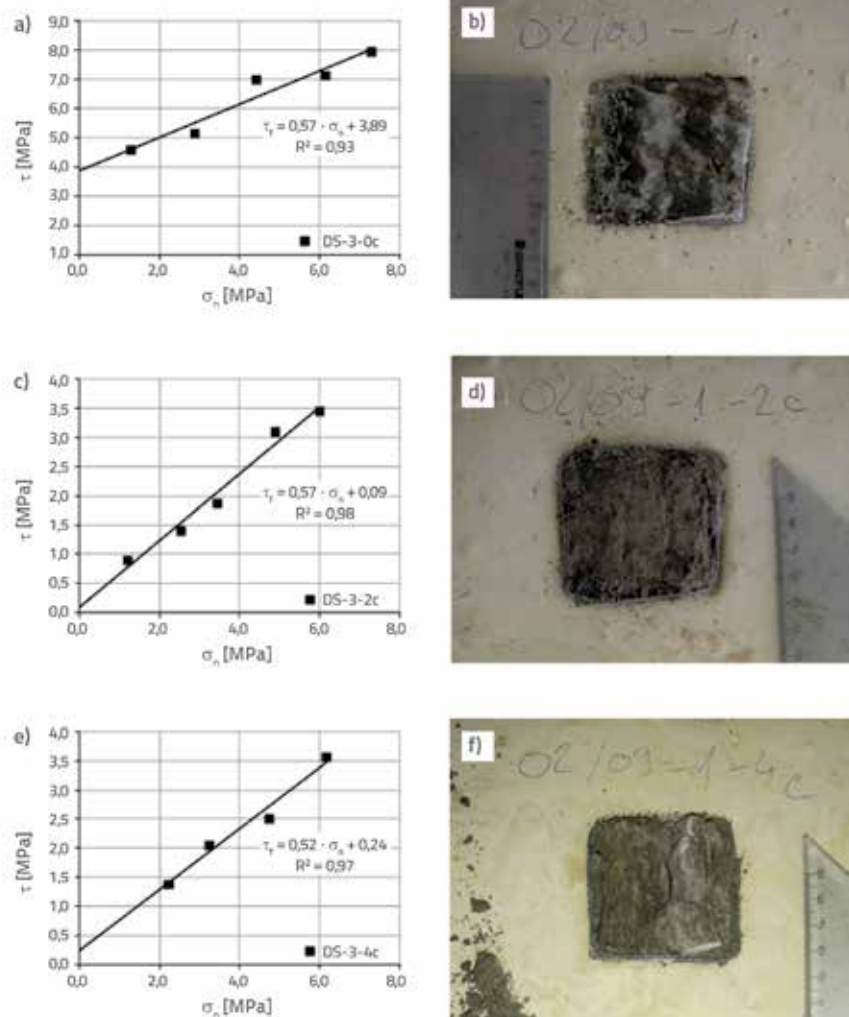
$\varphi$  – kut unutarnjeg trenja.

Efektivna naprezanja su jednaka totalnim, budući da je porni tlak  $u = 0$  za vrijeme izvođenja pokusa.

## 4. Rezultati

Dobiveni rezultati parametara posmične čvrstoće prema Mohr-Coulombovom zakonu (4) čvrstoće prikazani su u tablici 3., a primjer analize rezultata za jedno ispitivanje prikazan je na slici 6. Parametri su određeni primjenom metode najmanjih kvadrata pomoću pravca kroz izmjerene vrijednosti posmičnog otpora pri lomu

uzoraka iz serije. Odabir najvećeg broja ciklusa sušenja - vlaženja ovisio je o trenutku kada su se uzorci počeli u potpunosti raspadati, odnosno kada se nije mogla zadržati njihova cjelovitost niti uz pomoć mrežica. Veličina promjene prikazanih vrijednosti kohezije, koja nije konzistentna s brojem ciklusa ispitivanja, posljedica je točnosti korištenog mjernog uređaja, točnosti primijenjenog postupka interpolacije kroz dobivene rezultate, ali i činjenice da svi uzorci nisu nužno potpuno jednaki, iako su uzeti iz jednog sloja. U tablici 4. prikazani su rezultati izravnog posmika potpuno dezintegriranog/rastrošenog lapora u uređaju za izravni posmik tla. Dio uzoraka je dobiven na način da je dezintegrirani materijal ugrađen pri optimalnoj vlažnosti dobiven Proctorovim pokusom, a dio uzoraka je dobiven direktnom upotrebom sedimenta iz uređaja za pokus trajnosti stijene. Sediment je formiran tijekom produženog rada uređaja za pokus trajnosti stijene, sve dok nije formirana dovoljna količina uzorka za ugradnju u ćeliju za



Slika 6. Rezultati izravnog posmika za uzorak DS - 3, lokacija Trstenik, Split: a) za prirodnu vlažnost - 0 ciklusa; b) primjer plohe loma iz seta za prirodnu vlažnost; c) nakon dva ciklusa laboratorijski simulirane rastrošbe; d) primjer plohe loma iz seta nakon dva ciklusa laboratorijski simulirane rastrošbe; e) nakon četiri ciklusa laboratorijski simulirane rastrošbe; f) primjer plohe loma iz seta nakon četiri ciklusa laboratorijski simulirane rastrošbe

Tablica 3. Parametri posmične čvrstoće ispitanih uzoraka lapora u uvjetima laboratorijski simulirane rastrošbe (ispitano u uređaju za izravni posmik stijene)

Oznaka uzorka	DS - 8	DS - 6	DS - 7	DS - 3	DS - 10	DS - 9	DS - 2	DS - 1	DS - 4	DS - 5		
CaCO <sub>3</sub> [%]	40,20	44,44	49,32	54,63	63,18	65,60	69,87	71,59	76,06	77,01		
Upijanje [%]	7,50	8,59	11,00	8,40	7,72	4,59	3,86	4,24	1,50	2,46		
$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	22,9	21,8	21,3	23,5	23,4	23,2	24,6	24,7	25,3	25,6		
$I_{d2}$ [%]	98,18	89,75	88,48	76,04	78,80	97,24	98,66	98,68	98,88	98,76		
$I_{d4}$ [%]	97,23	84,11	80,17	42,22	46,76	96,37	97,8	97,7	98,27	97,98		
$I_{s(50)}$	0,615	1,071	0,356	0,666	1,246	1,823	1,952	1,211	3,831	2,802		
Tip	III	II	III	III	III	II	I	I	I	I		
Ciklus	Parametar											
0	c [MPa]	Naliježe	1,4	0,4	3,9	0,8	1,5	6,3	5,5	4,9	N/A	
	$\phi$ [°]		29,7	34,4	29,6	36,8	46,1	40,0	40,9	49,0		
1	c [MPa]		0,2	Naliježe	-	0,0	-	-	-	-	-	
	$\phi$ [°]		37,1		-	37,8	-	-	-	-	-	
2	c [MPa]		0,1		0,1	-	1,3	4,6	2,2	5,2		
	$\phi$ [°]		36,4		29,7	-	39,5	34,4	39,3	44,8		
4	c [MPa]		0,1		0,2	Naliježe	1,1	-	-	N/A		
	$\phi$ [°]		25,0		27,7		41,7	-	-			
8	c [MPa]		-		0,2		0,6	-	-			
	$\phi$ [°]		-		31,2		43,8	-	-			

N/A - ispitivanje nije provedeno prema planu ispitivanja zbog pucanja platera za imobilizaciju uzorka u čeliji naviše od 60 % uzoraka u seriji "Naliježe" - gornja kutija se naslanja na donju [velika deformacija uzorka pod tlačnom silom – slijeganje] te su rezultati odbačeni

Tablica 4. Parametri posmične čvrstoće lapora u uvjetima laboratorijski simulirane rastrošbe (ispitano u uređaju za izravni posmik tla)

Oznaka uzorka	CaCO <sub>3</sub> [%]	$I_{d2}$ [%]	Upijanje [%]	Optimalna vlažnost [%]	c [kPa]	$\phi$ [°]	Napomena:
DSS - 20 (Proctor)	64,3	72,8	9,8	14,2	17,7	25,2	prosijano kroz sito 0,85 mm
DSS - 20 (sediment)					3,8	23,7	sediment u SDI pokusu
DSS - 21 (Proctor)	49,8	26,4	20,8	14,3	1,5	26,3	prosijano kroz sito 0,85 mm
DSS - 21 (sediment)					0,2	18,6	sediment u SDI pokusu

izravni posmik tla gdje je, nakon što se uzorak konsolidirao pod vlastitom težinom 24 sata, provedeno ispitivanje prema standardnom postupku za izravni posmik tla [11].

## 5. Rasprava

Prema rezultatima prikazanim u tablici 3. za uzorke DS - 1, DS - 2, DS - 4 i DS - 5, s rasponom udjela karbonata 70 - 77 %, koji se prema analizama trajnosti mogu svrstati u tip I, vidljivo je da su rezultati bez simulirane rastrošbe konzistentni s rezultatima prethodno provedenih istražnih radova i ispitivanja. Primjerice Šestanović i dr. [34] navode prosječne vrijednosti parametara posmične čvrstoće za lapore (tablica 5.) s udjelom CaCO<sub>3</sub> > 75 % u iznosu  $\phi = 48^\circ$  i  $c = 3$  MPa, odnosno  $\phi = 40^\circ$  i  $c = 2$  MPa za lapore s udjelom CaCO<sub>3</sub> u rasponu od 65 - 75 %.

Tablica 5. Naprezanje pri slomu monolitnih uzoraka lapora, [34]

Parametar	Količina CaCO <sub>3</sub> komponente [%]			
	> 75	75 - 65	65 - 50	50 - 35
Kohezija c [kPa]	3000	2000	1100	100
Kut unutarnjeg trenja $\phi$ [°]	48	40	28,5	20
Prostorna težina lapora $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	24,0	24,0	24,0	18,5

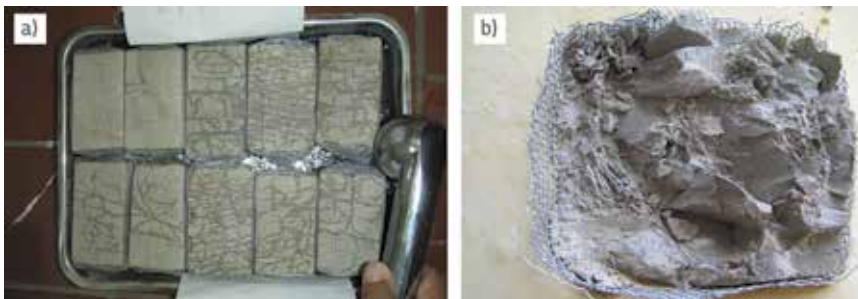
Uzorcima tipa I s manjim udjelom CaCO<sub>3</sub> (DS - 1 i DS - 2) upućuju na trend smanjenja posmične čvrstoće tijekom dva ciklusa



simulirane rastrošbe, dok kod uzoraka s većim udjelom  $\text{CaCO}_3$  značajnije promjene nema. Štoviše, zbog velike čvrstoće lapora kod većeg broja uzoraka dolazi do sloma platera kojim je uzorak imobiliziran te su serije, u kojima najmanje 3 ispitivanja nisu prihvaćena, odbačene (oznaka N/A).

Za uzorke DS - 6 i DS - 9 s udjelom karbonata 44,4 % odnosno 65,6 %, koji se prema analizama trajnosti mogu svrstati u tip II, vidljivo je da su rezultati bez simulirane rastrošbe konzistentni s podacima iz literature [34].

Kod uzorka DS - 6 je može se primijetiti da s povećanjem broja ciklusa sušenja i vlaženja nije dobiven očekivani dosljedni pad čvrstoće (prema kutu unutarnjeg trenja). Vizualnim pregledom raspadnutog uzorka nakon ispitivanja u takvim slučajevima se uočava da sadrži više ili manje sekundarnih pukotina (vidi prikaz na slici 7.) koje prolaze pojedinim uzorkom, a koje prije ispitivanja nisu uočene vizualnim pregledom na površini uzorka.



Slika 7. a) Raspucanost uzorka DS - 6 (prije ugradnje) prilikom vlaženja kod drugog ciklusa rastrošbe; b) Primjer plohe loma nakon dva ciklusa rastrošbe

Svojestven za ovakve uzorke je i porast vrijednosti kuta trenja nakon prvog ciklusa sušenja i vlaženja. Vizualni pregled takvih uzoraka nakon ispitivanja pokazuje da se uzorak raspao na niz krupnih komada (slika 7.a), ali oslabljenje (raspadanje) nije zahvatilo materijal u dubini (slika 7.b). Dio fragmenta s površine prikazanog uzorka otpao je uslijed smicanja i rastavljanja dijelova uzorka te se ne uočava kontinuirana ploha loma. Uzorak se pri smicanju ponaša kao dobro građirani zbijeni šljunak, što je mogući uzrok porasta vrijednosti kuta trenja.

Kod uzorka DS - 9 se može primijetiti da s povećanjem broja ciklusa sušenja i vlaženja nije dobiven očekivani dosljedni pad kuta unutarnjeg trenja te da se njegovo ponašanje može opisati na sličan način kao i kod uzoraka DS - 1 i DS - 2, što s obzirom na njegov udio karbonata od 65,6 % ima smisla, bez obzira na to što je prema trajnosti svrstan u tip II.

Za uzorke DS - 3, DS - 7, DS - 8 i DS - 10, s udjelom karbonata u rasponu od 40,2 % do 63,2 %, koji se prema analizama trajnosti mogu svrstati u tip III, također je vidljivo da su rezultati bez simulirane rastrošbe usklađeni s podacima iz literature [9, 13, 34]. Kod uzorka DS - 3 i DS - 10, s udjelom karbonata 54,63 % odnosno 63,18 %, zanimljivo je uočiti da se kut unutarnjeg trenja gotovo ne mijenja s primijenjenim ciklusima sušenja - vlaženja, a dobivena veličina odgovara vrijednostima koje su dobivene ispitivanjem niza drugih uzoraka lapora s približno istim udjelom karbonata. Komponenta kohezije se značajno

mijenja nakon prvih nekoliko ciklusa sušenja - vlaženja, a nakon toga nema promjene u redu veličine s obzirom na primijenjeni broj ciklusa. Pri većem broju ciklusa pojavljuje se problem nalijeganja gornje čelije na donju kod većeg iznosa naprezanja okomitog na kliznu plohu. Uzrok nalijeganja je znatna degradiranost uzorka, te su serije u kojima najmanje tri ispitivanja nisu regularna odbačene (oznaka "Naliježe"). Kod uzoraka DS - 7 i DS - 8, s udjelom karbonata 49,32 % odnosno 40,20 %, problem nalijeganja

očituje se i tijekom ispitivanja bez simulirane rastrošbe, pa takva ispitivanja treba provoditi s većim brojem uzoraka. Također, ispitivanja na uzorcima sa simuliranom rastrošbom nije bilo moguće provesti u uređaju za izravni posmik stijene.

Uzorci koji su još uvijek dovoljno cjeloviti da se na njima mogu provoditi mjerenja nakon simulirane rastrošbe, pokazuju rezultate posmične čvrstoće koji se približavaju vrijednostima dobivenim za laporovitu glinu [13] i degradiranog lapora ispitivanog u uređaju za izravni posmik tla (tablica 4.).

Tablica 6. Smjernice za primjenu postupka laboratorijski simulirane rastrošbe na mekim stijenama

Tip	Primjenjivost uređaja za izravni posmik stijene		Simulacija rastrošbe u laboratorijskim uvjetima	
	Bez simulacije rastrošbe	Sa simuliranom rastrošbom	Preporučeni maks. broj ciklusa	Napomena
Tip I	Da	Da	> 8	-
Tip II	Da	Da	do 8 (4*)	Za veći broj ciklusa preporučuje se koristiti uređaj za izravni posmik tla
Tip III	Da	Ograničeno	1**	Preporučuje se koristiti uređaj za izravni posmik tla

\* - Za lapore tipa II koji graniče s tipom III (općenito s manjim udjelom  $\text{CaCO}_3$  ili  $LSI \approx 0,5$ ) preporučuju se maksimalno 4 ciklusa laboratorijski simulirane rastrošbe.

\*\* - Za izravni posmik intaktne stijene upotrebljava se uređaj za izravni posmik stijene, a za laboratorijski simuliranu rastrošbu preporučuje se maksimalno jedan ciklus, odnosno upotreba uređaja za izravni posmik tla.

\*\*\* - Kao dodatni kriterij pri odabiru postupka treba se koristiti informacijama o udjelu  $\text{CaCO}_3$ , upijanju,  $I_{d4}$  ili LSI indeksu stijene [32]. Može li se prema tome zaključiti da je lapor na granici dviju kategorija, preporučuje se usvojiti postupak za kategoriju više, te ga po potrebi korigirati tijekom postupka.

## 6. Zaključak

Provedena ispitivanja posmične čvrstoće radi formiranja statistički reprezentativnog uzorka za koreliranje s indeksnim svojstvima nisu dovoljna, ali su funkcionalna da se utvrde prijedlozi smjernica za ispitivanje posmične čvrstoće mekih stijena, kao što su lapori. Uzimajući u obzir značajnu količinu potrebnog uzorka za provedbu ispitivanja, kao i potrebno vrijeme (oko 25 radnih dana za jednu seriju ispitivanja), prikazani rezultati značajan su doprinos unaprjeđenju metodologije ispitivanja kao podloge za razumijevanje ponašanja lapora kod složenih inženjerskih situacija.

Određivanje parametara posmične čvrstoće intaktnog uzorka provedeno je na grupama uzoraka pri različitim stupnjevima rastrošbe, uz primjenu dodatka standardiziranom postupku i simuliranjem razvoja mehaničke rastrošbe u laboratoriju. Rezultati

ispitivanja ukazuju na grupiranje uzoraka dosljedno s prijedlogom kategorizacije prikazane u tablici 2., uz određena ograničenja u graničnim slučajevima koji su opisani uz napomene u tablici 6.

U konačnici se može zaključiti da je predloženi postupak simuliranja rastrošbe u laboratoriju provediv i unutar vremenski prihvatljivih okvira. Ispitivanje se može provesti u prijenosnom uređaju za izravni posmik stijene, uz ograničenja za tip III lapora, gdje se za testiranja na degradiranom materijalu preporučuje upotreba uređaja za izravni posmik tla.

## Zahvala

Prikazani rezultati proizašli su iz znanstvenog projekta "Modeliranje rastrošbe za potrebe proračuna geotehničkih konstrukcija u flišu", koji se provodio uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske.

## LITERATURA

- [1] Latham, J.P., Wang, H., Poole, A.B.: Choice of rock in maritime engineering, *Coastal, Estuarial and Harbour Engineers Reference Book*, Editors: Abbott, Price, Publisher: Chapman and Hall, pp. 523 - 539, 1993.
- [2] Fookes, P.G., Gourley, C.S., Ohikere, C.: Rock weathering in engineering time, *Quar. J. of Eng. Geol.*, 21 (1988), pp. 33 - 57, <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1988.021.01.03>
- [3] Gulam, V.: *Erozija ogolina u flišu središnje Istre*, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko - geološko - naftni fakultet, Zagreb, 2012.
- [4] Mišćević, P., Vlastelica, G.: Shear strength of weathered soft rock – proposal of test method additions. *Proc. Reg. Sym. on Rock Eng. in Diff. Gr. Cond. – Eurock 2009*, Cavtat, Croatia, pp. 303 - 308. Leiden: CRC Press/Balkema, 2009.
- [5] Kanji, M.A.: Critical issues in soft rocks, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6 (2014), pp. 186–195, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.04.002>
- [6] Agustawijaya, D.S.: The Uniaxial Compressive Strength of Soft Rock, *Civil Engineering Dimension*, 1 (2007) 9, pp. 9–14.
- [7] Akai, K.: Testing methods for indurated soils and soft rocks – Interim report, *Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks*, Anagnostopoulos et al. (Eds.), Balkema, pp. 1707 - 1736, 1997.
- [8] Zhang, B.Y., Zhang, J.H., Sun, G.L.: Development of a Soft - Rock Weathering Test Apparatus. *Experimental Techniques*, 38 (2014) 2, pp. 54 - 65.
- [9] Mišćević, P., Vlastelica, G.: Shear strength of artificially weathered marl. *Proc. Reg. Sym. on Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering – Eurock 2010*, Lausanne, Switzerland, pp. 119 - 122, Leiden: CRC Press/Balkema, 2010.
- [10] ISRM, *Suggested methods for determining shear strength*, 1974.
- [11] Roje - Bonacci, T.: Parameter changes after weathering of soft rock in flysch, *Proc. Int. Sym. on Hard Soils - Soft Rock*, Naples, Italy, pp. 799 - 804, 1998.
- [12] Vivoda Prodan, M., Mileusnić, M., Mihalić Arbanas, S., Arbanas, Ž.: Influence of weathering processes on the shear strength of siltstones from a flysch rock mass along the northern Adriatic coast of Croatia, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, pp. 1–17, 2016, <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0881-7>
- [13] Mišćević, P., Vlastelica, G.: Stabilnost u vremenu kosine iskopane u laporu, *Građevinar*, 64 (2012) 6, pp. 451 - 461.
- [14] Berisavljević, Z., Berisavljević, D., Čebašek, V.: Shear strength properties of Dimitrovgrad flysch, Southeastern Serbia, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74 (2015) 3, pp.759 - 773.
- [15] Marinčić, S.: Eocenski fliš jadranskog pojasa. *Geološki vjesnik*, Zagreb, 34 (1981), pp. 27 - 38.
- [16] Korbar, T.: Orogenic evolution of the External Dinarides in the NE Adriatic region: a model constrained by tectonostratigraphy of Upper Cretaceous to Paleogene carbonates, *Earth - Science Reviews*, 96 (2009), pp. 296–312, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.07.004>
- [17] Velić, I., Vlahović, I.: *Geološka karta Republike Hrvatske 1:300.000*. Geološki institut, Zagreb, 2009.
- [18] Marinčić, S., Magaš, N., Borović, I.: *Osnovna geološka karta - Tumač za listove Split i Primošten*. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, 1967.
- [19] Šestanović, S.: Engineering – geological characteristics of marl from Eocene flysch in the City of Split, Croatia. *The Geotechnics of Hard Soils – Soft Rocks*, Evangelista i Picarelli (eds.), Balkema, Rotterdam, pp. 311 – 314, 1998.
- [20] Toševski, A., Grgec, D., Padovan, D.: Osnovno o genezi, sastavu i trošenju eocenskog fliša hrvatskog obalnog pojasa. *Rudarsko - geološko - naftni zbornik*, 25 (2012), pp. 47 - 62.
- [21] Eberhardt, E., Thuro, K., Luginbueh, M.: Slope instability mechanisms in dipping interbedded conglomerates and weathered marls—the 1999 Ruffi landslide, Switzerland. *Engineering Geology*, 77 (2005), pp. 35–56, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.08.004>

- [22] Martinez - Bofill, J., Corominas, J., Soler, A.: Behaviour of the weak rock cut slopes and their characterization using the results of the slake durability test, *Proc, Engineering geology for infrastructure planning in Europe – a European perspective*, pp. 405 - 413, 2004.
- [23] Šestanović, S., Štambuk, N., Samardžija, I.: Control of the Stability and Protection of Cut Slopes in Flysch. *Geolog. Croat*, 47 (1994) 1, pp. 139 - 148.
- [24] Vlahović, T.: *Geologija za građevinare*. Sveučilište u Splitu, Građevinsko - arhitektonski fakultet. pp. 295, 2010.
- [25] Šestanović, S.: *Osnove geologije i petrografije*. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, 2001.
- [26] Tišljar, J.: *Petrologija sedimentnih stijena*. Rudarsko geološko naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, pp. 242, 1987.
- [27] ISRM Turkish National Group: *The complete ISRM Suggested methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974 - 2006*. Ulusay, R., Hudson J.A. (Editors). Ankara, Turkey, 2007.
- [28] Mišćević, P., Vlastelica, G.: Durability Characterization of Marls from the Region of Dalmatia, Croatia. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29 (2011), pp. 771 - 781, <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9416-y>
- [29] Gökçeoğlu, C., Ulusay, R., Sönmez, H.: Factors affecting the durability of selected weak and clay - bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles, *Engineering Geology*, 57 (2000), pp. 215 - 237, [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00031-4)
- [30] Gamble, J.C.: *Durability - plasticity classification of shales and other argillaceous rock*. Ph.D. thesis, University of Illinois, 1971.
- [31] Bryson, L.S., Gomez - Gutierrez, I.C., Hopkins, T.C.: Development of a New Loss Slake Durability Index for Compacted Shales, *Engineering Geology*, 139 - 140 (2012), pp. 66 - 75.
- [32] Vlastelica, G., Mišćević, P., Salvezani, D.: Loss slake index evaluation and its applicability to marl. *EUROCK 2013 - Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment*, Kwasniewski, M., Lydzba, D. (Editors), Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 363 - 367, 2013.
- [33] Santi, P.M.: Improving the jar slake, slake index, and slake durability tests for shales. *Environmental and Engineering Geoscience*, 4 (1998) 3, pp. 385 - 396.
- [34] Šestanović, S., Čagalj, M., Barčot, D., Urli, M.: Geotehnički radovi za temeljenje naselja "Pujanke" u Splitu, *Građevinar*, 36 (1983) 9, pp. 371 - 376.