

Primljen / Received: 12.10.2023.

Ispravljen / Corrected: 3.12.2025.

Prihvaćen / Accepted: 22.5.2026.

Dostupno online / Available online: 10.6.2026.

Eksperimentalno ispitivanje meke stijene po diskontinuitetima u uvjetima ovisnim o vremenu

Autori:

Mr.sc. **Miodrag Bujišić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Crne Gore, Crna Gora

Građevinski fakultet

miodragb@ucg.ac.me

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Zvonko Tomanović**, dipl.ing.građ.

GeoT d.o.o Podgorica, Crna Gora

zvonko@geot.me

Prethodno priopćenje

Miodrag Bujišić, Zvonko Tomanović

Eksperimentalno ispitivanje meke stijene po diskontinuitetima u uvjetima ovisnim o vremenu

U okviru eksperimentalnih istraživanja posmične otpornosti po diskontinuitetu pri o vremenu ovisnim uvjetima provedeni su pokusi na tri uzorka meke stijene, laporovitoga vapnenca koja su uzorkovana iz otvorenoga bazena u Pljevljima. Uzorci su istih geometrijskih karakteristika, pravilnoga prizmatičnog oblika, pri čemu je na svakom oblikovana umjetna pukotina, koju odlikuju različite hrapavosti ploha diskontinuiteta (glatka, valovita i umjereno hrapava). Uzorci su ispitivani u laboratorijskim uvjetima, pri čemu je postojeća oprema modificirana i izrađen je dio nove opreme da bi se izveo primjeren eksperiment. Imajući u vidu skroman broj eksperimentalnih istraživanja vremenski ovisnih deformacija mekih stijena po diskontinuitetu (na globalnoj razini) ovim se radom želi dati znanstveni doprinos i prikazati prvi rezultati analizom podataka dobivenih konkretnim eksperimentalnim istraživanjem.

Ključne riječi:

meke stijena, vremenski ovisne deformacije, eksperiment, diskontinuitet, hrapavost

Research Paper

Miodrag Bujišić, Zvonko Tomanović

Experimental investigation of time-dependent deformation of soft rock along discontinuities

This study presents an experimental investigation of the time-dependent shear behaviour of soft rock discontinuities. Three marly limestone specimens obtained from the Pljevlja coal basin were tested under controlled laboratory conditions. The specimens had identical geometric characteristics but differed in discontinuity surface roughness (smooth, undulating and moderately rough). A dedicated experimental apparatus was designed and adapted to perform long-term shear tests under constant normal loading and incremental shear loading. The results demonstrate the significant influence of discontinuity roughness on shear resistance, displacement development and test duration. Given the limited number of published studies addressing time-dependent deformation of soft-rock discontinuities, the presented pilot investigation provides valuable insight into the governing mechanisms and establishes a basis for a comprehensive experimental programme.

Key words:

soft rock, time-dependent deformations, experiment, discontinuity, roughness

1. Uvod

U radu su analizirani rezultati probnih ispitivanja koja čine dio širega eksperimentalnog istraživanja u okviru znanstvenoga projekta autora ovoga rada. Eksperimentalni dio znanstvenoga projekta čine dvije cjeline, i to: inicijalno (probno) ispitivanje i glavno ispitivanje. Predmet je ovoga rada analiza rezultata probnoga ispitivanja za potrebe definiranja opsega fizičko-mehaničkih parametara i razina opterećenja uzoraka i definiranje najrelevantnijih parametara za glavne nizove eksperimentalnih ispitivanja. Cilj je znanstvenoga projekta eksperimentalnim istraživanjima unaprijediti spoznaje o ponašanju mekih stijenskih masa. U sljedećim koracima istraživanja u okviru doktorske disertacije želja je da se da znanstveni doprinos u pogledu dobivanja materijalnih karakteristika vremenski ovisnoga ponašanja stijenske mase za uzorke jednostavnoga geometrijskog oblika uz doprinos u pogledu izučavanja fenomena utjecaja diskontinuiteta na dobivanje spomenutih parametara. Plan je da se takvo ispitivanje provede u kontroliranim laboratorijskim uvjetima, pri konstantnom normalnom opterećenju, uz prirast posmičnih naprezanja i mjerenje deformacija, na uzorcima s diskontinuitetom, dimenzija 30 x 15 x 15 cm. Važno je naglasiti da se u ovom radu prikazuju rezultati probne faze ispitivanja, osnovni cilj koje nije bilo konačno definiranje reprezentativnih parametara posmične čvrstoće diskontinuiteta, već provjera funkcionalnosti posebno razvijene eksperimentalne aparature, određivanje opsega opterećenja i sagledavanje osnovnih mehanizama vremenski ovisnoga smicanja po umjetno oblikovanom diskontinuitetu. Dobiveni su rezultati osnova za definiranje glavnoga eksperimentalnog niza koji podrazumijeva veći broj uzoraka, kontroliraniji režim opterećivanja i detaljniju analizu mehaničkih i geometrijskih karakteristika diskontinuiteta.

2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Pregledom dosadašnjih istraživanja može se konstatirati da je razmjerno mali broj znanstvenika eksperimentalno proučavao učinke utjecaja dugotrajnoga opterećenja i rasterećenja na vremenski ovisne deformacije mekih stijena. Vremenski ovisne deformacije stijenske mase pod djelovanjem konstantnoga naprezanja nazivaju se puzanjem. Puzanje je ovisno o promjeni stanja naprezanja, temperature, vlažnosti, vlage u zraku itd. Za čvrste (metamorfne i magmatske) stijenske mase deformacija je puzanja zanemariva u pogledu opsega naprezanja i temperatura za realne građevinske situacije, dok je doprinos deformacije puzanja u ukupnoj vrijednosti deformacije vrlo značajan kod mekih stijenskih masa kao što su kamena sol, laporac, anhidrit, flišni sedimenti itd. Ispitivanjima je pokazano da se deformacija puzanja odvija različitom brzinom i definiraju je tri karakteristične faze: primarna, sekundarna i tercijarna. Većina do sada objavljenih eksperimentalnih istraživanja u svijetu vezanih za ponašanja stijene u uvjetima dugotrajnoga opterećenja pri sobnim temperaturama provedena je na

uzorcima kamene soli (Gimm, 1968; Dreyer, 1974; Baar, 1977; Carter et al., 1982; Wallner, 1983; Hunche, 1994, 1995; prikazano u Cristescu N.D & Hunsche U, 1998; itd.). Neusporedivo je manji broj publiciranih eksperimentalnih istraživanja proveden pri sobnim temperaturama na laporcu ili sličnim mekim stijenama koje karakteriziraju znatne deformacije puzanja (glinoviti laporac, Cristescu, 1988; laporac, Kharchafi i Descoedres, 1995) i koje su realna radna sredina pri izgradnji brojnih podzemnih objekata. U okviru ispitivanja laporovitih materijala mogu se izdvojiti radovi autora iz Crne Gore [1-8].

Kada je riječ o ispitivanjima uzoraka mekih stijenskih masa prožetih diskontinuitetima broj radova je još manji. Za definiranje vremenski ovisnoga ponašanja stijenske mase u početnim koracima proučavanja ove problematike primijenjen je teorijski pristup koji nije dao zadovoljavajuće rezultate [2].

Razvojem računalnih programa usavršavali su se numerički modeli, pa je postalo moguće modelirati složene reološke situacije koje su omogućavale bolje sagledavanje vremenski ovisnoga ponašanja stijenske mase. Određivanje materijalnih parametara i konstanta koji opisuju reološke modele ponašanja stijenske mase općenito se provodi laboratorijski ili ispitivanjima na terenu. Problem je određivanja materijalnih karakteristika posljedica složenosti građe stijenskoga materijala, ali i diskontinuiteta koji izgrađuju i karakteriziraju stijensku masu. U pogledu određivanja karakteristika diskontinuiranih stijenskih masa naročito je važno definiranje opsega hrapavosti posmične plohe diskontinuiteta. Osim standardnih, tradicionalnih metoda opisivanja hrapavosti kvalitativnim i kvantitativnim karakteristikama posljednjih godina, uz tehnološki napredak softverskih alata, moguće je izvršiti definiranje određenih matematičkih zakonitosti koje povezuju posmičnu otpornost diskontinuiteta i hrapavost plohe diskontinuiteta. U tom se pogledu mogu spomenuti radovi [14-17].

Dosadašnja ispitivanja radi formiranja modela kojima će se prikazati vremenski ovisno ponašanje stijenskih masa utemeljena su na analizi monolitnih uzoraka jednostavnih geometrijskih karakteristika i razmjerno jednostavnoga stanja naprezanja. Međutim, uobičajeno je da se tim jednostavnim testovima sa zadovoljavajućom točnošću prikazuje ponašanje znatno složenijega stanja naprezanja i deformacija realne stijenske mase.

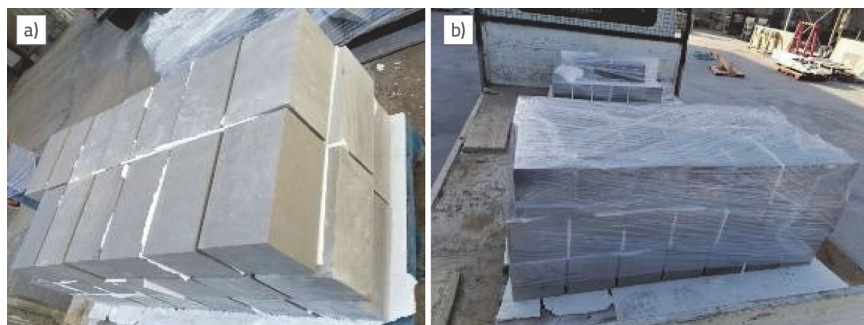
3. Eksperimentalno ispitivanje

3.1. Priprema uzoraka i opreme

Materijal za ispitivanje uzorkovan je iz površinskoga kopa Potrlica, rudnika ugljena u Pljevljima. Izvađen je blok veličine oko 3,5 tone, iz dubine od oko 45 m mjereno od površine terena (slika 1.). Materijal je pomoću mehanizacije odmah nakon iskopa utovaren i prevezen iz Pljevalja u Podgoricu (oko 180 km). Prilikom istovara uzorka vodilo se računa da ne dođe do oštećenja stijenske mase, o prirodnoj orijentaciji bloka, pa je ona u neizmijenjenoj geometriji pripremljena za obradu.



Slika 1. a) položaj stepenika iz koga se vadio blok stijene; b) utovar bloka stijenske mase



Slika 2. Uzorci obrađeni do željenih dimenzija 30 x 15 x 15 cm



Slika 3. Ispitivanje jednoosne čvrstoće uzoraka

U specijaliziranom postrojenju za obradu kamena izvedena je obrada do formiranja uzoraka oblika kvadra (prizme) dimenzija 30 x 15 x 15 cm (slika 2.). Prilikom oblikovanja uzoraka, zbog

vrlo zahtjevne obrade (pucanja prilikom rezanja) meke stijenske mase iz sirovoga (nepravilnog komada stijene) u željeni oblik uzorka, uspješnost obrade iznosila je oko 50 %.

Usporedno je urađena semikvantitativna analiza uzoraka i ustanovljeno je da je riječ o laporovitom vapnencu s dominantnim sudjelovanjem kalcijeva karbonata (CaCO_3) od 93,0 %, pri čemu je postotni sadržaj ostalih elemenata (u ukupnom dijelu od 7 %) sljedeći: kvarc 4,80 % (SiO_2), siderit 1,10 % (FeCO_2), muskovit 1,10 % ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}\text{OH}_2$).

Za uzorkovani materijal izvršeno je ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće (slika 3.), za različite vlažnosti (od vodozasicećenoga do potpuno suhog uzorka), pri čemu su vrijednosti dobivene za materijal u stanju prirodne vlažnosti dane u tablici 1. U tablici su uzorci označeni s U_1 do U_5 . Masa prazne posude označena je s m_p , dok je masa posude s uzorkom u stanju prirodne vlažnosti označena s m_1 , a masa posude s osušenim uzorkom s m_2 . Jednoosna je čvrstoća označena sa σ_c .

Na svim uzorcima koji su predviđeni za ispitivanje u probnom (a kasnije i u glavnom dijelu eksperimenta), oblikovana je umjetna pukotina (slika 4.). Oblikovanje pukotine je kontrolirano usijecanjem (cijepanjem) uzoraka u duljini od 1 cm na polovini visine (na približno 7,5 cm).

Na usječenim žlijebovima uzorci su pod presom (slika 4.c), nanošenjem opterećenja pri kontroliranoj brzini dijeljeni na dvije približno jednake polovine, pri čemu su se oblikovale plohe diskontinuiteta različitih neravnina (slika 5.b).

Tablica 1. Jednoosna čvrstoća na cilindričnim uzorcima 12 x 5 cm

Stanje uzoraka	Uzorcima (U1-U5) →	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	W_{sr}, σ_{csr}
Cilindrični uzorci u stanju prirodne vlažnosti, formirani od uzoraka kvadra (prizme) koji su čuvani na dnevnoj temperaturi, parafinirani, umotani u foliju	m_p [g]	4,9	4	5,3	5,4	4	Legenda: U_1-U_5 → uzorci, m_p → Masa prazne posude, m_1 → masa posude s uzorkom u stanju prirodne vlažnosti, m_2 → masa posude s osušenim uzorkom
	m_1 [g]	41,7	36,7	49,7	36	43,9	
	m_2 [g]	37,4	33,2	45,6	32,7	40	
	$m_1 - m_2$ [g]	4,3	3,5	4,1	3,3	3,9	
	$m_2 - m_p$ [g]	32,5	29,2	40,3	27,3	36	
	W [%]	13,2 %	11,9 %	10,1 %	12,1 %	10,8 %	$W_{sr} = 11,66 \%$
	σ_c [MPa]		18,14	17,98	17,11	16,28	17,02



Slika 4. a) Oblikovanje žlijeba na sredini uzorka; b) oblikovani žlijeb dubine 1 cm; c) oblikovanje diskontinuiteta

Svi uzorci su nakon definiranja ploha diskontinuiteta umotani u foliju. Prethodno su nakon oblikovanja geometrije svi uzorci parafinirani radi zadržavanja vlažnosti u prirodnom stanju.

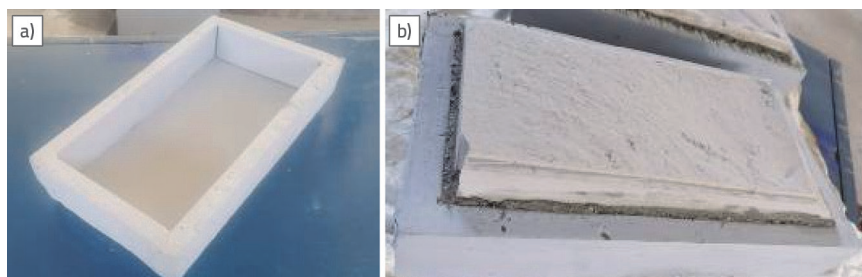
Nakon pripreme uzoraka pristupilo se izradi nove i modifikaciji postojeće opreme koja je korištena za jednoosni i troosno ispitivanje puzanja neporemećenih uzoraka stijene. U okviru probnoga niza planirano je ispitivanje tri uzorka različite hrapavosti, pa je za te potrebe u potpunosti pripremljen jedan postojeći okvir u laboratoriji Građevinskog fakulteta. Okvir za ispitivanje datira iz vremena ispitivanja laporovitog materijala uzorkovanog s iste lokacije za potrebe istraživanja prof. dr. Zvonka Tomanovića, koje je rađeno prije 20-ak godina. Okviri djeluju na načeku poluge i "mrtvoga" opterećenja. Aparatura je centrirana u pogledu položaja uzorka u kojoj će se provoditi eksperiment, a u skladu s potrebama razine opterećivanja normalnom silom. Da bi se moglo provesti ispitivanje uzoraka po oblikovanim posmičnim ploham napravljene su čelični kalupi u koje će se postaviti uzorci (slika 5.a).

S obzirom na to da su visine polovina uzoraka približno 7,5 cm, unutarnja je visina kalupa 5 cm kako bi se osiguralo nesmetano smicanje po ploham diskontinuiteta. Debljina zidova i dna čeličnoga kalupa iznosi 1 cm.

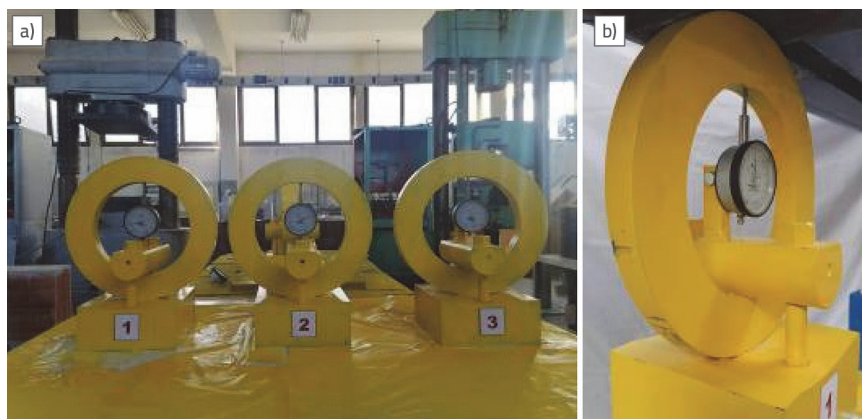
Učvršćivanje uzoraka izvedeno je pomoću tvornički proizvedenoga morta za zalijevanje i podlijevanje koji nakon popunjavanja zazora između uzorka i kalupa očvrstne u roku od nekoliko sati i čini uzorak nepomičnim u kalupu. Prilikom

učvršćivanja obje polovine uzorka vodilo se računa da one u potpunosti naliježu jedna na drugu radi postizanja što bolje simulacije prirodno stisnutih pukotina. Radi svladavanja trenja koje se javlja u aparaturi prilikom eksperimenta predviđeno je nalijeganje pokretnih dijelova preko cilindričnih čeličnih elementa koji će biti detaljnije opisani u nastavku teksta u dijelu 3.

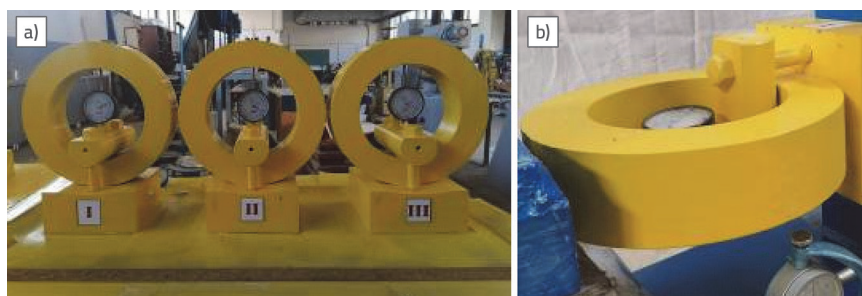
Osim uzoraka, okvira, kalupa i valjaka neophodan su dio opreme i elementi za mjerenje promjene naprezanja i deformacija. Za te potrebe konstruirani su čelični prstenasti elementi (dinamometri) s postoljima na kojima su postavljeni uređaji za mjerenje promjena normalnih i posmičnih pomaka.



Slika 5. a) Čelični kalup; b) Polovina uzorka postavljena u kalup



Slika 6. a) Prsteni s mjeracima za normalna naprezanja; b) Debljina prstenova 1, 2 i 3 je $d = 2,0$ cm



Slika 7. a) Prsteni s mjeracima za posmična naprezanja; b) Debljina prstenova I, II i III je $d = 6,0$ cm

Čelični prstenovi su istog promjera, ali različite debljine zbog različitoga reda veličine (sila) koji se javljaju u normalnom, odnosno posmičnom smjeru, a koje treba mjeriti dinamometrima (slike 6. i 7.).

Nakon oblikovanja svih pojedinačnih dijelova opreme, pripreme uzoraka i stavljanja u funkciju okvira za ispitivanje stvoreni su uvjeti za početak pokusa.

3.2. Ispitivanje uzoraka

Probno eksperimentalno ispitivanje urađeno je u jednom okviru (slika 8.). U okviru pokusa ispitivana su tri uzorka različitih hrapavosti: 1) potpuno glatka ravnina diskontinuiteta, 2) izrazito valovit diskontinuitet, 3) umjereno hrapava ravnina diskontinuiteta. Za sve tri spomenute ravnine diskontinuiteta ispitivanje je izvedeno za tri različite konstantne razinenormalnih naprezanja. Normalna naprezanja su nanosena u vrijednostima od 0,1 MPa, 0,2 MPa i 0,4 MPa. Ograničenost probnoga niza ogleda se u tome što se u okviru ispitivanja jednoga uzorka za svako sljedeće nanoseno vertikalno opterećenje smicanje odvijalo po plohi uzorka koja je u određenoj mjeri izmijenjena zbog smicanja za prethodnu (manju) razinu normalnoga naprezanja. Vertikalno opterećenje nanošeno je sustavom poluge i "mrtvoga tereta". Međutim, relevantnost takvih ispitivanja proizlazi iz načina i redoslijeda odvijanja pokusa. Naime, kako su uzorci u prvoj fazi opterećivani normalnim naprezanjem od 0,1 MPa, a zatim s 0,2 MPa u drugoj fazi, vodilo se računa da se nakon svake faze izvrši pregled ispitanih uzoraka, odnosno da se ustanovi degradiranost ispitivane posmične plohe. S obzirom na to da se u prve dvije faze nije dešavalo da dođe do sloma ili do znatne promjene oblika neravnine diskontinuiteta (promjena se ogledala u obliku površinskih tragova zbog trenja), ustanovljeno je da je ploha diskontinuiteta gotovo neporemećena i prikladna za treću fazu ispitivanja.

Treba naglasiti da je eksperimentalna aparatura upotrijebljena u ovom istraživanju posebno razvijen laboratorijski sustav prilagođen dugotrajnim vremenski ovisnim ispitivanjima smicanja po diskontinuitetu. Zbog specifičnosti aparature i velikih dimenzija uzoraka postupak ispitivanja nije u potpunosti odgovarao standardnim ISRM procedurama direktnoga smicanja.

U okviru probne faze istraživanja ispitivanja su provedena uporabom jednoga okvira za smicanje, pri čemu su tri uzorka različitih karakteristika diskontinuiteta uzastopno ispitivana pri normalnim naprezanjima od 0,1 MPa, 0,2 MPa i 0,4 MPa. Nakon završetka pojedinačne faze smicanja uzorak je vraćan u početni položaj, nakon čega je provođeno sljedeće ispitivanje pri većem normalnom naprezanju.

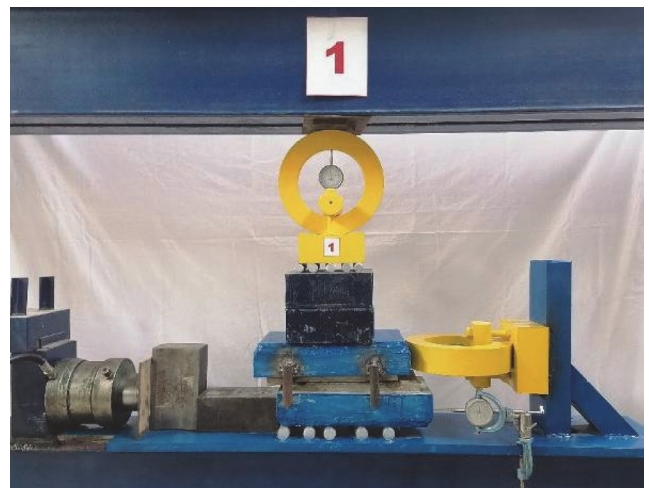
Autori su svjesni da ovakav postupak, naročito kod mekih stijenskih materijala, može dovesti do djelomične degradacije kontaktnih ploha i promjene lokalne kontaktne strukture zbog prethodnoga smicanja. Zbog tog razloga rezultati prikazani u ovom radu imaju preliminarni karakter i ponajprije su korišteni za provjeru funkcionalnosti eksperimentalne

aparature, sagledavanje dominantnih mehanizama ponašanja diskontinuiteta i definiranje metodologije glavnoga eksperimentalnog programa.

Glavni eksperimentalni program planiran je uporabom sva tri okvira za smicanje istodobno, pri čemu bi svaki okvir bio opterećen različitim konstantnom razinom normalnoga naprezanja. Na taj bi se način izbjeglo ponovno smicanje istoga diskontinuiteta pri različitim normalnim naprezanjima, što je jedno od glavnih metodoloških ograničenja probne faze istraživanja.

Radi osiguravanja translacijskoga smicanja i ograničavanja neželjenih pomaka i rotacija na gornji su kalup ugrađeni čelični graničnici koji su omogućavali kontrolirano vođenje donjega kalupa tijekom posmičnoga pomicanja. Iako aparatura nije sadržala klasične kuglaste oslonce karakteristične za standardne uređaje direktnoga smicanja, omogućila je stabilan prijenos opterećenja i registriranje dominantnih deformacijskih procesa tijekom eksperimenta.

Horizontalno opterećenje na uzorak nanoseno je pomoću velike hidraulične preše postavljene vertikalno u dodatni okvir s "mrtvim" opterećenjem. Željeni pritisak u ulju preše kontroliran je težinom "mrtvoga" tereta na poluzi okvira koja prenosi umnoženo opterećenje "mrtvoga" tereta na klip preše. Na taj je način omogućeno kontrolirano generiranje hidrauličnoga pritiska, koji se dalje prenosio na sustav za smicanje. Sustavom dovođenja ulja iz velike preše (principom spojenih posuda) u sve manje preše na aparaturi za smicanje nanosena je posmična sila na donju polovinu uzorka (na donji kalup koji je pomičan), kako je prikazano na slici 8.



Slika 8. Izgled aparature tijekom trajanja pokusa (vidljivo je smicanje gornje i donje polovine uzorka)

U pokusu nije mjerena masa opterećenja koje se dodaje, već su mjerene vrijednosti horizontalnih sila na uzorku, odnosno posmičnih naprezanja i pomaka. Naime, prilikom dodavanja tereta vodilo se računa da opterećivanjem dođe do pomicanja zbog prirasta posmičnih naprezanja. Iako se opterećenje kojim se izazivalo posmično naprezanje i pomicanje nije brojčano

verificiralo, vođeno je računa da prirasti opterećivanja budu približni. Opterećivanje se vršilo dodavanjem betonskih cilindara promjera osnovice 15 cm i visine 30 cm (približno 13 kg), što je približno nakon umnažanja polugama okvira 16 kN/m². Opterećivanje se izvodilo dodavanjem jednoga ili dva spomenuta elementa u ovisnosti od vertikalnog opterećenja, odnosno do pokretanja donjega kalupa s uzorkom. Posmično opterećenje nanošeno je dodavanjem spomenutoga tereta u košarama na kraju poluge po sistemu pokretanja ulja iz preše s velikim klipom k prešama s manjim klipovima, kao što je prije objašnjeno.

Svako naredno opterećivanje izvedeno je nakon potpunoga zaustavljanja pomicanja donjega kalupa, do postizanja krajnjega pomaka od 5 cm. S obzirom na duljinu uzorka od 30 cm ustanovljeno je da nakon pomicanja od 5 cm donji kalup osim translacijskoga gibanja počinje "doživljavati" deformaciju rotacije, što nije u skladu s planovima i pretpostavkama pokusa. Veličina pomaka donjeg kalupa tj. diferencijalno pomicanje donjega i gornjega dijela uzorka po diskontinuitetu očitava se na mehaničkom uređaju za mjerenje pomaka (slika 8.).

Kao što je prethodno rečeno, donji kalup i prsten na koji se nanosi vertikalno opterećenje postavljeni su na valjcima kako bi se eliminiralo trenje tijekom trajanja pokusa. Tijekom ispitivanja neophodno je održavanje konstantnosti vertikalnoga opterećenja koje teži promjeni zbog vertikalnih pomaka po neravninama i promjene posmičnih naprezanja i deformacija.

Iz tog je razloga u sklopu ispitivanja glavnoga niza planirano da se oprema upotpuni optičkim kamerama na svim okvirima, koje će 24 sata pratiti ispitivanje. Na početku probnoga niza ustanovljeno je da klip hidraulične preše potpuno izlazi u duljini od 5 cm, pa je ta dužina definirana i kao krajnji pomak uzoraka. Radi sagledavanja i spoznaje pokusa u prvim iteracijama, na uzorku koji nije dio probnoga niza, ustanovljeno je da se na pomaku od približno 7 do 8 cm donja polovina kalupa počinje rotirati oko kraće osi, pa bi pokus koji se provodi izgubio smisao pri takvom stanju aparature. Planiranih, krajnjih 5 cm pomaka približno je 17 % ukupne duljine uzorka (slika 9.).

U okviru ispitivanja probnoga niza uzoraka, u ovisnosti o nanosenom normalnom opterećenju i hrapavosti plohe diskontinuiteta, ovisilo je i trajanje pokusa. Trajanje izvođenja eksperimenta uvjetovalo je očitavanje dobivenih podataka u različitim vremenskim intervalima, u ovisnosti o konkretnom slučaju. Eksperimentalna aparatura upotrijebljena u ovom istraživanju posebno je razvijen laboratorijski sustav prilagođen dugotrajnim ispitivanjima smicanja po diskontinuitetu na uzorcima većih dimenzija. Zbog toga postupak ispitivanja nije u potpunosti odgovarao standardnim uređajima za direktno smicanje, kod kojih se često

koriste kuglasti oslonci radi smanjenja utjecaja momenata i omogućavanja rotacija. U ovom probnom ispitivanju cilj je bio da se provjeri funkcionalnost razvijenoga sustava i da se identificiraju problemi koji se moraju uzeti u obzir u glavnom eksperimentalnom nizu.

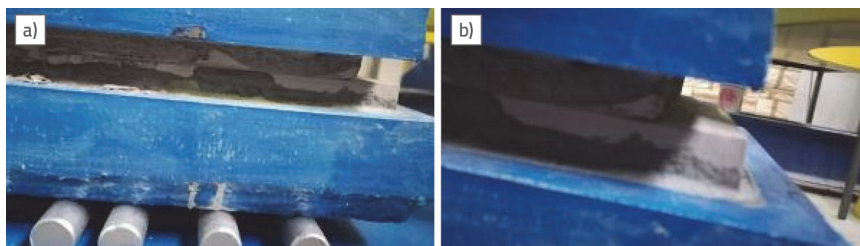
4. Prikupljanje, obrada i analiza rezultata ispitivanja

U okviru probnoga niza uzoraka ispitana su tri uzorka različitih hrapavosti ploha diskontinuiteta. Za svaki uzorak provedeno je ispitivanje za tri različite konstantne vrijednosti normalnoga opterećenja: 0,1 MPa, 0,2 MPa i 0,4 MPa. Pri ispitivanju uzoraka za manje vrijednosti normalnih naprezanja izazvana su i manja posmična naprezanja, a vrijeme je ispitivanja bilo kraće. To je karakteristika svih ispitivanih uzoraka.

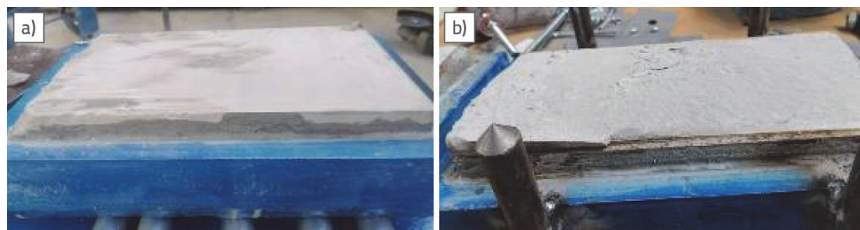
Otežano je i kompleksno održavanje normalne sile konstantnom, jer se zbog smicanja uzorka, tj. promjene posmičnih naprezanja i evidentnih volumetrijskih promjena prilikom smicanja kao i zbog trenja opreme okvira, javljalo stanovito smanjenje ili povećanje vrijednosti zadane normalne sile (kao posljedica težnje k vertikalnom pomicanju uzorka tijekom smicanja), pa se ona morala kontrolirati najviše nakon jednog sata, kako bi se korigirala sila i zadržala nazovi konstantna vrijednost normalnoga naprezanja.

Kod svih uzoraka ispitivanje je počinjalo od najmanjega (0,1 MPa) do najvećega normalnog naprezanja (0,4 MPa), kako bi se što je moguće manje oštetila, odnosno promijenila posmična ploha koja se ispituje. Kod glatkoga uzorka nije postojala bojazan od promjene hrapavosti posmične plohe, dok kod ostale dvije, hrapave površine, nije zabilježena značajnija promjena strukture ispitivane posmične plohe (slika 10.).

Prilikom smicanja na uzorku s glatkim diskontinuitetom vidljivi su tragovi pokusa (uglavnom u obliku plitkih stija na plohi klizanja), odnosno primjetni su tragovi po površini koji upućuju



Slika 9. Pomicanje gornje (a) u odnosu na donju (b) polovinu uzorka po posmičnoj plohi



Slika 10. a) Izgled posmične plohe nakon pokusa kod glatkoga uzorka, b) Izgled posmične plohe nakon pokusa kod hrapavoga uzorka

na smicanje ploha, ali bez degradacije i formiranja izlomljenih struktura (slika 10.a).

Kod uzoraka s hrapavim površinama primjetne su okrnjene, slomljene mikrostrukture (dijelovi maloga reda veličine u odnosu na dimenzije uzorka) površine (slika 10.b), pri čemu treba naglasiti da je uzorak s izraženim valom (neravnina u velikoj mjeri) ostao neoštećen u pogledu postojanosti neravnine, dok su se i kod njega i u slučaju uzorka s umjerenom hrapavosti javila oštećenja, osipanje mikrostrukture plohe smicanja. Logično, s povećanjem normalnoga opterećenja, pri čemu se izazivaju i veća posmična naprezanja, povećava se i red veličine razlomljenosti površinske strukture smicanja.

Prilikom ispitivanja uzorka s glatkom plohom diskontinuiteta (S_1') zabilježene su sljedeće maksimalne vrijednosti posmičnih naprezanja za odgovarajuće normalno opterećenje:

$$\sigma_n = 0,1 \text{ MPa} \rightarrow \tau = 0,54 \text{ MPa}, \sigma_n = 0,2 \text{ MPa} \rightarrow \tau = 1,68 \text{ MPa}, \sigma_n = 0,4 \text{ MPa} \rightarrow \tau = 2,46 \text{ MPa}.$$

Za uzorak s izraženom neravnom (S_2') dobivene su sljedeće maksimalne vrijednosti posmičnih naprezanja:

$$\sigma_n = 0,1 \text{ MPa} \rightarrow \tau = 3,9 \text{ MPa}, \sigma_n = 0,2 \text{ MPa} \rightarrow \tau = 4,92 \text{ MPa}, \sigma_n = 0,4 \text{ MPa} \rightarrow \tau = 6,72 \text{ MPa}.$$

Za uzorak s umjerenom hrapavošću plohe diskontinuiteta (S_3') dobivene su sljedeće maksimalne vrijednosti posmičnih naprezanja:

$$\sigma_n = 0,1 \text{ MPa} \rightarrow \tau = 3,24 \text{ MPa}, \sigma_n = 0,2 \text{ MPa} \rightarrow \tau = 2,70 \text{ MPa}, \sigma_n = 0,4 \text{ MPa} \rightarrow \tau = 4,86 \text{ MPa}.$$

Dobivene vrijednosti posmičnih naprezanja ne treba neposredno tumačiti kao klasične Mohr–Coulomb parametre neporemećenoga stijenskog materijala. Ispitivanje je provedeno po prethodno formiranim ploham diskontinuiteta, pri čemu je posmična otpornost rezultat kombiniranoga djelovanja trenja, uklještenja neravnina, lokalne dilatacije i djelomične degradacije mikrokontaktne zone.

Kod diskontinuiteta s izraženim geometrijskim uklještenjem i valovito-nazubljenom kontaktnom plohom, pri razmjerno malim normalnim napreznjima može doći do pojave visokih prividnih vrijednosti kuta posmične otpornosti i prividne kohezije. Takve su vrijednosti posljedica mehaničkog uklještenja, dilatacije i geometrijski uvjetovane otpornosti pri smicanju, a ne stvarne materijalne konstante neporemećene stijene.

Također, imajući u vidu da je u probnoj fazi isti uzorak ispitivan uzastopno

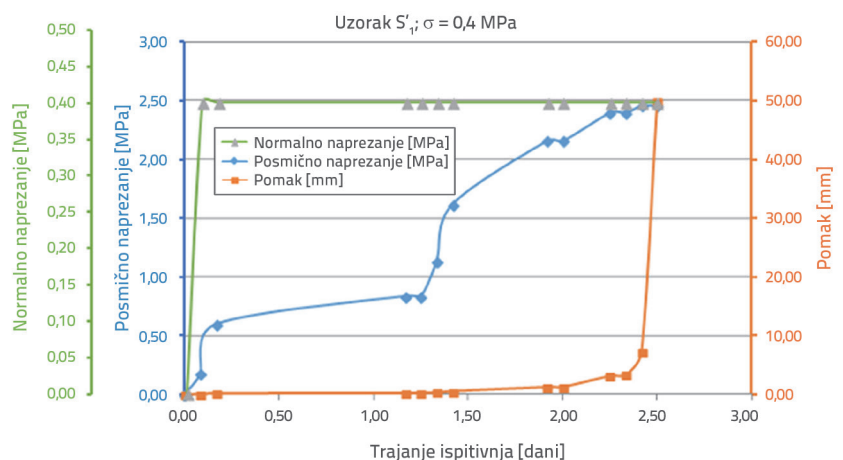
pri više razina normalnoga napreznja, uz vraćanje u početni položaj između pojedinih faza ispitivanja, moguće su djelomične promjene kontaktne strukture plohe diskontinuiteta. Zbog toga prikazane vrijednosti treba promatrati kao probne rezultate, namijenjene sagledavanju ponašanja sustava i pripremi glavnoga eksperimentalnog programa.

Dodatno, imajući u vidu visok sadržaj kalcijevog karbonata u ispitivanom laporovitom vapnencu, nije isključena mogućnost da na kontaktnim zonama diskontinuiteta dolazi i do pojave lokalnoga privremenog povezivanja kontaktnih površina, što može dodatno utjecati na izazvanu posmičnu otpornost pri malim normalnim napreznjima. Međutim, takav učinak u okviru ovoga rada nije posebno eksperimentalno analiziran i zahtijeva dodatna istraživanja.

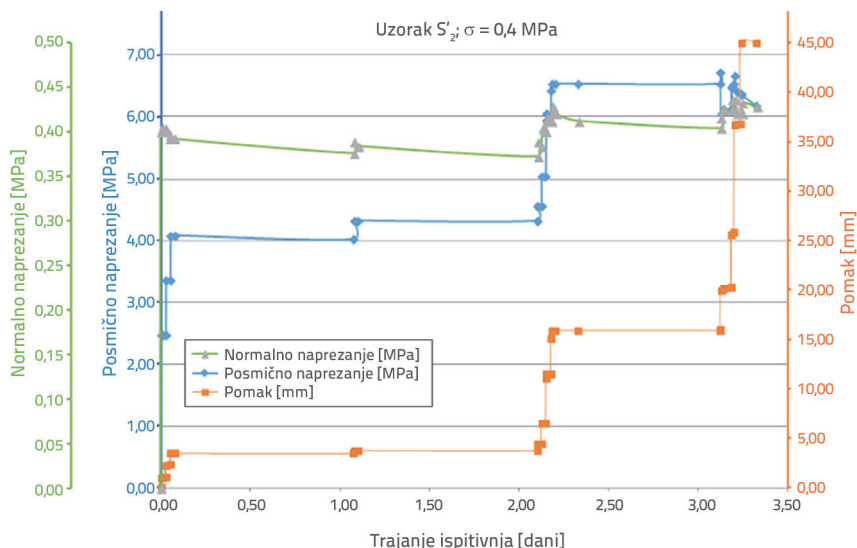
U pogledu trajanja pokusa, uzorci s hrapavim ploham diskontinuiteta trajali su znatno dulje, i do dva mjeseca, dok je uzorak s glatkom plohom diskontinuiteta dostigao maksimalni pomak za nekoliko sati.

Radi boljeg sagledavanja dobivenih rezultata, a zbog preopširnoga prikazivanja svih dobivenih grafikona ovisnosti, u sljedećim će koracima biti prikazani grafikon ovisnosti za ispitane uzorke zbog djelovanja maksimalnoga zadanog normalnog opterećenja od oko 0,4 MPa. Na slikama 1., 2. i 3. prikazane su promjene normalnoga i posmičnoga napreznja i pomaci u ovisnosti o trajanju pokusa.

Dobiveni rezultati pokazuju da se vrijednosti maksimalnih pomaka dostižu u različitim vremenskim intervalima za različite uzorke. Kod uzorka s glatkom plohom diskontinuiteta maksimalni je pomak dostignut u roku od nekoliko sati. Kod uzoraka s hrapavom posmičnim plohom maksimalni se pomak dostiže u vremenskom intervalu mjerenom u danima. Iako je uzorak s izraženom neravnom ispitivan u roku od skoro četiri dana, autori naglašavaju da se pokus kod uzorka S_3' odvijao tako što se svaki sljedeći prirast horizontalnoga opterećenja dodavao tek nakon potpunoga prestanka promjene vrijednosti napreznja i pomaka.



Slika 11. Promjena napreznja i prirast pomaka u tijeku trajanja pokusa, uzorak S_1'



Slika 12. Promjena naprezanja i prirast pomaka u tijeku trajanja pokusa, uzorak S'_2



Slika 13. Promjena naprezanja i prirast pomaka u tijeku trajanja pokusa, uzorak S'_3

Za uzorak s izraženom neravnom (S'_2) sljedeći je korak opterećivanja izveden nakon postizanja prirasta pomaka manjeg od 0,2 mm/danu. Različiti uvjeti ispitivanja (ponajprije odstupanje normalnih naprezanja od konstantne vrijednosti zbog praćenja posmičnoga ponašanja uzorka) izvedeni su s konkretnom namjerom da se sagledaju svi mogući uvjeti ispitivanja kako bi se u glavnom nizu eksperimenta, prilikom istodobnoga ispitivanja uzoraka u tri okvira, mogli kvalitetno i u statistički dovoljnom broju uzoraka prikupiti odgovarajući podaci s odgovarajućim rezultatima koji omogućavaju sagledavanje fenomenologije ponašanja diskontinuiteta meke stijene pri posmičnim silama-pomacima.

U ovom radu se iznose prvi rezultati testiranja na smicanje diskontinuiteta u mekoj stijeni s vremenski ovisnim učincima. Daljnjim ispitivanjima treba prikupiti dovoljan broj podataka

posmične čvrstoće. Ponavljanje ispitivanja na istim uzorcima pri uzastopno većim normalnim naprezanjima metodološko je ograničenje probne faze, jer može dovesti do djelomične degradacije i promjene kontaktnih uvjeta uzduž plohe diskontinuiteta. To će ograničenje biti otklonjeno u glavnom nizu eksperimentalnih ispitivanja, provođenjem većega broja pokusa i kontroliranim režimom opterećivanja.

S obzirom na relativno mali opseg istraživanja, globalno gledano, dosegnute spoznaje u okviru ovoga istraživanja imaju za cilj dati doprinos sagledavanju, spoznaji i izučavanju mekih stijenskih masa i fenomenologije smicanja po diskontinuitetu. Ujedno, opravdanost prethodnih istraživanja istoga materijala, sagledana kroz ustanovljeni doprinos u znanstvenim radovima autora Živaljević, S. & Tomanović, Z. na neporemećenoj stijeni, dokaz su da će rezultati ovih istraživanja ponašanja

koji mogu biti osnova za reološko modeliranje, a posebno uvođenje vremenski ovisnih deformacija kao parametra pri modeliranju ponašanja stijenske mase, kako matriksa stijene, tako i ponašanja diskontinuiteta.

5. Zaključak

Probim ispitivanjem pokazalo se da je vrlo zahtjevno istraživanje u pogledu oblikovanja opreme, pripreme i obrade uzoraka urađeno na visokoj razini. Kvalitetna priprema ogleda se i u uspješno dobivenim rezultatima ispitivanja, ali i u minimalnom broju korektivnih aktivnosti koje se moraju uraditi prilikom ispitivanja glavnoga niza eksperimenta, kako na opremi tako i proceduri testiranja. Daljnji rezultati testova trebaju osigurati dovoljan broj podataka za oblikovanje reološkoga modela ponašanja smicanja po diskontinuitetu ispitivane meke stijene, obuhvaćajući kroz numeričku formulaciju i utjecaj hrapavosti ploha diskontinuiteta smicanja na posmičnu čvrstoću materijala i vremenski ovisne deformacije. Ispitivanje uzoraka pokazalo je da vremenski ovisna komponenta posmičnoga pomaka po diskontinuitetu sudjeluje u ukupnoj deformaciji u znatnom postotku, a kod uzorka S'_3 i preko 50%.

Posebno treba naglasiti da prikazani rezultati imaju preliminarni karakter. Probna ispitivanja provedena su radi provjere aparature, opsega opterećenja i osnovnih mehanizama smicanja po diskontinuitetu, a ne radi konačnoga određivanja reprezentativnih parametara

diskontinuiteta biti značajan doprinos rasvjetljavanju ponašanja mekih (laporovitih) stijenskih masa prožetih pukotinama i formiranju realnijih reoloških modela.

Zahvala

Autori rada izražavaju zahvalnost zbog financijske i druge pomoći tijekom istraživanja: Fondu za inovacije Crne Gore, koji je prepoznao značaj ovoga istraživanja i dodijelio financijsku

potporu prijavljenom timu kojega su činili GeoT d.o.o iz Podgorice i Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore. Rukovodstvu Rudnika uglja A.D. Pljevlja na stručnoj, financijskoj i tehničkoj pomoći prilikom iskopa, utovara i transporta laporovitog materijala. Institutu za ljekove i medicinska sredstva Crne Gore od kojega je dobiven detaljan izvještaj o provedenoj semikvantitativnoj analizi uzoraka, u kojoj se s potpunom preciznošću odredio kemijski, mineraloško-petrološki sastav stijenske mase.

LITERATURA

- [1] Zivaljevic, S., Tomanovic, Z.: Experimental research of the effects of preconsolidation on the time-dependent deformations-creep of marl, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 19 (2015), pp. 43–59, <https://doi.org/10.1007/s11043-014-9250-8>.
- [2] Tomanović, Z.: Initial and time-dependent deformations in marl around small circular opening, *GRAĐEVINAR*, 66 (2014) 12, pp. 1087–1096, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1120.2014>
- [3] Tomanović, Z., Miladinović, B., Zivaljević, S.: Criteria for defining the required duration of the creep test, *Canadian Geotechnical Journal*, 52 (2015) 7, pp. 883–889, <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0097>.
- [4] Tomanović, Z.: Effects of the soft rock pre-consolidation on time-dependent deformations around the tunnel excavation, *Technical Gazette*, (2014), ISSN 1330-3651.
- [5] Tomanović, Z.: The stress and time dependent behaviour of soft rocks, *GRAĐEVINAR*, 64 (2012) 12, pp. 993–1007, <https://doi.org/10.14256/JCE.815.2012>.
- [6] Tomanović, Z.: Experimental research and complex rheological models of soft rock as a basis for numerical analysis of the stress dependent behavior – Application of innovative techniques in engineering, *Proceedings of the Conference Application of Innovative Techniques in Engineering*, Niš, Serbia, 25–26 November 2011, pp. 219–243, ISBN 978-86-80295-97-8.
- [7] Tomanović, Z.: Influence of K_0 on creep properties of marl, *Acta Geotechnica Slovenica*, (2009), ISSN 1854-0171.
- [8] Tomanović, Z.: Rheological model of soft rock creep based on the tests on marl, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 10 (2006), pp. 135–154, <https://doi.org/10.1007/s11043-006-9005-2>.
- [9] Dusseault, M.B., Fordham, C.J.: Time-dependent behavior of rocks, in: Hudson, J.A. (ed.), *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects*, Vol. 3, Pergamon Press, Oxford, 1993, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042066-0.50013-6>.
- [10] Cristescu, N.D., Hunsche, U.: *Time Effects in Rock Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [11] Cristescu, N.D., Hunsche, U.: General constitutive equation, in: *Time Effects in Rock Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, 1998, pp. 119–179.
- [12] Wallner, M.: Stability calculation concerning a room and pillar design in rock salt, *Proceedings of the International Congress for Geotechnics*, Melbourne, Australia, 1983.
- [13] Kozubal, J., Tomanović, Z., Zivaljević, S.: The soft rock socketed monopile with creep effects – a reliability approach based on wavelet neural networks, *Archives of Mining Sciences*, 61 (2016) 3, pp. 571–585.
- [14] Xu, T., Tang, C.-A., Zhao, J., Li, L., Heap, M.J.: Modelling the time-dependent rheological behaviour of heterogeneous brittle rocks, *Geophysical Journal International*, 189 (2012) 3, pp. 1781–1796, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05460.x>.
- [15] Palmström, A.: Measurement and characterization of rock mass jointing, Chapter 2 in: *In-Situ Characterization of Rocks*, A.A. Balkema Publishers, Lisse, 2001.
- [16] Jandrisevits, C.: Contact-free Measurement of Rock-Mass Structures – Method Comparison, Master's Thesis, Institute of Applied Geosciences, Graz University of Technology, Graz, 2012.
- [17] Loiotine, L., Wolff, C., Wyser, E., Andriani, G.F., Derron, M.-H., Jaboyedoff, M., Parise, M.: QDC-2D: A Semi-Automatic Tool for 2D Analysis of Discontinuities for Rock Mass Characterization, *Remote Sensing*, 13 (2021) 24, Article 5086, <https://doi.org/10.3390/rs13245086>.