

# Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

---

**Dobrilović, Ivana**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:351915>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Ivana Dobrilović

**MODEL ZA PROCJENU POSMIČNE  
ČVRSTOĆE DISKONTINUITETA U  
MASIVNIM VAPNENCIMA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2021.



Sveučilište u Zagrebu

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Ivana Dobrilović

**MODEL ZA PROCJENU POSMIČNE  
ČVRSTOĆE DISKONTINUITETA U  
MASIVNIM VAPNENCIMA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Petar Hrženjak

Zagreb, 2021.



Sveučilište u Zagrebu

FACULTY OF MINING, GEOLOGY  
AND PETROLEUM ENGINEERING

Ivana Dobrilović

**MODEL FOR THE SHEAR STRENGTH  
ESTIMATION OF DISCONTINUITIES IN  
MASSIVE LIMESTONES**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

Associate Professor Petar Hrženjak, PhD

Zagreb, 2021.

*Doktorski rad izrađen je na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.*

*Mentor: izv. prof. dr. sc. Petar Hrženjak*

*Doktorski rad sadrži: 109 stranica teksta, 60 slika, 30 tablica i 5 priloga.*

**Zahvaljujem** svima koji su dali doprinos izradi ovog rada:

*Posebno hvala mentoru izv. prof. dr. sc. Petru Hrženjaku na savjetima, smjernicama, kolegijalnom pristupu i nesebično prenesenom znanju.*

*Uvaženim članicama komisije, prof. dr. sc. Biljani Kovačević Zelić i izv. prof. dr. sc. Nataši Štambuk Cvitanović bez čijeg predanog čitanja i konstruktivnih komentara završetak rada ne bi bio moguć.*

*Trgovačkom društvu Kamen d.d. Pazin na ustupljenim i pripremljenim uzorcima blokova kamena za laboratorijska ispitivanja.*

*Laboratoriju za ispitivanje tla i stijena trgovačkog društva Geotehnički studio d.o.o. iz Zagreba na provedenim laboratorijskim ispitivanjima materijala ispune.*

*Kolegi Branimiru Veličkoviću, dipl. ing. rud. na provedenim laboratorijskim ispunama.*

*Hrvatskom Geološkom Institutu na provedbu analize mineraloškog sastava ispune i na mjerenjima hrapavosti diskontinuiteta digitalnom fotogrametrijom.*

*Kolegici Evelini Oršulić, dipl. ing. geoteh. na nesebičnoj pomoći pri provedbi laboratorijskih ispitivanja, te ostalim kolegicama i kolegama koji su dali svoj doprinos kroz pomoć pri tehničkom oblikovanju rada, te kroz kolegijalni pristup i riječi podrške.*

*Dragim prijateljicama i prijateljima na podršci.*

*Mojoj obitelji, bez koje sve ovo ne bi imalo smisla.*

## SAŽETAK

U radu je prikazana problematika procjene posmične čvrstoće diskontinuiteta, koja naročito dolazi do izražaja u masivnim vapnencima kod kojih stijenske diskontinuiteta mogu biti izrazito hrapave i nepravilne, s ili bez materijala ispune, za koje se pokazalo da postojeći modeli ne mogu dati zadovoljavajuće rezultate. Karakteristični primjer takvih vapnenaca predstavlja ležište arhitektonsko-građevnog kamena Kanfanar-jug koje se nalazi na Istarskom poluotoku u Hrvatskoj. Za potrebe razvoja modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta, provedena su terenska istraživanja tijekom kojih su pripremljeni veliki uzorci blokova s prirodnim diskontinuitetima kao i uzorci materijala ispune u graničnim stanjima, na kojima su zatim provedena detaljna laboratorijska ispitivanja posmičnih čvrstoća. Posebna pažnja posvećena je određivanju koeficijenta hrapavosti pukotina  $JRC$ , stvarnoj kontaktnoj površini između stjenki diskontinuiteta, baznom, odnosno rezidualnom kutu trenja te kutu trenja ugrađenog materijala ispune između ploha diskontinuiteta. Razvoj modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta temeljio se na Bartonovom  $JRC$ - $JCS$  empirijskom modelu, s obzirom na činjenicu da je on jedan od najčešće primjenjivanih modela u inženjerskoj praksi. Na temelju rezultata provedenih ispitivanja provedena je modifikacija Bartonovog  $JRC$ - $JCS$  modela na način da je umjesto baznog ili rezidualnog kuta trenja primijenjen kut trenja ugrađenog materijala ispune za slučaj diskontinuiteta s ispunom. Uz navedeno, za ispravno vrednovanje hrapavosti stjenki diskontinuiteta u masivnim i okršenim vapnencima utvrđena je nužnost povećanja koeficijenta hrapavosti pukotina  $JRC_{10}$  na veće vrijednosti od 20, koliko su do sada one bile predložene kao maksimalno moguće. Evaluacija predloženog modela pokazala je zadovoljavajuću točnost prilikom procjene posmične čvrstoće diskontinuiteta s materijalom ispune različitog stanja konzistencije.

**Ključne riječi:** diskontinuitet; posmična čvrstoća; koeficijent hrapavosti pukotine; ispuna

## ABSTRACT

In this study the problem of estimating the shear strength of discontinuity is presented, which especially occurs in massive limestones, where discontinuity walls can be extremely rough and irregular, with or without filling material, and for which the current models have proved to be unsatisfactory. A characteristic example of such limestones is the deposit of dimension stone Kanfanar-jug, located on the Istrian peninsula in Croatia. For the purpose of developing a model for estimating the shear strength of discontinuity, field research was conducted in which large samples of blocks with natural discontinuities were prepared, as well as samples of filling material in limit conditions, on which detailed laboratory tests of shear strength were performed. Special attention was paid to determining the joint roughness coefficient *JRC*, the actual contact area between the discontinuity walls, the basic or residual friction angle and the friction angle of the built-in filling material between the discontinuity surfaces. The development of the model for estimating the shear strength of discontinuity was based on Barton's *JRC-JCS* empirical model, given the fact that it is one of the most commonly applied models in engineering practice. Based on the results of the tests, a modification of Barton's *JRC-JCS* model was made, in such a way that the friction angle of the built-in filling material in the case of discontinuity with a filling was applied instead of the basic or residual friction angle. In addition, for the correct evaluation of the roughness of the discontinuity walls in massive and karstified limestones it was found that it is necessary to increase the roughness coefficient to values larger than 20, which has been proposed as the maximum so far. The evaluation of the proposed model showed that it is satisfactory accurate in estimating the shear strength of discontinuity with filling material of different states of consistency.

**Key words:** discontinuity; shear strength; joint roughness coefficient; filling



## PROŠIRENI SAŽETAK

Istraživanja koja su prikazana u doktorskom radu utemeljena su na potrebi za postavljanjem jedinstvenog modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta s materijalom i bez materijala ispune u masivnim i okršenim vapnencima. Karakteristični primjer takve potrebe i takvih stijena upravo je ležište arhitektonsko-građevnog kamena Kanfanar-jug u Istri na kojem su provedena terenska istraživanja i na čijim su uzorcima provedena detaljna laboratorijska ispitivanja. Određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta pokazalo se važnim pri određivanju stabilnosti prostoriya tijekom podzemne eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena. Pouzdanost procjene vrijednosti posmične čvrstoće diskontinuiteta naročito dolazi do izražaja primjenom u masivnim i okršenim vapnencima s izrazito hrapavim i nepravilnim stijenkama diskontinuiteta, s ili bez materijala ispune, kakvi su prisutni u spomenutom ležištu za koje se pokazalo da postojeći modeli ne mogu dati zadovoljavajuće rezultate. Potreba utvrđivanja modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta među ostalim je uvjetovana otežanom, gotovo nemogućom provedbom terenskih ispitivanja posmične čvrstoće, ali i otežanom provedbom laboratorijskih ispitivanja u redovitim okolnostima zbog troškova, vremena te teškog pribavljanja dostatnog broja uzoraka. Ležište arhitektonsko-građevnog kamena Kanfanar-jug karakteristično je upravo zbog diskontinuiteta koji imaju velike nepravilne i hrapave stijenke s izraženim neravninama i u velikom i u malom mjerilu promatranja, koji mogu biti bez ispune ili u većini slučajeva s materijalom ispune koja se može naći u različitim stanjima konzistencije. Za potrebe razvoja modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta, provedena su terenska istraživanja prilikom kojih su pripremljeni veliki uzorci blokova s prirodnim diskontinuitetima kao i uzorci materijala ispune u graničnim stanjima. Na tim su uzorcima provedena detaljna laboratorijska ispitivanja posmičnih čvrstoća. Posebna pažnja prilikom toga posvećena je određivanju koeficijenta hrapavosti pukotina *JRC*, stvarnoj kontaktnoj površini između stijenki diskontinuiteta, baznom, odnosno rezidualnom kutu trenja te kutu trenja ugrađenog materijala ispune između ploha diskontinuiteta. Razvoj modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta temeljio se na Bartonovom *JRC-JCS* empirijskom modelu s obzirom na činjenicu da je on jedan od najčešće primjenjivanih modela u inženjerskoj praksi. Na temelju rezultata provedenih ispitivanja provedena je modifikacija Bartonovog *JRC-JCS* modela. Modifikacija je sačinjavala primjenu kuta trenja ugrađenog materijala ispune za slučaj diskontinuiteta s ispunom umjesto baznog ili rezidualnog kuta trenja. Pri tome je za ispravno vrednovanje hrapavosti stijenki diskontinuiteta u masivnim i okršenim vapnencima

utvrđena nužnost povećanja koeficijenta hrapavosti pukotina  $JRC_{10}$  na veće vrijednosti od dosada najvećih predloženih u iznosu 20. Evaluacija predloženog modela pokazala je zadovoljavajuću točnost prilikom procjene posmične čvrstoće diskontinuiteta s materijalom ispune različitog stanja konzistencije. Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta koji je postavljen u doktorskom radu temeljen je na Bartonovu empirijskom JRC-JCS modelu koji kao ključne parametre upotrebljava koeficijent hrapavosti pukotina  $JRC$ , tlačnu čvrstoću stijenki pukotina  $JCS$  i rezidualni kut trenja  $\varphi_r$  te na zapažanjima pojedinih autora vezanim uz pojavu znatnog smanjenja posmične čvrstoće dodavanjem čak i tankog sloja materijala ispune (Indraratna i Haque, 2001). Provedbom terenskih ispitivanja uočeno je da se hrapavost stijenki diskontinuiteta ne može odrediti usporedbom sa standardnim profilima hrapavosti kao što je to preporučio Barton (Barton, 1973), zbog čega se javila potreba za prijedlogom, odnosno proširenjem standardnih profila hrapavosti. To proširenje učinjeno je na osnovi izmjerenih vrijednosti  $JRC$ -a na terenu i laboratorijskim uzorcima prijedlogom dodatnih pet karakterističnih profila za raspone vrijednosti  $JRC$ -a od 20 do 30 kao standardnih profila hrapavosti koji su prikazani na slici 4-9. Predloženi profili validirani su tako što je određena hrapavost stijenki diskontinuiteta na temelju izrađenih profila digitalnom fotogrametrijom preko statističkog parametra  $Z_2$ , pri čemu su dobivene praktički jednake vrijednosti. Uz navedeno primijenjena je i metoda određivanja hrapavosti mjerenjem amplitude hrapavosti koja se u ovom slučaju nije pokazala primjenjivom s obzirom na to da su izmjerene vrijednosti hrapavosti izlazile iz područja predloženog dijagrama. Nadalje, vezano za pojavu smanjenja posmične čvrstoće zbog prisutnosti tankog sloja ispune, provedena su ispitivanja kuta trenja koja su uključivala i ispunu ugrađenu između ispiljenih ploha uzoraka na kojima se provelo određivanje baznog kuta trenja. Ispitivanje je provedeno pokusom klizanja naginjanjem i u uređaju za izravni posmik u CNL uvjetima. Ispitivanjem u CNL uvjetima uočeno je da se ispuna djelomično komprimira, a djelomično istiskuje, ovisno o stupnju vlažnosti, s obzirom na to da je uzorak podvrgnut normalnom opterećenju koje zapravo simulira realnije uvjete u ležištu. Stoga se preporučuje da se taj postupak ispitivanja upotrebljava pri određivanju baznog kuta trenja kao i kuta trenja ugrađenog materijala ispune. S obzirom na to da vrijednost izmjerenog kuta trenja s ugrađenom ispunom nije bazni kut trenja, nego je riječ o trenju ugrađene ispune između ispiljenih ploha stijene, za taj parametar uvedena je oznaka  $\varphi_{fb}$ . Uz navedeno uočeno je da stijenske osobito okršenijih diskontinuiteta u manjoj mjeri ostvaruju stvarne kontakte, zbog čega su provedena mjerenja površina kontakata nasuprotnih stijenki diskontinuiteta. Budući da to nije standardizirano ispitivanje, primijenjen je film za profiliranje koji je izvedbom namijenjen upravo uskim i neravnomjernim površinama. Rezultat je iskazan koeficijentom

kontakta pukotine  $JCC$ . S obzirom na to da u takvim slučajevima stijenke ostvaruju kontakt u manjem postotku, normalna naprezanja preraspodjeljuju se samo na određene točke kontakta, zbog čega treba korigirati normalna naprezanja. Ocjena uspješnosti primjene modificiranog Bartonova JRC-JCS modela provedena je regresijskom analizom. Prema vrijednostima statističkih parametara za oba slučaja može se utvrditi da imaju jake korelacijske veze te da model koji upotrebljava  $JCC$  u određenoj mjeri podcjenjuje rezultate posmične čvrstoće diskontinuiteta, dok model koji ne upotrebljava koeficijent  $JCC$  u određenoj mjeri precjenjuje rezultate. Također se pokazalo da, matematički gledano, upravo tako postavljen model, u kojem se primjenom logaritma odnosa čvrstoće stijenki diskontinuiteta i normalnog naprezanja reducira koeficijent hrapavosti koji naposljetku pridonosi kutu trenja, najbolje opisuje posmična čvrstoća diskontinuiteta.

**Ključne riječi:** diskontinuitet; posmična čvrstoća; koeficijent hrapavosti pukotine; koeficijent kontakta pukotine; ispuna

## EXTENDED ABSTRACT

The research presented in the doctoral thesis is based on the need to set up a unique model for estimating the shear strength of discontinuities with and without filling material in massive and karstified limestones. A characteristic example of such a need and type of rock is the deposit of dimension stone Kanfanar-jug in Istria, where field research was conducted and, on whose samples, detailed laboratory tests were done. Determining the shear strength of the discontinuity proved to be important in the stability of the excavated area during the underground exploitation of dimension stone. The reliability of the assessment of the discontinuity shear strength value is especially noticeable when applied in massive and karstified limestones with extremely rough and irregular discontinuity walls, with or without filling materials such as those present in Kanfanar-jug deposit, for which has been proved that existing models cannot give satisfactory results. The need to establish a model for estimating the shear strength of discontinuities is due, among other things, to the difficult, almost impossible field testing of shear strength, but also to the difficulty of conducting laboratory tests in regular circumstances due to cost, time and difficulty in obtaining sufficient number of samples. The Kanfanar-jug dimension stone deposit is characterized by discontinuities that have large irregular and rough walls with distinct unevenness in both large and small observation scale, which can be without filling or in most cases with filling material that can be found in different consistency. For the purposes of developing a model for estimating the shear strength of discontinuities, field research was conducted during which large samples of blocks with natural discontinuities were prepared as well as samples of filling materials in boundary conditions. Detailed laboratory tests of shear strengths were performed on these samples. Special attention is paid to determining the joint roughness coefficient  $JRC$ , the actual contact surface between the discontinuity walls, the basic or residual friction angle and the friction angle of the friction angle of the built-in filling material between the discontinuity walls. The development of a model for estimating the shear strength of a discontinuity was based on Barton's JRC-JCS empirical model given the fact that it is one of the most commonly applied model in engineering practice. Based on the results of the tests, a modification of Barton's JRC-JCS model was performed. The modification consisted of the application of a friction angle of the embedded filling material in case of discontinuity with the filling instead of the base or residual friction angle. To correctly evaluate the roughness of discontinuity walls in massive and karstified limestones, it was necessary to increase the joint roughness coefficient  $JRC_{10}$  to

higher values than the largest ones proposed so far, value 20. The evaluation of the proposed model showed satisfactory accuracy in estimating shear strength of discontinuity with filling material in different consistencies. The model for estimating the shear strength of discontinuities presented in the doctoral thesis is based on Barton's empirical JRC-JCS model which uses as key parameters the joint roughness coefficient  $JRC$ , the compressive strength of joint walls  $JCS$  and the residual friction angle  $\varphi_r$  as well as on the observations of individual authors related to the phenomenon of reducing shear strength by adding even a thin layer of filling material (Indraratna and Haque, 2001). Field tests show that the roughness of the discontinuity walls cannot be determined by comparison with standard roughness profiles as recommended by Barton (Barton, 1973), which is why there is a need to propose or expand the standard roughness profiles. This extension was made based on measured  $JRC$  values in the field and laboratory samples by proposing an additional five characteristic profiles for  $JRC$  value ranges from 20 to 30 as standard roughness profiles. The proposed profiles were validated by determining the roughness of the discontinuity walls based on the created profiles by digital photogrammetry using the statistical parameter  $Z_2$ , whereby practically equal values were obtained. In addition, the method of determining the roughness by measuring the amplitude of the roughness was applied, which in this case did not prove to be applicable given that the measured roughness values were outside the scope of the proposed diagram. Furthermore, considering the occurrence of a decrease in shear strength due to the presence of a thin layer of filling, friction angle tests were performed which included the filling between the sawn surfaces of the samples on which the basic friction angle was determined. The test was performed by tilt test and in a direct shear device in CNL conditions. Testing in CNL conditions showed that the filling is partially compressed and partially extruded, depending on the degree of humidity, since the sample is subjected to a normal load that simulates more realistic conditions in the deposit. It is therefore recommended that this test procedure be used in determining the basic friction angle as well as the friction angle of the built-in filling material. Since the value of the measured friction angle with the built-in filling is not the base friction angle, but the friction of the built-in filling between the sawn rock surfaces, a new symbol was introduced for this parameter,  $\varphi_{fb}$ . In addition, it was noticed that the walls of particularly karstified discontinuities make real contacts to a lesser extent, which is why measurements of the contact surfaces of the opposite discontinuity walls were performed. Since this is not a standardized test, a profiling film was applied, which is intended for narrow and uneven surfaces. The result is expressed by the joint contact coefficient  $JCC$ . Since in such cases the walls make contact in a smaller percentage, the normal stresses are redistributed only to certain points of contact, which is why

the normal stresses need to be corrected. The evaluation of the success of the modified Barton JRC-JCS model application was performed by regression analysis. According to the values of statistical parameters for both cases it can be determined that they have strong correlations and that the model that uses *JCC* to some extent underestimates the results of discontinuities shear strength, while the model that does not use *JCC* coefficient to some extent overestimates the results. It has also been shown that, mathematically speaking, the model, in which the logarithm of the ratio of discontinuity wall strength and normal stress reduces the roughness coefficient that ultimately contributes to the friction angle, is best described by the discontinuity shear strength.

**Keywords:** discontinuity; shear strength; joint roughness coefficient; filling

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. PREGLED MODELA ZA PROCJENU POSMIČNE ČVRSTOĆE .....	5
2.1. Poboljšanja parametara za procjenu hrapavosti stijenki diskontinuiteta .....	24
3. ZNAČAJKE LEŽIŠTA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA KANFANAR- JUG .....	29
3.1. Geološke značajke ležišta .....	29
3.2. Određivanje značajki diskontinuiteta .....	32
3.3. Uzorkovanje i priprema uzoraka za laboratorijska ispitivanja .....	44
4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA .....	45
4.1. Uvodno o metodama ispitivanja .....	45
4.2. Određivanje baznog kuta trenja .....	45
4.2.1. Određivanje baznog kuta trenja pokusom klizanja naginjanjem .....	45
4.2.2. Određivanje baznog kuta trenja u uređaju za izravni posmik .....	49
4.3. Određivanje tlačne čvrstoće stijenki diskontinuiteta .....	51
4.4. Određivanje hrapavosti stijenki diskontinuiteta .....	53
4.4.1. Određivanje hrapavosti ručnim profilometrom .....	53
4.4.2. Određivanje hrapavosti bezkontaktnom metodom .....	57
4.4.3. Određivanje hrapavosti preko amplitude .....	58
4.4.4. Određivanje hrapavosti povratnom analizom .....	60
4.5. Određivanje zijeve diskontinuiteta .....	61
4.6. Određivanje koeficijenta kontakta pukotine <i>JCC</i> .....	63
4.7. Određivanje značajki ispune .....	66
4.7.1. Određivanje granulometrijskog sastava .....	66
4.7.2. Određivanje plastičnih stanja .....	67
4.7.3. Određivanje mineraloškog sastava ispune .....	68
4.7.4. Određivanje posmične čvrstoće ispune za odabrana granična stanja .....	70

4.8.	Određivanje kuta trenja s ugrađenom ispunom .....	73
4.8.1.	Određivanje kuta trenja s ugrađenom ispunom pokusom klizanja naginjanjem	73
4.8.2.	Određivanje kuta trenja s ugrađenom ispunom u uređaju za izravni posmik ....	76
4.9.	Određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta .....	80
5.	RAZVOJ MODELA ZA PROCJENU POSMIČNE ČVRSTOĆE DISKONTINUITETA .....	87
5.1.	Polazišne osnove.....	87
5.2.	Razvoj modela .....	89
5.3.	Validacija modela primjenom regresijske analize.....	97
6.	ZAKLJUČAK .....	105

#### POPIS TABLICA

#### POPIS SLIKA

#### POPIS PRILOGA

Prilog 1: Rezultati ispitivanja baznog kuta trenja.....	3 lista
Prilog 2: Rezultati mjerenja hrapavosti diskontinuiteta.....	6 listova
Prilog 3: Rezultati ispitivanja materijala ispune.....	17 listova
Prilog 4: Rezultati ispitivanja kuta trenja s ugrađenom ispunom.....	9 listova
Prilog 5: Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta s ispunom i bez ispune.....	84 lista

#### POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH JEDINICA

#### POPIS KRATICA



## 1. UVOD

Arhitektonsko-građevni kamen važan je proizvod rudarske djelatnosti nastao eksploatacijom u masivnim sedimentnim, magmatskim i metamorfnim stijenama, povoljnih fizičko-mehaničkih svojstava koje omogućavaju vađenje cjelovitih kamenih blokova pogodnih za industrijsku preradu. Eksploatacija je pretežito površinskim načinom s obzirom na udio otkrivke u ležištima. Međutim, u ležištu arhitektonsko-građevnog kamena Kanfanar-jug uz površinsku uvedena je i podzemna eksploatacija komorno-stupnom metodom otkopavanja. Taj pristup postavio je potrebu dimenzioniranja podzemnih prostorija, odnosno definiranja veličina raspona komora i dimenzija nosivih stupova, radi utvrđivanja stabilnosti otvorenih prostora. Stabilnost je uvjetovana ponajprije svojstvima stijenske mase koja je heterogena, anizotropna i diskontinuirana (sadržava pukotine i plohe oslabljenja). Važnu ulogu pritom imaju diskontinuiteti koji mogu biti zatvoreni, poluotvoreni i otvoreni, te ispunjeni sitnozrnim materijalom koji se pojavljuje kao rezultat trošenja stijene (rezidualno tlo).

Općenito, diskontinuitet (*engl.* discontinuity) je prihvaćen naziv koji se upotrebljava u mehanici stijena, a označava mehanički prekid u stijenskoj masi, koji ima malu ili zanemarivu vlačnu čvrstoću. To je zajednički naziv za većinu tipova pukotina, prslina, ploha slojevitosti, ploha škriljavosti te oslabljenih zona i rasjeda (ISRM, 1978).

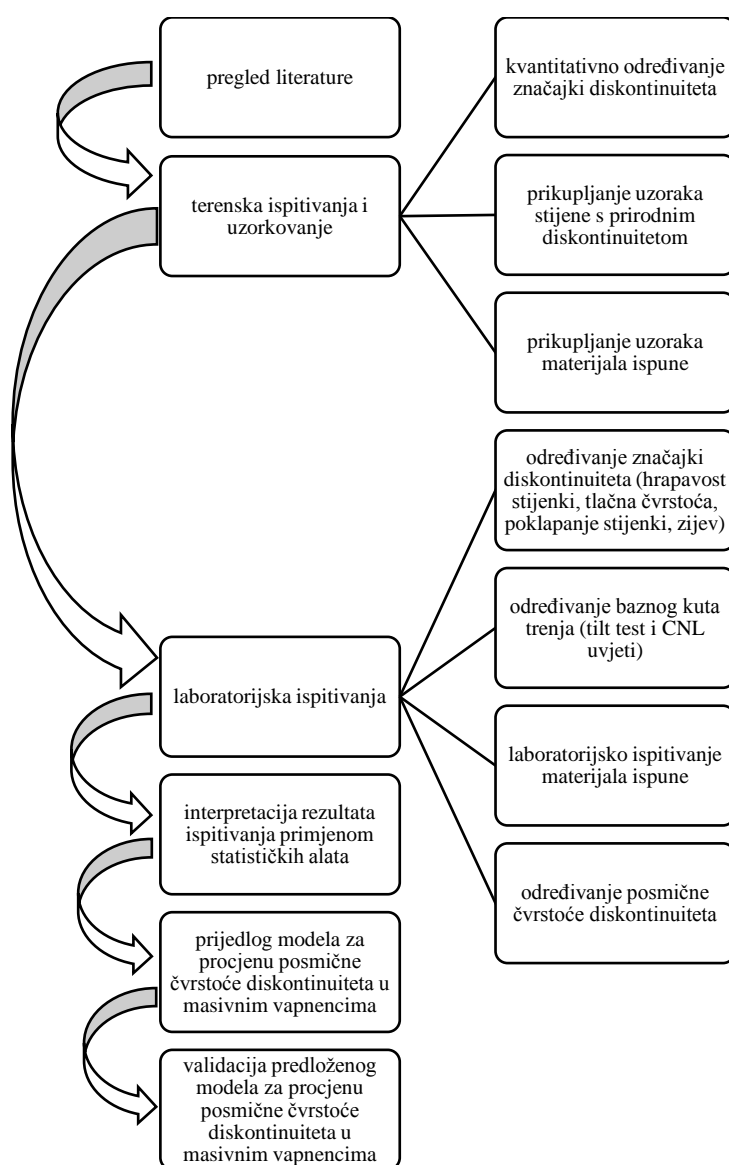
Detaljnijom prospekcijom ležišta Kanfanar-jug uočeni su izrazito okršeni diskontinuiteti koji su djelomično ispunjeni sitnozrnim materijalom. Sitnozrni materijal ispune može značajno smanjiti posmičnu čvrstoću diskontinuiteta u usporedbi s diskontinuitetom koji nema ispunu, jer može spriječiti kontakt stijenki diskontinuiteta tijekom smicanja. Poznavanjem uloge ispune diskontinuiteta, posebice specifičnosti koje su uočene u ležištu Kanfanar-jug, te njezina utjecaja na stabilnost podzemnih prostorija tijekom eksploatacije ležišta, pojavila se potreba za istraživanjima mehaničkih značajki diskontinuiteta u svrhu definiranja pouzdanog modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta. Uz problematiku određivanja čvrstoće stijenske mase posebno se istaknula potreba određivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta, čija se uloga pokazala ključnom pri dimenzioniranju podzemnih prostorija i stupova. Općenito, posmična čvrstoća (*engl.* shear strength) jest otpor djelovanju posmičnog naprezanja. Pri određivanju posmične čvrstoće diskontinuiteta ključna je čvrstoća svakog pojedinog diskontinuiteta. S obzirom na to da su laboratorijska ispitivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta dugotrajna i

skupa, pri čemu je zahtjevno osigurati uzorke za ispitivanje u dostatnom broju, pouzdan model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta jest nužan alat. U inženjerskoj praksi za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta najčešće je upotrebljavan Bartonov empirijski model. Procjena primjenom tog modela ne sadržava parametre koji bi uključivali morfološke nepravilnosti stijenci diskontinuiteta i značajke ispune.

Dosadašnja istraživanja poznata u literaturi provedena su s ciljem pronalaska odgovarajućeg modela za procjenu posmične čvrstoće uglavnom na uzorcima pravilnih stijenci diskontinuiteta koje se približno idealno poklapaju (umjetno proizvedenim hrapavostima), a diskontinuiteti u većini slučajeva nisu sadržavali ispunu. Naime, često se smatralo da je posmična čvrstoća diskontinuiteta s ispunom jednaka posmičnoj čvrstoći koju ima sam materijal ispune. Iako bi ta pretpostavka mogla biti prihvatljiva, kada je debljina ispune veća od određene kritične vrijednosti, za slučaj kada su vrijednosti debljine ispune manje u odnosu na vrijednosti amplitude hrapavosti pretpostavka je upitna jer ne uzima u obzir djelomično moguć kontakt nasuprotnih stijenci diskontinuiteta. Također, s obzirom na transport rezidualnog tla s površine, te procjeđivanje vode postoje slučajevi u ležištu kada ispune nema, jer je isprana, ili je ima samo djelomično ili ispuna potpuno zatvara slobodan prostor između stijenci diskontinuiteta, te je potreban jedinstven model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta. Zatim su uočene i izrazito hrapave stijenske i u velikom i u malom mjerilu promatranja nastale otapanjem stijenci vapnenačkih stijena. Naime, vapnenac je stijena koja sadržava mnogo minerala kalcita koji je topiv u vodi. Voda uz djelovanje atmosferskog ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) sadržanog u padalinama i tlu otapa vapnenac, te tako nastaje spora kemijska reakcija, koja tijekom duljeg razdoblja ima za posljedicu proces koji nazivamo okršavanje ili karstifikacija. Taj proces znatno je intenzivniji u razdrobljenim tektonskim zonama ili pojedinim vlačnim pukotinama kakve nalazimo u ležištu zbog lakšeg prodiranja, odnosno procjeđivanja i protjecanja vode kroz takve dijelove masiva. Zbog masivnosti stijena, odnosno manjeg broja pukotina u nekom volumenu masiva, okršavanje je na svakoj pukotini intenzivnije, zbog čega ih možemo smatrati karakterističnim.

Budući da u stijenskoj masi ležišta nisu postojali realni uvjeti za provedbu „in situ” ispitivanja, kojima bi se dobile relevantne vrijednosti parametara posmične čvrstoće za utvrđene sustave diskontinuiteta, javila se potreba za postavljanje modela za određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta, koji bi bio primjenjiv i u takvim slučajevima, te imao primjenu u svakodnevnoj inženjerskoj praksi.

Prije početka istraživanja postavljeni su ciljevi koji su uključivali detaljna terenska i laboratorijska ispitivanja morfoloških značajka stijenki diskontinuiteta vapnenaca ležišta arhitektonsko-građevnog kamena Kanfanar-jug u Istri. Zatim su za provedbu laboratorijskog određivanja hrapavosti i ispitivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta s ispunom i bez ispune pripremljeni reprezentativni uzorci. Na osnovi statističke analize rezultata ispitivanja planirano je postavljanje modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta s ispunom i bez ispune, koji bi imao realnu primjenu u inženjerskoj praksi, pri čemu je planirana i validacija modela. Plan navedenih istraživanja prikazan je na slici 1-1.



**Slika 1-1.** Plan istraživanja

Pritom su postavljene hipoteze istraživanja:

- Moguće je razviti matematički model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta s ispunom i bez ispune u masivnim i okršnim vapnencima.
- Moguće je odrediti i kvantificirati utjecaj značajki ispune na posmičnu čvrstoću diskontinuiteta.
- Moguće je modificirati metodu određivanja hrapavosti koja bi bila primjenjiva za vrlo hrapave i nepravilne stijenske diskontinuiteta.

Doktorski rad strukturiran je tako da su dosadašnja istraživanja i modeli za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta prikazani u poglavlju 2. Uz neka opažanja uočeno je i da su modeli s vremenom postajali sve složeniji, počevši od Zhao (Zhao, 1997), zatim Grasselija i Eggera (Grasselli i Egger, 2003), Tatonea i Grassellia (Tatone i Grasselli 2009) do Tanga i Wonga (Tang i Wong, 2016). Uz razvoj modela zabilježen je i razvoj metoda određivanja parametra hrapavosti JRC, pri čemu su obol problematici dali Tse i Cruden, što je također opisano u poglavlju 2. Poglavlje 3. odnosi se na ležište arhitektonsko-građevnog kamena Kanfanar-jug u Istri, gdje su preko geološkog opisa terena kao i rezultata terenskih ispitivanja predstavljene značajke samog ležišta. Budući da je u ležištu provedeno uzorkovanje za potrebe laboratorijskih ispitivanjima, u ovom poglavlju opisana je i priprema uzoraka za daljnja ispitivanja. Nakon opisa pripreme uzoraka slijedi poglavlje 4. u kojem su detaljno opisana laboratorijska ispitivanja, te su prikazani pripadajući rezultati uz osvrt na izmjerene vrijednosti. Rezultati ispitivanja na uzorcima s ispunom te usporedne analize između izmjerenih i procijenjenih vrijednosti dobivenih primjenom modificiranog Bartonova JRC – JCS modela opisane su u poglavlju 5. Poglavlje 5. sadržava i prijedlog novih modela te njihovu validaciju, dok su u poglavlju 6. izneseni zaključci provedenih istraživanja, te su predložene smjernice za daljnja istraživanja.

## **2. PREGLED MODELA ZA PROCJENU POSMIČNE ČVRSTOĆE**

Primjenjiv model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta iznimno je važan pri inženjerskim zahvatima u stijenskoj masi, osobito u masivnim vapnencima, kada iz objektivnih razloga ne postoji mogućnost provedbe terenskog ispitivanja posmične čvrstoće.

Posljednjih godina brojni autori izučavali su modele za određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta, no modeli su postajali matematički složeniji, a ulazne parametre nije bilo lako odrediti. Na tragu takvih promišljanja H. K. Singh i A. Basu (2018) analizirali su jedanaest odabranih modela za procjenu posmične čvrstoće. Analizirani modeli bazirani su na ispitivanjima provedenim na prirodnim uzorcima granita, kvarcita i pješčenjaka, kojima se nasuprotne stijenske diskontinuiteta nisu potpuno poklapale, te nisu sadržavali ispunu. Vrijednosti posmične čvrstoće diskontinuiteta određene primjenom analiziranih modela u odnosu na izmjerene vrijednosti znatno su se razlikovale. Jedna od primjera je model od Tatone i Grasselli (2011) koji je pokazao odstupanje od izmjerene vrijednosti posmične čvrstoće diskontinuiteta za 50%. Razlozi su što su neki modeli nastali na osnovi ispitivanja, koja su provedena pri manjim normalnim opterećenjima kada je otpor trenja pri smicanju primarno uzrokovan hrapavošću stijenki diskontinuiteta, dok je pri većim normalnim opterećenjima dominantan utjecaj baznog kuta trenja koji ovisi o tipu stijene (Singh i Basu, 2018). Među najistaknutijima autorima bili su Patton (1966), Barton (1973, 1977), Zhao (1997), Grasselli i Egger (2003), zatim Tatone i Grasselli (2011). Od početka inženjerskog promišljanja postoji potreba za izučavanjem interakcije dviju površina pri klizanju u različitim pojavama, no Pattonov bilinearni model smatra se početkom razvoja modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta.

Opisujući povijest razvoja znanja o trenju i klizanju, Patton je u svojem doktorskom radu naveo kako je još Leonardo da Vinci početkom 16. stoljeća konstatirao da je otpor klizanju direktno proporcionalan normalnoj sili kliznih površina i da je neovisan o površini kontakta između kliznih ploha. Nadalje je naveo, da je Coulomb 1785. godine eksperimentalno potvrdio te tvrdnje pred Francuskom akademijom i tako su tvrdnje postale općeprihvaćene u inženjerskoj i znanstvenoj praksi, te ih danas poznajemo kao Coulombov zakon (Patton, 1966).

S druge strane izučavanja klizanja nazubljenih površina (površina s inklinacijama) razvijala su se u približno isto vrijeme kada i Coulombov zakon, ali nisu zaživjela s obzirom na to da su se razlikovala od Coulombovih tvrdnji. Patton u svojem doktorskom radu također navodi kako je Leonard Euler 1750. godine dva znanstvena rada s temom klizanja površina s inklinacijama

predstavio Kraljevskoj akademiji znanosti u Berlinu. Euler je tada pretpostavio da dvije nasuprotne i nazubljene površine imaju površinske nepravilnosti pod nekim kutom  $\alpha$ . Zatim je zaključio, da je bitno uočiti najveći kut zuba  $\alpha$ , jer je on relevantan pri sili trenja, odnosno pri klizanju promatranih ploha u kontaktu.

Eulerova i Coulombova istraživanja bila su osnova za razvoj modela, kojima bi bilo moguće procijeniti posmičnu čvrstoću diskontinuiteta, te polazišna točka za razvoj Pattonova bilinearnog modela i Bartonova empirijskog modela.

Početak razvoja modela koji bi objasnio mehanizam klizanja dviju nasuprotnih stijenci diskontinuiteta započinje s Pattonovim detaljnim terenskim i laboratorijskim ispitivanjima 1966. godine. Kao baza za razvoj novog modela uz brojna istraživanja drugih autora poslužio mu je Eulerov model. Eulerov model glasi:

$$S = N \tan \alpha$$

2-1

gdje su:

$S$  – sila smicanja (N)

$N$  – sila koja djeluje na površinu (normalna sila) (N)

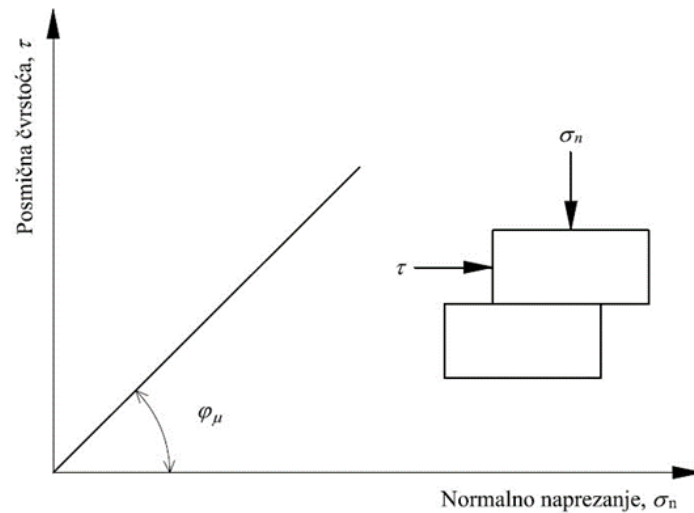
$\alpha$  – maksimalni kut na nazubljenoj površini (°).

S obzirom da su stijene prirodni materijali, te da na vrlo maloj površini uzorkovanja njihova svojstva mogu znatno varirati, Patton je odlučio laboratorijski proizvesti uzorke koji bi simulirali neravne površine stijenskih diskontinuiteta. Pritom se koristio gipsom (engl. *plaster of Paris*), jer se pokazalo da su njegova svojstva najbližnja svojstvima stijena. Da bi gipsu mijenjao čvrstoću, dodavao je punila kao što je drobljeni kameni pijesak i kaolinit. Za potrebe laboratorijskih ispitivanja posmične čvrstoće pripremio je četiri serije uzoraka s četiri vrste zuba s nagibima od 25°, 35°, 45° i 55°. Za svaku vrstu nagnutih zuba izliveno su dvije serije uzoraka – serija s četiri zuba i serija s dva zuba. Visine zuba iznosile su pet milimetara. U tablici 2-1 prikazan je sastav uzoraka i pripadajuće čvrstoće, te Youngov modul elastičnosti  $E_t$  (tangentni).

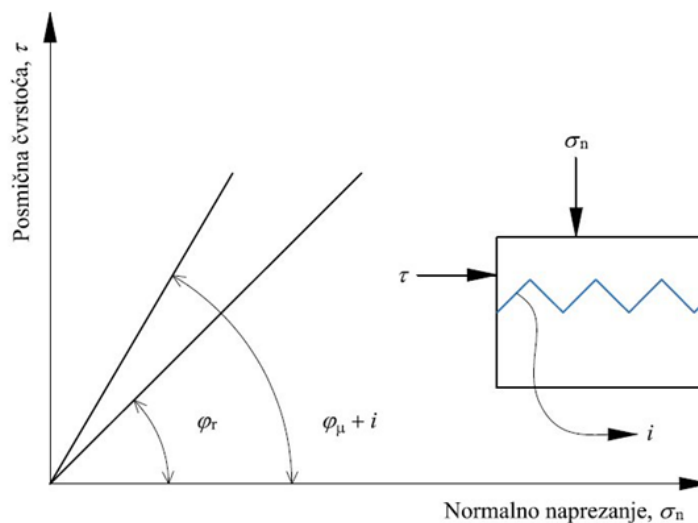
**Tablica 2-1.** Prikaz podataka o ispitnim uzorcima kojim se Patton koristio u laboratorijskim ispitivanjima

Punilo	Pijesak	Pijesak	Kaolinit	Kaolinit
Omjer punilo : gips	3 : 1	3 : 2	1 : 1	1 : 2
$\varphi_r$ (°) <sup>(1)</sup>	34 – 36	35 – 39	27 – 28	29 – 30
Ispitivanja na cilindričnim laboratorijski pripremljenim uzorcima				
Srednja vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće (MPa)	1,71	8,55	4,14	6,81
Srednja vrijednost vlačne čvrstoće (MPa)	0,37	0,83	0,48	0,62
$E_t$ (GPa) <sup>(2)</sup>	4,5	7,93	1,52	3,10
<sup>(1)</sup> Vrijednosti dobivene nakon većeg pomaka				
<sup>(2)</sup> Tangentni modul elastičnosti određen na 50 % vršne čvrstoće				

Patton je ispitivanja proveo u uređaju za izravni posmik. Uređaj je imao mogućnost elektroničkog bilježenja opterećenja, te vertikalnog i horizontalnog pomaka. Tako je omogućeno dobivanje potpune krivulje naprezanje-pomak čak i s lomljivim materijalima. Uređaj za smicanje sastojao se od sljedećih dijelova: kutije za posmik na koju se nanosi horizontalna posmična sila, motora, prijenosa brzine i zupčanika koji razvija i prenosi posmičnu silu, okvira za opterećenje i utega za primjenu normalne sile, dvostruke tlačne ćelije za mjerenje posmične sile pri naprezanju, te LVDT pretvornika za mjerenje horizontalnog i vertikalnog pomaka. Pri ispitivanju konstantna brzina pomaka iznosila je 0,16 (mm/min). Većina rezultata bilježena je izravno u Moseleyev x-y snimač. Nakon serije ispitivanja na jednoj vrsti uzorka, iz grafa naprezanje-horizontalni pomak koji je izradio x-y snimač iščitane su vršna i rezidualna čvrstoća, te zabilježene u dijagram posmične čvrstoće pri odgovarajućem normalnom naprezanju. Rezultati nekoliko takvih ispitivanja spojeni su linijama, pri čemu su nastale dvije anvelope sloma, jedna koja predstavlja vršnu i druga za rezidualnu posmičnu čvrstoću, kao što je prikazano na slikama 2-1 i 2-2. Oznaka  $i$  predstavlja inklinaciju, odnosno kut zuba, kut  $\varphi_u$  predstavlja kut otpora, koji pruža površina smicanja, a kut  $\varphi_r$  jest kut otpora pri rezidualnom smicanju, koji se dobiva iz asimptotski minimalnih vrijednosti posmične čvrstoće pri velikim pomacima.



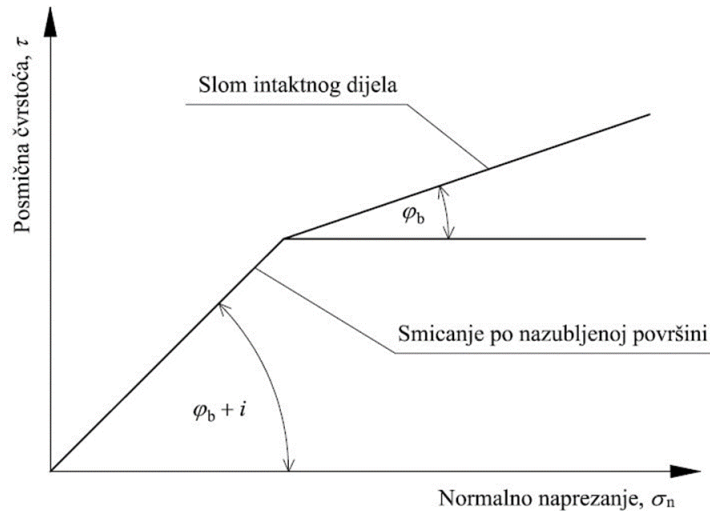
**Slika 2-1.** Grafički prikaz Pattonovih rezultata ispitivanja, 1. dio (Patton, 1966)



**Slika 2-2.** Grafički prikaz Pattonovih rezultata ispitivanja, 2. dio (Patton, 1966)

Na temelju provedenih laboratorijskih ispitivanja i terenskih opažanja Patton je uočio da se pri malim vrijednostima normalnih naprezanja smicanje odvija po plohama površinskih neravnina, a pri velikim naprezanjima, blizu vršnih vrijednosti tlačnih čvrstoća materijala, smicanje se odvija kroz intaktni dio materijala. Na osnovi analize anvelopa sloma za svaki set nazubljenih i ravnih uzoraka Patton je zaključio da mehanizam ponašanja nazubljenih površina pri smicanju najbolje opisuje bilinearni model, koji je prikazan na slici 2-3.





**Slika 2-3.** Pattonov bilinearni model smicanja (Patton, 1966)

Uz sliku 2-3 važno je napomenuti da iako drugi pravac ukazuje na koheziju pri velikim naprezanjima, slika je prikazana na način kako ju je Patton interpretirao u svojem originalnom radu.

Također je naveo da vrijednost  $i$  varira s promjenom normalnog naprezanja, odnosno pri manjim naprezanjima smicanje se odvija po zubima, a pri postizanju vršnih vrijednosti smicanje se nastavlja po intaktnom dijelu. Pattonov predloženi model za procjenu posmične čvrstoće stijena dan je sljedećim izrazom:

$$\tau = \sigma_n \tan(\varphi_b + i) \quad 2-2$$

gdje su:

$\tau$  – posmična čvrstoća (MPa)

$\sigma_n$  – normalno naprezanje (MPa)

$\varphi_b$  – bazni kut trenja (°)

$i$  – inklinacija (maksimalni kut zuba) (°).

Nedostatak Pattonova modela jest, što se odnosi na pravilno nazubljene plohe diskontinuiteta bez ispune, a određivanje efektivnog kuta neravnina po čijim bi plohama došlo do smicanja u

širem području mogućih vrijednosti normalnih napreznja nije jednostavno, odnosno bez ispitivanja gotovo je nemoguće.

Pretpostavljajući da se najveće hrapavosti pojavljuju na vlačnim pukotinama, Barton (Barton, 1973) je proveo niz ispitivanja na umjetno proizvedenim vlačnim pukotinama. Izradio je uzorke s rasponom hrapavosti za koji je pretpostavio da bi se mogle nalaziti u prirodi. Pri ispitivanjima se koristio rasponom normalnih napreznja između 0,5 i 2 MPa. Pattonova pretpostavka da Coulombov zakon vrijedi pri višim normalnim napreznjima bila je smjernica za daljnji razvoj modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta.

Na osnovi dotad u literaturi objavljenih rezultata mjerenja u stijenskoj masi Barton je uočio da se vrijednosti baznog kuta trenja kreću od 28,5° do 31°, te je u izraz (2-2), Pattonov bilinearni model, uvrstio je vrijednost 30°, a umjesto  $i$  uveo je varijablu  $2d_n$ , gdje je  $d_n$  vršni kut dilatancije. To je varijabla koja ovisi o napreznjima i Barton je uvodi za slučaj hrapavih površina stijenki diskontinuiteta. Na osnovi opažanja dan je sljedeći izraz:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan(2d_n + 30^\circ) \quad 2-3$$

Statističkim analizama uočio je da logaritamska funkcija najbolje opisuje matematičku zavisnost između parametara, te umjesto  $d_n$  uvrstio u izraz (2-3) sljedeći izraz:

$$d_n = 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right) \quad 2-4$$

gdje je:

$\sigma_c$  – tlačna čvrstoća diskontinuiteta (MPa).

Predloženi kriterij za vršnu čvrstoću u prvom obliku glasio je:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \left[ 20 \log_{10} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right) + 30^\circ \right] \quad 2-5$$

Dakle, Barton je zaključio da pri malim normalnim napreznjima  $\frac{\sigma_c}{\sigma_n} > 200$  funkcija  $\tan(2d_n + 30^\circ)$  raste brzo i te su vrijednosti izuzete iz daljnje analize, a pretpostavljeno je da

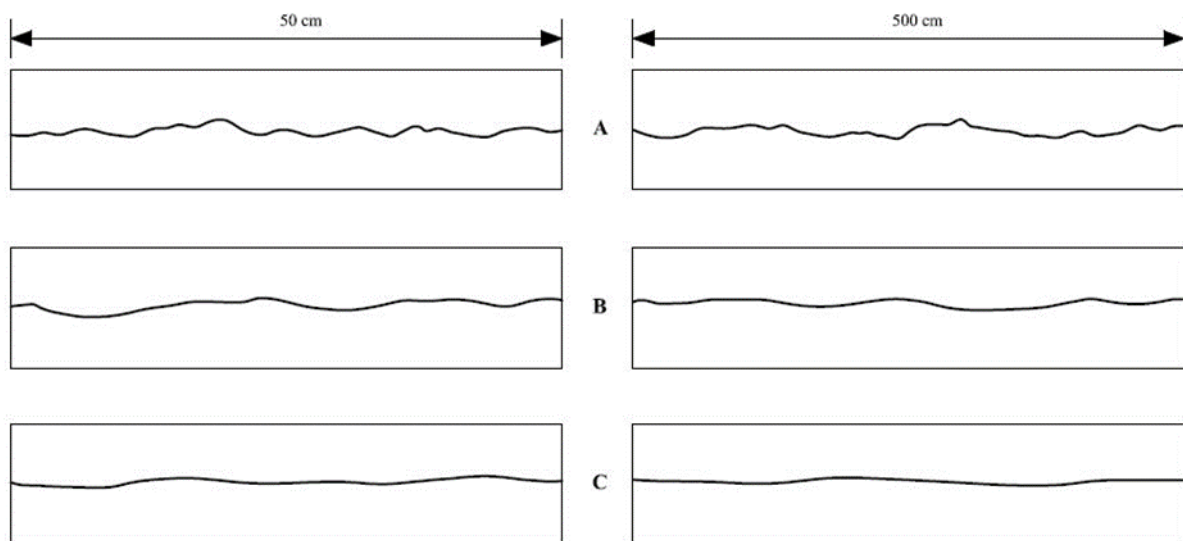
je najprikladniji izraz kako slijedi:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_n} \geq 100; \quad \tau = \sigma_n \tan 70^\circ \quad 2-6$$

$$100 > \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \geq 1.0; \quad \tau = \sigma_n \tan \left[ 20 \log_{10} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right) + 30^\circ \right] \quad 2-7$$

Kod izraza (2-5) i (2-7) važno je da sadržavaju samo geometriju površine stijenki stijene i njezinu mehaničku čvrstoću, a zanemaruju mogući utjecaj drugih efekata.

Budući da je uočio da hrapavost uvelike utječe na vrijednost posmične čvrstoće diskontinuiteta, razvio je način na koji bi se hrapavost stijenki mogla izmjeriti i prikazati brojem. Taj parametar hrapavosti nazvao je *JRC* (engl. *joint roughness coefficient*). U promišljanjima je prvotno krenuo s profilima hrapavosti kojima je dodao vrijednosti 20, 10 i 5 za A, B i C (slika 2-4).



**Slika 2-4.** Bartonova preliminarna klasifikacija hrapavosti (Barton, 1973)

Hrapavosti površine i pripadajuće procjene posmične čvrstoće postavio je na sljedeći način:

A. HRAPAVA i VALOVITA (engl. *rough undulating*)

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \left[ 20 \log_{10} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right) + 30^\circ \right] \quad 2-8$$

B. GLATKA i VALOVITA (engl. *smooth undulating*)

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \left[ 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right) + 30^\circ \right] \quad 2-9$$

C. GLATKA I PRIBLIŽNO RAVNA (engl. *smooth nearly planar*)

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \left[ 5 \log_{10} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right) + 30^\circ \right] \quad 2-10$$

Koeficijent hrapavosti  $JRC$  za pojedini profil određen je na temelju izraza:

$$JRC = \frac{\tan^{-1} \left( \frac{\tau}{\sigma_n} \right) - \varphi_b}{\log_{10} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right)} \quad 2-11$$

gdje su:

$\tau$  – posmična čvrstoća (MPa)

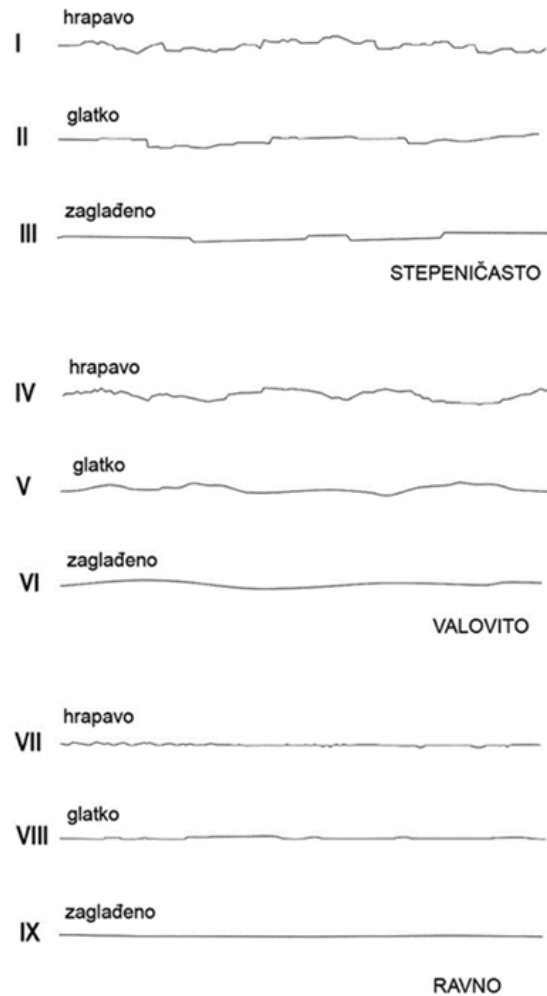
$\sigma_n$  – normalno naprezanje (MPa)

$\varphi_b$  – bazni kut trenja ( $^\circ$ )

$\sigma_c$  – tlačna čvrstoća stijenki diskontinuiteta (MPa).

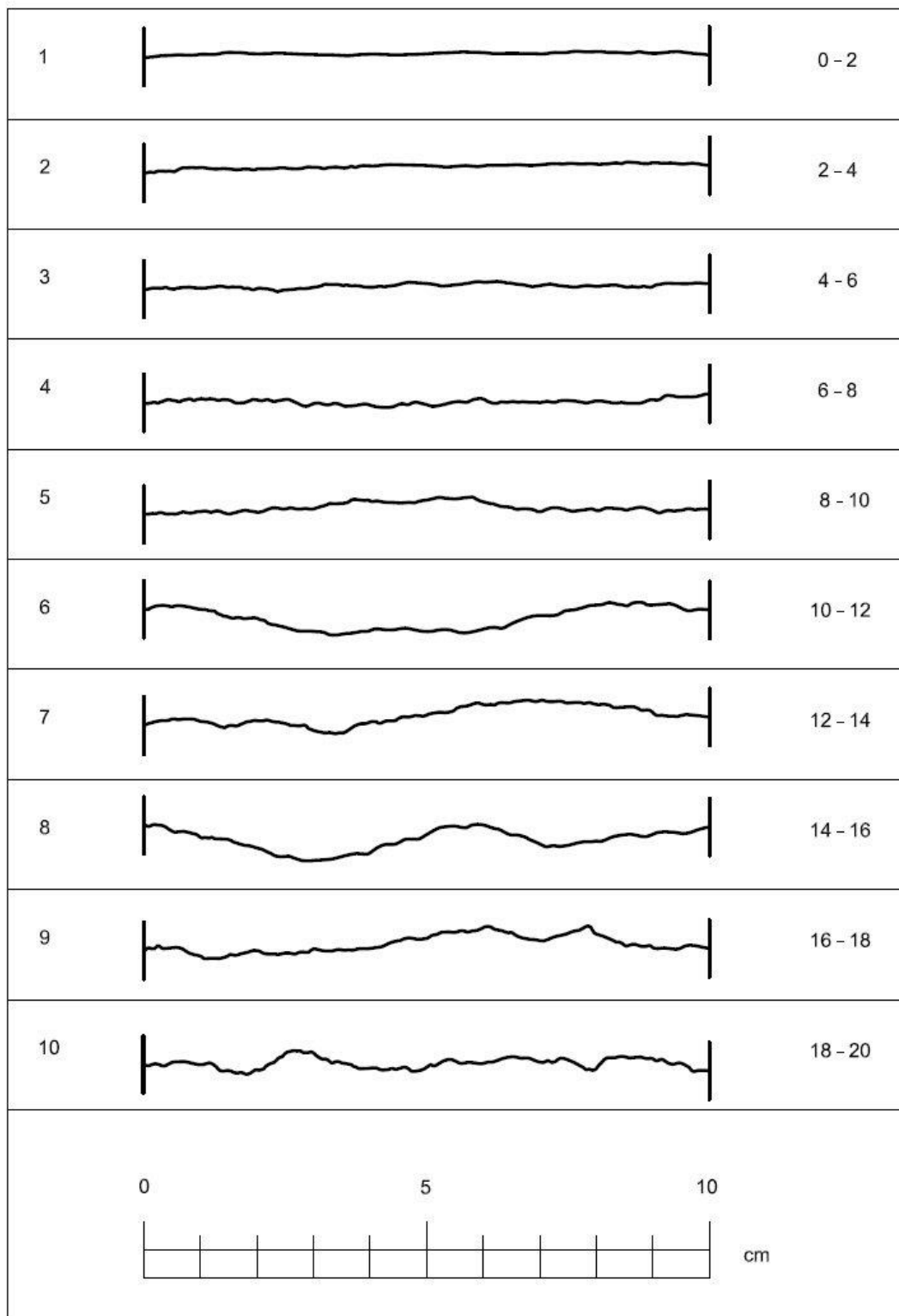
Izraz (2-11) predstavlja povratnu analizu (engl. *back calculating*), gdje se  $JRC$  računa na osnovi izmjerene vrijednosti vršne posmične čvrstoće ( $\tau$ ) pri određenom normalnom naprezanju ( $\sigma_n$ ), pri čemu se bazni kut trenja ( $\varphi_b$ ) određuje pokusom klizanja naginjanjem (engl. *tilt test*).

Za opis hrapavosti predložena je slika 2-5, koja je zapravo razvijena i predložena u Q klasifikaciji, dok su za procjenu koeficijenta hrapavosti  $JRC$  predloženi standardni profili, koji su prikazani na slici 2-6.



**Slika 2-5.** Opis hrapavosti u *Q* klasifikaciji

S obzirom na to da je utvrđen velik utjecaj hrapavosti, odnosno koeficijenta hrapavosti *JRC* na vršnu vrijednost posmične čvrstoće, a koji je ponekad nemoguće odrediti povratnom analizom, Barton i Choubey predložili su standardne profile hrapavosti (tipične profile hrapavosti) prema kojima se vizualnom usporedbom utvrđuju vrijednosti za profile mjerene ručnim profilometrima u rasponu vrijednosti od 0 do 20, kao što je prikazano na slici 2-6.



**Slika 2-6.** Standardni profili hrapavosti pukotine i pripadne JRC vrijednosti (Barton i Choubey, 1977)

Nakon definiranja hrapavosti kroz koeficijent  $JRC$  i uočavanja bolje primjenjivosti rezidualnog kuta trenja  $\varphi_r$ , Barton i Choubey (1977) postavili su model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta sljedećim izrazom:

$$\tau = \sigma_n \tan \left( \varphi_r + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad 2-12$$

gdje su:

$\tau$  – vršna posmična čvrstoća (MPa)

$\sigma_n$  – normalno naprezanje (MPa)

$JRC$  – hrapavost diskontinuiteta (-)

$\varphi_r$  – rezidualni kut trenja (°)

$JCS$  – jednoosna tlačna čvrstoća stijenki diskontinuiteta (MPa).

Ispitivanja su pokazala da je  $\varphi_r$  moguće odrediti unutar granica  $\pm 1^\circ$ . Srednja izmjerena vrijednost kuta vršne posmične čvrstoće,  $\arctan(\tau/\sigma_n)$  određena je točnošću  $\pm 0,5^\circ$ .

Za određivanje vrijednosti rezidualnog kuta trenja na trošnim stijenkama  $\varphi_r$  autori su na temelju rezultata provedenih indeksnih ispitivanja, odnosno određivanja tvrdoće s pomoću Schmidtova čekića rastrošenih i nerastrošenih stijenki, predložili izraz:

$$\varphi_r = (\varphi_b - 20) + 20(r/R) \quad 2-13$$

gdje su:

$\varphi_r$  – rezidualni kut trenja (°)

$\varphi_b$  - bazni kut trenja (°)

$r$  – Schmidtova tvrdoća na rastrošenim stijenkama diskontinuiteta (-)

$R$  – Schmidtova tvrdoća na nerastrošenim stijenkama diskontinuiteta (-).

Na istom principu predložena je i korekcija tlačne čvrstoće stijenki diskontinuiteta  $JCS$  na temelju stupnja trošnosti, koji se može odrediti iz omjera Schmidtove tvrdoće na rastrošenoj stijenki i tvrdoće na nerastrošenoj plohi ( $r/R$ ). Kada u inženjerskoj praksi nisu moguća izravna mjerenja na opisan način, Barton predlaže određivanje stupnja trošnosti stijenki diskontinuiteta jednostavnom procjenom pri kojoj se provodi korekcija za tlačnu čvrstoću stijenki  $JCS$  koja u najnepovoljnijoj situaciji može pasti do  $\frac{1}{4}$  vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće intaktnog stijenskog materijala (Barton, 1973).

Daljnjim eksperimentalnim istraživanjima utjecaja mjerila („efekt mjerila”) na posmične značajke diskontinuiteta, odnosno pada vrijednosti pojedinih značajki s povećanjem dimenzija ispitivanih uzoraka, utvrđen je velik utjecaj duljine diskontinuiteta na posmičnu čvrstoću i deformacijske značajke diskontinuiteta (Barton i Bandis, 1982). Utvrđeni utjecaj odnosi se zapravo na različitu uključenost površinskih neravnina koje kontroliraju mehanizam smicanja u odnosu na različitu duljinu diskontinuiteta. Taj utjecaj utvrđen je i za koeficijent hrapavosti  $JRC$  i tlačnu čvrstoću stijenki diskontinuiteta  $JCS$ . Na temelju utvrđenog utjecaja Barton i Bandis predložili su korekcije tih veličina u odnosu na mjerodavnu duljinu diskontinuiteta koja se zapravo odnosi na „in situ” veličinu bloka (Barton i Bandis, 1982). Korekcije su dane sljedećim izrazima:

$$JRC_n = JRC_0 \left[ \frac{L_n}{L_0} \right]^{-0,02JRC_0} \quad 2-14$$

$$JCS_0 = JCS_0 \left[ \frac{L_n}{L_0} \right]^{-0,03JRC_0} \quad 2-15$$

gdje su:

$JRC_n$  – hrapavosti stijenki diskontinuiteta korigirana na veličinu prirodnog bloka (-)

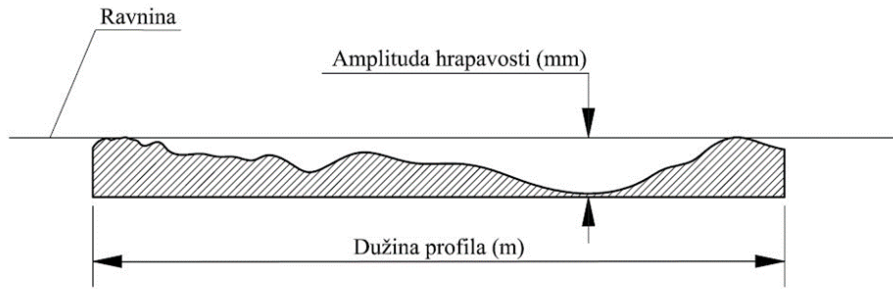
$JRC_0$  - hrapavost stijenki diskontinuiteta određena na duljini 10 cm (-)

$L_n$  – duljine promatranih stijenki diskontinuiteta u prirodnoj veličini bloka (m)

$JCS_0$  – jednoosna tlačna čvrstoća stijenki diskontinuiteta (MPa)

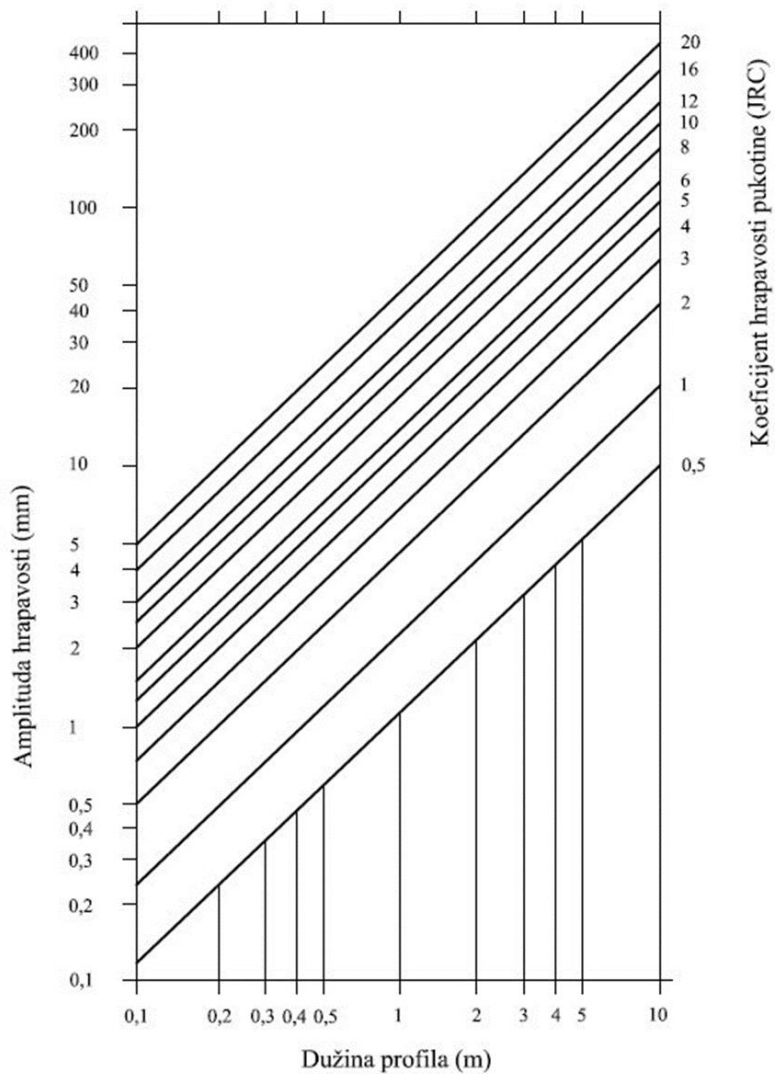
Osim predloženih izraza Barton je predstavio i dijagram za približnu procjenu vrijednosti koeficijenta hrapavosti  $JRC_n$  na temelju izmjerene maksimalne amplitude neravnina, tj. hrapavosti koji se može primijeniti na terenu, odnosno na mjerodavnoj duljini diskontinuiteta po principu prikazanom na slici 2-7.





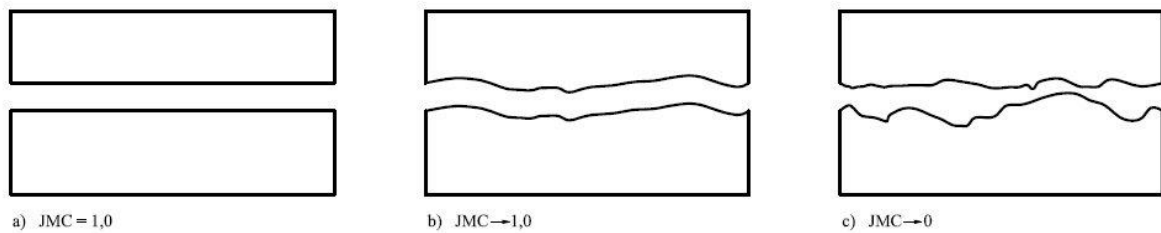
**Slika 2-7.** Određivanje amplitude hrapavosti (Barton i Bandis, 1982)

Dijagram za približnu procjenu vrijednosti koeficijenta hrapavosti  $JRC_n$  prikazan je na slici 2-8.



**Slika 2-8.** Određivanje  $JRC$ -a iz amplitude hrapavosti (Barton i Bandis, 1982)

Iako je već Barton uočio da diskontinuiteti kojima su nasuprotne stijenske u kontaktu i one kojima nisu u potpunosti u kontaktu imaju različita deformacijska svojstva i posmičnu čvrstoću, tu je činjenicu tek Zhao implementirao u model za procjenu posmične čvrstoće (Zhao, 1997). Zhao je predložio način tumačenja preklapanja nasuprotnih stijenki diskontinuiteta bezdimenzijskim faktorom *JMC* (engl. *joint matching coefficient*). To je faktor kojim se na osnovi vizualne procjene diskontinuitetu dodjeljuje broj od 0,1 do 1, pri čemu se 0,1 odnosi na 10 %, a 1 na 100 % poklapanja površine stijenki diskontinuiteta, kao što je prikazano na slici 2-9.



**Slika 2-9.** Zhaov prijedlog određivanja *JMC*-a (Zhao, 1997)

U skladu s predloženim određivanjem *JMC*-a Zhao je predložio model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta prema sljedećem izrazu:

$$\tau = \sigma_n \tan \left( \varphi_r + JRC JCM \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad 2-16$$

gdje su:

$\tau$  – posmična čvrstoća (MPa)

$\sigma_n$  – normalno naprezanje (MPa)

*JRC* – hrapavost diskontinuiteta (-)

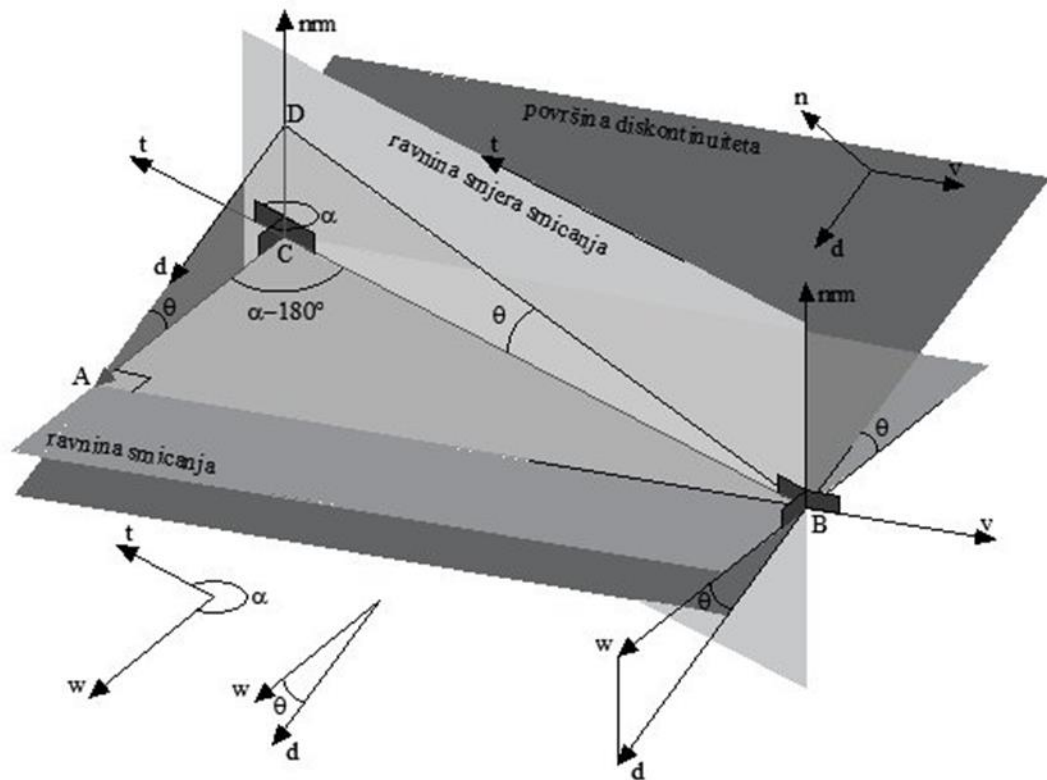
*JMC* – koeficijent poklapanja stijenki diskontinuiteta (-)

$\varphi_r$  – rezidualni kut trenja (°)

*JCS* – jednoosna tlačna čvrstoća stijenki diskontinuiteta (MPa).

Nastavno na Bartonova istraživanja, Grasselli je kao glavni problem prepoznao mjerenje hrapavosti. Tražio je na koji bi se način hrapavost mogla opisati brojem ili matematičkim izrazom, a da se pritom u kriterij posmične čvrstoće uvede morfologija diskontinuiteta. Zatim

je uočio, da mjerenje jednog profila ne može precizno odrediti utjecaj morfologije na posmičnu čvrstoću, te je uveo parametre  $A_0$  (maksimalna površina kontakta),  $\theta_{max}^*$  (maksimalni kut nagiba neravnina) te parametar  $C$  (parametar koji se odnosi na hrapavost), kao što je prikazano na slici 2-10.



**Slika 2-10.** Geometrijska identifikacija površine diskontinuiteta (Grasselli i Egger, 2003)

Proveo je mjerenja digitalnim profilometrom, tako da je površina digitalizirana i rekonstruirana upotrebom triangulacijskog algoritma, čime je diskretizirao površine diskontinuiteta u konačan broj trokuta, kojima je zatim pridodao geometrijske orijentacije (Grasselli i Egger, 2003). Nakon toga utvrdio je funkciju raspodjele pripadnih površina za određene nagibe neravnina u odnosu na ukupnu potencijalnu kontaktnu površinu stijenki, pri čemu je regresijskom analizom za utvrđenu funkciju dobio parametar hrapavosti  $C$ . Na temelju rezultata ispitivanja posmičnih čvrstoća postavio je model, koji povezuje uvjete naprezanja, odnosno odnos naprezanja i vlačne čvrstoće s utvrđenom funkcijom, čime je dobio efektivni kut nagiba neravnina, koje se pri smicanju neće slomiti, nego će doprinijeti baznom kutu trenja.

Prema tim zapažanjima i upotrebom podataka dobivenih triangulacijom opisao je varijacije potencijalne površine kontakta u odnosu prema određenom kutu nagiba primjenom izraza:

$$A_0^* = A_0 \left[ \left( \frac{\theta_{max}^* - \theta^*}{\theta_{max}^*} \right) \right]^C \quad 2-17$$

S obzirom na dotad prikazanu problematiku i primjenu metode kojom je mjerena hrapavost stijenki diskontinuiteta (3D), predložen je matematički izraz za procjenu posmične čvrstoće:

$$\tau_p = \sigma_n \tan(\varphi_r') \left( 1 + \exp \left( - \frac{1}{9A_0} \frac{\theta_{max}^*}{C} \frac{\sigma_n}{\sigma_t} \right) \right) \quad 2-18$$

gdje su:

$\tau_p$  – posmična čvrstoća (MPa)

$\sigma_n$  – prosječno normalno naprezanje (MPa)

$A_0$  – maksimalna površina kontakta (mm)

$\varphi_r'$  – kut unutarnjeg trenja, rezidualni (°)

$\theta_{max}^*$  – maksimalni kut nagiba neravnina (°)

$\sigma_t$  – vlačna čvrstoća materijala (MPa)

$C$  – parametar hrapavosti.

Međutim, ni taj model nije uključivao ispunu diskontinuiteta.

Uz utvrđivanje modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta Grasselli je analizirao i utjecaj veličine uzorka na vrijednosti posmične čvrstoće diskontinuiteta. Proveo je ispitivanja tako da je kroz in situ digitalizaciju i analizu dviju susjednih površina ( $\sim 2 \times 3 \text{ m}^2$  i  $\sim 2 \times 2 \text{ m}^2$ ) migmatitno-gnajskih diskontinuiteta istražio utjecaj veličine uzorka na procjene hrapavosti. Osim toga istražio je utjecaj mjerne rezolucije na procjenu hrapavosti digitalizacijom uzoraka malih razmjera ( $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ) iz istog diskontinuiteta promjenjivom razlučivošću. Rezultati su pokazali da se hrapavost povećava kao funkcija veličine prozora za uzorkovanje (engl. *sampling window*), to jest kombinirana valovitost i neravnomjernost diskontinuiteta u odnosu na njegovu srednju ravninu povećavaju se s mjerilom. U usporedbi s veličinom prozora uzorkovanja pokazalo se, da rezolucija površinskih mjerenja ima mnogo veći utjecaj na procjene hrapavosti. Važno je napomenuti, da je opaženo smanjenje čvrstoće na smicanje s

povećanjem mjerila promatranja, kao što je uočeno u mnogim prethodnim studijama, te je traženo objašnjenje uloge hrapavosti u toj pojavi (Tatone i Grasselli, 2013).

Uz već opisan razvoj modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta, te utjecaja veličine promatranja, hrapavosti diskontinuiteta i kontakta stijenki diskontinuiteta, u tablici 2-2 dan je pregled još nekih modela.

**Tablica 2-2.** Pregled modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta

Autor i godina	Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta
Jing i dr., (1992.)	$\tau = \sigma_n \tan \left( \varphi_b + i_0 \left( 1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right) \right)^{k_2}$
Kulatilake i dr., (1995.)	$\tau = \sigma_n \tan \left( \varphi_b + a(SRP)^c \left[ \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]^d + I \right)$
Zhao (1997.)	$\tau = \sigma_n \tan \left[ \varphi_r + JRCJCM \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$
Aydan i dr., (1996.)	$\tau = [c_j(1 - \exp(-B_1\sigma_n)) + \sigma_n(\tan \varphi_i + A_2 \exp(-B_2\sigma_n))]$
Grasselli i Egger (2003.)	$\tau_p = \sigma_n \tan(\varphi_r) \left( 1 + \exp \left( -\frac{1}{9A_0} \frac{\theta_{max}^* \sigma_n}{C \sigma_t} \right) \right)$
Tatone i Grasselli (2009.)	$\tau = \sigma_n \tan \left[ \varphi_b + \left( \frac{\theta_{max}^*}{C+1} \right)^{1.18 \cos \beta} \right] \times \left[ 1 + \exp \left[ -\frac{\theta_{max}^* \sigma_n}{C+1 9A_0 \sigma_t} \right] \right]$
Ghazvini i dr., (2012.)	$\tau = \sigma_n \tan \left( \varphi_b + i_0 \frac{(\sigma_c/\sigma_n)^a}{1 + (\sigma_c/\sigma_n)^a} \right)$
Lee i dr., (2014.)	$\tau = \sigma_n \left[ \tan \varphi_b + 0,017(JRC)^{0,89} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right)^{0,42} \right]$
Tang i dr., (2014.)	$\tau = \sigma_n \tan \left[ \varphi_b + 10 \frac{A_0 \theta_{max}^*}{1+C} \frac{\left( \frac{\sigma_t}{\sigma_n} \right)}{1 + \left( \frac{\sigma_t}{\sigma_n} \right)} \right]$
Jang i Jang (2015.)	$\tau = \sigma_n^B \tan(\varphi_b + \varphi_j + s_n)$
Tang i Wong (2016.)	$\tau_p = \sigma_n \tan \left[ \varphi_b + \left[ \frac{1}{1 + \frac{8A_0 \theta_{max}^*}{(1+C)k}} \right] \frac{4A_0 \theta_{max}^*}{C+1} \left[ 1 + \exp \left( -\frac{1}{9A_0} \frac{\theta_{max}^* \sigma_n}{C+1 \sigma_t} \right) \right] \right]$

Oznake:  $\tau$  – posmična čvrstoća,  $\sigma_n$  – normalno naprezanje,  $\varphi_b$  – bazni kut trenja,  $i_0$  – početni kut dilatancije,  $k_2$  – konstanta materijala,  $\sigma_c$  – tlačna čvrstoća,  $SRP$  – stacionarni profil hrapavosti,  $JCS$  – jednoosna tlačna čvrstoća stijenci diskontinuiteta,  $d$  – konstanta materijala,  $I$  – stacionarni kut nagiba,  $JCM$  – koeficijent poklapanja stijenci diskontinuiteta,  $c_j$  – kohezija stijenci diskontinuiteta,  $B_1, B_2, A_2$  – koeficijenti materijala,  $\varphi_i$  – kut unutarnjeg trenja,  $A_0$  – maksimalna površina kontakta,  $\theta_{max}^*$  – maksimalni kut nagiba neravnina,  $\sigma_t$  – vlačna čvrstoća,  $C$  – parametar hrapavosti,  $\varphi_j$  – kut hrapavosti i  $s_n$  – normalna komponenta smicanja.

Svim modelima prikazanim u tablici 2-2 zajedničko je da uključuju hrapavost stijenki diskontinuitet, normalna naprezanja, te bazni ili rezidualni kut trenja. Hrapavosti su ponekad dane kroz koeficijent hrapavosti *JRC*, a ponekad u vidu drugog parametra kao što je to slučaj kod modela predloženog od strane Kulatilake i suradnika koji su hrapavost opisali kroz stacionarni parameter hrapavosti *SRP* (engl. *Stationary roughness parameter*) (Kulatilake i dr., 1995). *SRP* je parametar hrapavosti koji je moguće odrediti preko statističkih parametara kao što su između ostalog  $Z_2$  i  $D$  o kojima je više opisano na kraju ovog poglavlja. Zatim, neki od modela uključuju konstante materijala ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ , i td.) nastale na osnovu regresijskih analiza izmjerenih i procijenjenih vrijednosti posmične čvrstoće, dok neki autori uvode potrebu za dodatnim laboratorijskim ispitivanjima kao što je vlačna čvrstoća,  $\sigma_t$ .

Nedvojbeno je da su autori uz predložene modele i nove spoznaje dali svoj doprinos izučavanju problematike procjene posmične čvrstoće diskontinuiteta, međutim modeli zbog upravo navedenog nisu bili praktični i jednostavni kao Bartonov *JRC – JCS* model, te nisu zaživjeli u inženjerskoj praksi.

Singh i Basu (2018) u svojim su istraživanjima na primjeru granita, kvarcita i pješčenjaka kojima se stijenske diskontinuiteta nisu poklapale i nisu sadržavale ispunu pokazali odstupanja od izmjerenih vrijednosti za 11 modela, dok su u radu prikazali njih 25. Analizirali su samo 11 modela s obzirom na to da su ti modeli nastali empirijski. Istraživanja su pokazala da modeli koji su predložili Barton (1973), Lee (2014) i Yang (2016) precjenjuju posmičnu čvrstoću, dok modeli koje su predložili Grasselli (2009), Ghazvini (2012) i Jang (2015) uvelike podcjenjuju posmičnu čvrstoću diskontinuiteta. Također su uočili da procjena posmične čvrstoće za svaki pojedini model varira ovisno o vrsti stijene za koju je primijenjen, što upućuje na mineraloške i teksturalne razlike ispitanih stijena i, što je još važnije, da modeli koji su razvijani na umjetno proizvedenim hrapavostima koje su imale pravilne zube daju visoku prosječnu pogrešku (Singh i Basu, 2018).

Na kraju osnovna pretpostavka svih modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta odnosi se na primjenu u slučaju diskontinuiteta bez ispune. Za slučaj diskontinuiteta s ispunom, u kojem debljina ispune nije znatno veća od površinskih neravnina stijenki, tako da pri smicanju ipak dolazi do njihovih kontakata, Barton, kao i većina ostalih autora smatraju da svaki takav slučaj treba zasebno promatrati (Barton i Choubey, 1977), odnosno ispitivanjem utvrditi posmičnu čvrstoću diskontinuiteta, što se zapravo jedino može ispravno provesti postupkom “in situ” ispitivanja. U slučaju deblje ispune, kada pri smicanju ne dolazi do kontakata stijenki diskontinuiteta, posmična čvrstoća diskontinuiteta isključivo ovisi o parametrima posmične

čvrstoće materijala ispune, koji se mogu utvrditi standardnim postupcima laboratorijskih ispitivanja tla.

## 2.1. Poboljšanja parametara za procjenu hrapavosti stijenki diskontinuiteta

Ukorak s razmatranjem problematike modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta razmatrala se i preciznija metoda određivanja hrapavosti stijenki diskontinuiteta koja je uključivala različite profilometre. S obzirom na mogućnost pogrešaka pri određivanju koeficijenta hrapavosti *JRC*, osobito pri usporedbi sa standardnim profilima, uvedeni su različiti statistički parametri, koji se određuju na temelju digitaliziranih profila hrapavosti, pomoću kojih se utvrđenim korelacijskim funkcijama računaju vrijednosti *JRC*-a.

Profilometri su jednostavni uređaji kojima se određuje serija linearnih profila hrapavosti površine uzorka u smjeru i okomito na smjer smicanja. Broj profila ovisi o dimenziji površine, no treba iscrtati najmanje tri profila duž svakog smjera (Aydan i dr., 1992; Grasselli, 2001). Razvojem znanosti, te tehnika i tehnologija počeli su se upotrebljavati 3D beskontaktni mjerni uređaji (npr. laserski skener, fotogrametrijska ili stereoskopska kamera) pri procjenama hrapavosti stijenki diskontinuiteta. Time je omogućeno obuhvaćanje cijele površine diskontinuiteta.

Radeći na razvoju modela za procjenu posmične čvrstoće, Grasselli i Tatone istražili su utjecaj mjerne rezolucije na procjenu hrapavosti digitalizacijom uzoraka malih razmjera ( $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ) iz istog diskontinuiteta promjenjivom razlučivošću (Tatone i Grasselli, 2003). U usporedbi s veličinom prozora uzorkovanja, pokazalo se da rezolucija površinskih mjerenja mnogo više utječe na procjenu hrapavosti (Tatone i Grasselli, 2009). Taj utjecaj prepoznao je i ISRM, te je svoju revidiranu normu za određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta dopunio uvrstivši mogućnost primjene 3D beskontaktnih mjernih uređaja za određivanje hrapavosti stijenki diskontinuiteta, pri čemu je reguliran korak mjerenja na  $< 0,5 \text{ mm}$ , te postavljen zahtjev za mjerenje s preciznošću većom od  $0,025 \text{ mm}$ .

U posljednjih nekoliko desetaka godina brojni autori razmatrali su parametre čijom bi se primjenom moglo preciznije odrediti *JRC* s obzirom na mogućnost pogrešaka pri određivanju, a osobito pri usporedbi sa standardnim profilima.



Jedan od najčešće upotrebljivanih parametara, koji se ujedno pokazao najboljim u procjeni vrijednosti JRC-a, jest  $Z_2$  (engl. *the root mean square of the first derivat of the profile*), koji je dan izrazom:

$$Z_2 = RMS \left( \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{1}{L} \sqrt{\int_{x=0}^{x=L} \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 dx} \quad 2-19$$

gdje su:

$L$  – duljina profila (mm)

$x$  – točka na profilu (mm)

$y$  – amplituda hrapavosti (mm).

RMS (engl. *root mean square*) jest korijen srednje kvadratne pogreške. To je vrijednost koja opisuje koliko procijenjena vrijednost odstupa od stvarne veličine.

Među prvim autorima, koji su primijenili statistički parametar  $Z_2$  bili su Tse i Cruden koji su za procjenu vrijednosti JRC-a predložili korelacijsku funkciju danu izrazom:

$$JRC = 32,2 + 32,47 \log_{10} Z_2 \quad 2-20$$

Nakon njih, veći je broj autora pokušao na temelju svojih istraživanja predložiti bolje korelacijske funkcije (Yang i dr., 2001; Tatone i Grasselli, 2010; Jang i dr., 2001), koje zapravo nisu znatno poboljšale procjenu koeficijenta hrapavosti  $JRC$ .

Nadalje, uz statistički parametar  $Z_2$  za određivanje  $JRC$ -a predloženi su i statistički parametar  $SF$  (engl. *Structure function*) i  $R_p$  (engl. *Roughness profile index*), te fraktalna dimenzija ( $D$ ).

Statistički parametri dani su izrazima:

$$SF = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} [f(x + dx) - f(x)]^2 dx = \left[ \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{x_{i+1} - x_i} \right]^{1/2} \quad 2-21$$

$$R_p = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{n-1} [(y_{i+1} - y_i)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2]^{1/2} \quad 2-22$$

gdje su:

$L$  – duljina profila (mm)

$x$  – točka na profilu (mm)

$y$  – amplituda (mm).

Uz navedene statističke parametre  $JRC$  neki autori predlagali su određivanje hrapavosti primjenom fraktalne geometrije. Predložene su korelacije fraktalne dimenzije  $D$  s  $JRC$ -om, pri čemu je za određivanje fraktalne dimenzije ( $D$ ) najčešće upotrebljavana metoda dijeljenja (engl. *divider method*) s obzirom na jednostavniju primjenu. Dijeljenje promatrane krivulje, odnosno profila hrapavosti izvodi se segmentiranjem s pomoću djelitelja, pri čemu se fraktalna dimenzija određuje prema izrazu koji je predložio Bea sa suradnicima (Bea i dr., 2011):

$$-D = \Delta \log \left( N + \left( \frac{f}{r} \right) \right) / \Delta \log(r) \quad 2-23$$

gdje su:

$N$  – broj ponavljanja dijeljenja (-)

$f$  – nepokriveni dio profila (-)

$r$  – duljina segmenta promatranog profila (mm).

Abolfazli i Fahminifar su proveli istraživanje dosad predloženih korelacija statističkih parametara  $Z_2$ ,  $R_p$  i  $SF$  s koeficijentom hrapavosti  $JRC$ , te fraktalne dimenzije i  $JRC$ -a. Primjenom 3D skenera proveli su mjerenja na 16 vlačnih pukotina s intervalima mjerenja 0,02 mm, 0,05 mm i 0,1 mm. Zatim su proveli ispitivanje izravnim posmikom, te povratnom analizom izračunali  $JRC$  prema Barton-u (izraz 2-11). Usporedbom izmjerenih i izračunatih vrijednosti dobivenih korelacijskim funkcijama, analizirali su postojeće korelacijske funkcije za određivanje  $JRC$ -a, te predložili svoje korelacije (Abolfazli i Fahminifar 2020). Pregled korelacijskih funkcija i njihovih standardnih grešaka mjerenja ( $\sigma_{aver}$ ) u odnosu na  $JRC$  određen povratnom analizom prikazan je u tablici 2-3.

**Tablica 2-3.** Kronološki pregled korelacijski funkcija prema statističkim parametrima

Autor i godina	Parametar	Korelacijska funkcija za određivanje JRC-a	$R^2$	$\sigma_{ave}$ (%)
Yu i Vayssade (1991)	$Z_2$	$JRC = 64,22Z_2 - 2,31$	0,983	13,75
Yang i dr., (2001)		$JRC = 32,69 + 32,98 \log(Z_2)$	0,993	1,98
Tatone i Grasselli (2010)		$JRC = 51,85(Z_2)^{0,60} - 10,37$	-	1,49
Abolfazli i Fahminifar (2020)		$JRC = 32,172 \log(Z_2) + 32,202$	0,988	1,36
Tse i Cruden (1979)	$SF$	$JRC = 37,28 + 16,58 \log(SF)$	0,984	1,29
Yu i Vayssade (1991)		$JRC = -3,28 + 121,13\sqrt{SF}$	0,972	41,37
Yang i dr., (2001)		$JRC = 37,63 + 16,5 \log(SF)$	0,993	0,38
Jang i dr., (2014)		$JRC = 73,95(SF)^{0,266} - 11,38$	0,972	41,37
Abolfazli i Fahminifar (2020)		$JRC = 16,67 \log(SF) + 37,726$	0,974	1,59
Mearz i dr., (1990)	$R_p$	$JRC = 411(R_p - 1)$	0,984	12,29
Yu i Vayssade (1991)		$JRC = 63,69 \sqrt{R_p - 1} - 2,31$	0,951	30,84
Tattone i Grasselli (2010)		$JRC = \left(0,036 + \frac{0,00127}{\ln(R_p)}\right)^{-1}$	-	2,71
Jang i dr., (2014)		$JRC = 65,9(R_p - 1)^{0,302} - 9,65$	0,973	8,24
Abolfazli i Fahminifar (2020)		$JRC = 47,62 + 93,74(R_p - 1)^{0,1235}$	0,974	5,5
Carr i Warnier (1989)	$D$	$JRC = -1022,55 + 1023,92D$	0,98	50,76
Jia i dr., (2011)		$JRC = 29,35(D - 1)^{0,46}$	0,904	76,57
Xu i dr., (2012)		$JRC = 28,5 \frac{33,18}{1 + 150(D - 1)}$	0,998	87,53
Jang i dr., (2014)		$JRC = 103,37(D - 1)^{0,3} + 8,54$	-	5,90
Abolfazli i Fahminifar (2020)		$JRC = 0,7064 + 180,5(D - 1)^{0,529}$	0,991	3,05

Abolfazli i Fahminifar uočili su da  $Z_2$  i  $SF$  imaju najjače korelacijske veze s  $JRC$ -om, s time da je za  $SF$  utvrđeno da se vrijednost  $JRC$ -a smanjuje s povećanjem intervala mjerenja. Uočili su

također da, iako fraktalna dimenzija omogućuje lako modeliranje prirodnih fenomena, pa tako i hrapavosti diskontinuiteta, rezultati mjerenja imaju velike standardne pogreške. Također je uočeno da je statistički parametar  $Z_2$  najpouzdaniji s obzirom na to, da uz jake korelacijske veze ima i najmanje standardne pogreške mjerenja (Abolfazli i Fahminifar, 2020).

Koeficijent determinacije  $R^2$  upotrijebljen je kao pokazatelj reprezentativnosti regresijskih modela, a određen je prema izrazu:

$$R^2 = \frac{\sum(y_{pi} - \bar{y})^2}{\sum(y_{Mi} - \bar{y})^2} \quad 2-24$$

gdje su:

$y_{pi}$  – i-ta procjena vrijednosti značajke

$y_{Mi}$  – i-ta izmjena vrijednosti značajke

$\bar{y}$  – aritmetička sredina skupa.

Raspon koeficijenta determinacije jest u intervalu od 0 do 1, a regresijski model uspješniji je ako ima koeficijent determinacije bliže 1. Jakost veza u regresijskom modelu interpretirana je prema Chaddocku i prikazana je u tablici 2-4.

**Tablica 2-4.** Chaddockova skala jakosti veza (Chaddock, 1925)

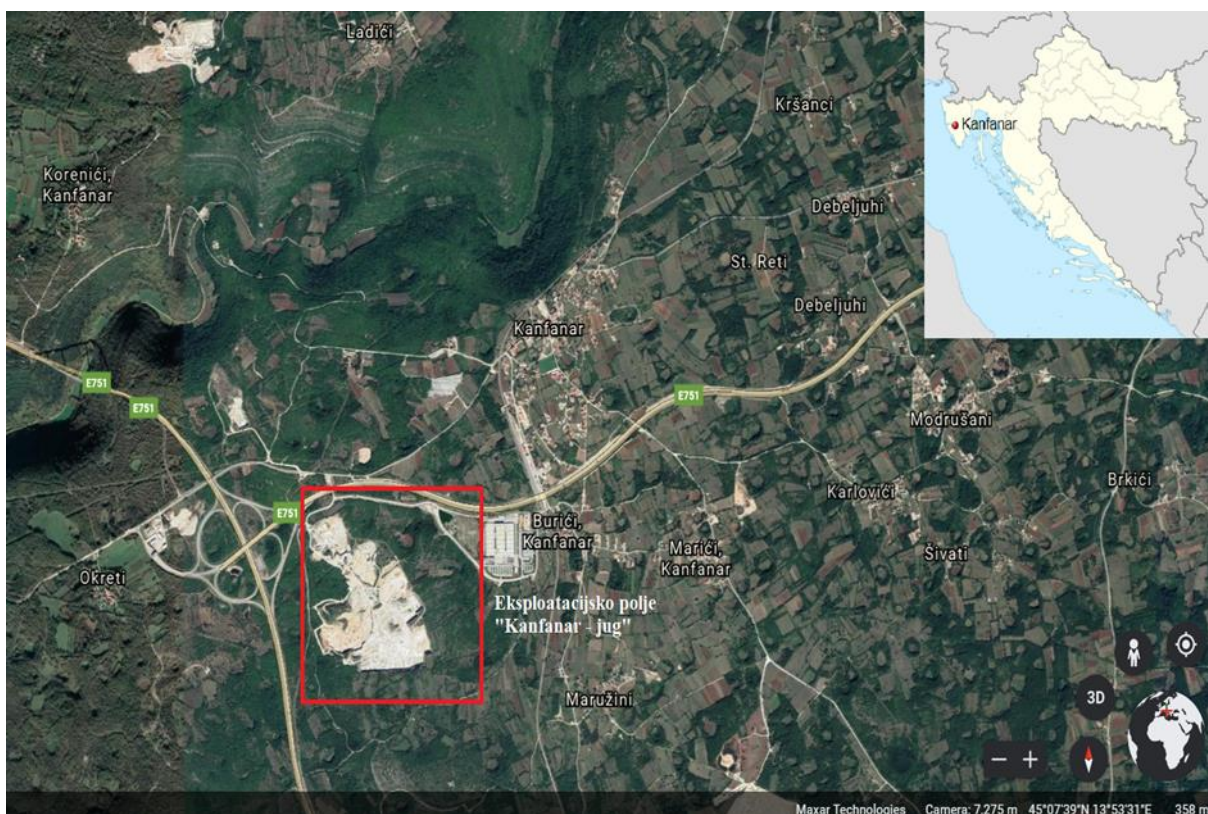
Vrijednost koeficijenta determinacije	Jakost veze
0.00	odsutnost
0,00 – 0,25	slaba veza
0,25 – 0,64	veza srednje jakosti
0,64 – 1,00	jaka veza
1,00	potpuna veza

Kao što je ranije navedeno, korelacije prikazane u tablici 2-3 zapravo nisu znatno poboljšale procjenu koeficijenta hrapavosti  $JRC$ , ali se neosporno radi o jakim korelacijskim vezama.

### 3. ZNAČAJKE LEŽIŠTA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA KANFANAR-JUG

#### 3.1. Geološke značajke ležišta

Ležište arhitektonsko-građevnog kamena Kanfanar-jug (slika 3-1) nalazi se u blizini istoimenog mjesta u Istri, na cesti Pazin – Rovinj blizu Istarskog ipsilona. Eksploatacijsko polje ukupne je površine oko 71,6 hektara i u vlasništvu je trgovačkog društva Kamen d.d. Pazin.



**Slika 3-1.** Geografski položaj eksploatacijskog polja Kanfanar-jug (preuzeto s <https://www.google.com/earth/>)

U eksploatacijskom polju Kanfanar-jug nalazi se više površinskih i podzemnih otkopa na kojima se eksploatira kamen, koji je poznat pod komercijalnim nazivom Istarski žuti (Giallo D'Istria).

Razmatrajući šire područje pojavljivanja, naslage Istarskog žutog predstavljaju kompaktni masivni slojevi vapnenca znakovite morfologije, jer se masivnošću i okršenošću posebno ističe u relativno zaravnjenom reljefu zapadne Istre. Taložen je u malo dubljoj sredini, koja je bila

zaštićena od izrazito plitkih morskih utjecaja – posljedica plime i oseke, jakih morskih struja, razaranja olujnim valovima, izronjavanja i erozije. Sve se to odrazilo na ujednačenoj litologiji, što je važno za arhitektonsko-građevni kamen. Debljina potpuno razvijenoga sloja jest 16 metara, a ako je zahvaćen gornjoaptskom emerzijom, debljina se smanjuje sve do oko šest metara (Vrkljan i dr., 2007).

Ležište arhitektonsko-građevnog kamena Kanfanar-jug izgrađuju slojeviti vapnenci krednih i paleogenih naslaga koji u stratigrafski tektonskom pogledu pripadaju istarskoj ploči, odnosno zapadnoistarskoj jursko-krednoj antiklinali (Cotman, 2006). Ležišta karakteriziraju slojeviti vapnenci različitih debljina kvazihorizontalnog zalijeganja, odnosno s kutom pada do tri stupnja u smjeru istoka. Eksploatacijski slojevi stratigrafski pripadaju naslagama formacije Kanfanar (KA) – donjeg apta, koji su podijeljeni u više slojeva čija je ukupna debljina od 6,7 do 6,8 metara (Matićec i dr., 2013). Iznad eksploatacijskih slojeva nalazi se neposredna krovina debljine do 9,5 metara, koju prvih 4,5 metara čine kompaktni i homogeni vapnenci sličnih fizičko-mehaničkih značajki kao i eksploatacijski slojevi, koji također pripadaju naslagama formacije Kanfanar (KA) – donjeg apta, dok preostali gornji dio čine svijetli, brašnasti i školjkasti vapnenci sa znatno lošijim fizičko-mehaničkim značajkama materijala, koji pripadaju naslagama formacije Kanfanar (KA) – gornjeg apta. Nakon neposredne krovine slijede mlađe naslage gornje krovine (formacija Crna (CN) – gornji alb) koju čine tanko uslojeni vapnenci s proslojcima lapora i raslojeni laporoviti vapnenci, koji su pri površini okršeni i pomiješani s rezidualnim tлом (zemlja crvenica) nastalim od netopivih minerala, koji zaostaju na površini. Ukupna je debljina naslage gornje krovine od pet do deset metara ovisno o reljefu terena. Naslage ležišta na čelu radilišta prikazane su na slici 3-2.



**Slika 3-2.** *Naslage ležišta na čelu radilišta*

Ležište strukturno karakteriziraju uglavnom dva pukotinska sustava, prvi koji se pruža približno u pravcu sjeverozapad-jugoistok i drugi s približnim pravcem pružanja sjeveroistok-jugozapad. Pukotine su uglavnom subvertikalne do vertikalne s manjim varijacijama kuta pada od  $85^\circ$  do  $90^\circ$ , ali sa znatno većim varijacijama kuta pružanja, čak do  $\pm 30^\circ$ . Pukotinski sustavi tako mogu međusobno zatvarati kutove od  $60^\circ$  do  $120^\circ$ . Postojanost ploha pukotina vrlo je velika, uglavnom veća od 30 metara, čime pukotine u kontinuitetu presijecaju eksploatacijske naslage, te naslage neposredne krovine i podine. S obzirom na to da su razmaci između pukotina vrlo veliki, ležište prema tome izgrađuju masivne stijene s vrlo velikim stijenskim blokovima koji su odvojeni prilično izraženim pukotinama, odnosno karakterističnim diskontinuitetima (Hrženjak i dr., 2014).

Naime, okršavanjem, odnosno kemijskim trošenjem (otapanjem) vapnenaca i dolomita pod utjecajem vode koja djeluje kao slaba ugljična kiselina (Tišljar, 2001), nastaje sekundarna, tj. šupljinska poroznost u stijenama. Taj proces znatno je intenzivniji u razdrobljenim tektonskim zonama ili pojedinim vlačnim pukotinama zbog lakšeg prodiranja, odnosno procjeđivanja i protjecanja vode kroz takve dijelove masiva. Zahvaljujući masivnosti stijena, odnosno manjem

broju pukotina u nekom volumenu masiva, proces okršavanja na svakoj je pukotini intenzivniji, zbog čega ih možemo smatrati karakterističnim.

### **3.2. Određivanje značajki diskontinuiteta**

Preliminarnim istraživanjima obaju sustava diskontinuiteta na pravilnijim dijelovima dostupnih ploha utvrđeno je da je riječ o valovito hrapavim stijenkama diskontinuiteta. Usporedbom sa standardnim profilima hrapavosti dobivene su vrijednosti koeficijenta hrapavosti  $JRC_{10}$  u rasponu klasa od 10 - 12, pa do 14 - 16. Međutim, na nepravilnijim dijelovima ploha diskontinuiteta utvrđene su neravnine, koje su znatno veće od onih prikazanih na standardnim profilima hrapavosti od 0 do 20 (slika 3-3).



**Slika 3-3.** *Mjerenje amplitude hrapavosti*

Određivanje tlačne čvrstoće stijenki diskontinuiteta provedeno je Schmidovim čekićem L-tipa uz ispitivanje na stijenki diskontinuiteta i u istoj razini sloja na intaktnom materijalu. U obama pukotinskim sustavima dobiveni su omjeri Schmidtove tvrdoće od 59/61. Dobiveni omjer



stupanj je trošnosti koji iznosi 0,96, a upućuje na to da je zapravo riječ o svježim stijenkama diskontinuiteta.

Ako se promatra veličina zijeva, utvrđeno je da je u rasponima od 3 do 10 i od 5 do 15 milimetara u prvom pukotinskom sustavu, te od 15 do 50 milimetara u drugom pukotinskom sustavu, što pokazuje da diskontinuiteti imaju umjereno širok, širok do vrlo širok zijev (slika 3-4).

Također, utvrđeno je da materijal ispune nejednoliko popunjava slobodan prostor između stijenki diskontinuiteta, gotovo u svim mogućim kombinacijama, odnosno da materijala ili nema, jer je ispran ili ima samo djelomično do slučaja kada materijal potpuno ispunjava slobodan prostor između stijenki.



**Slika 3-4.** *Mjerenje zijeva na terenu*

Ne treba isticati, da diskontinuiteti s takvim značajkama imaju presudan utjecaj prije svega na mogućnost eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena, a i na ekonomičnost samog otkopavanja. Taj utjecaj zapravo se najviše očituje u podzemnom načinu otkopavanja jer osim spomenutih utjecaja diskontinuiteti presudno utječu na stabilnost podzemnih prostorija. Uz površinski način otkopavanja blokova arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom

se polju, dakle, izvodi i podzemni način otkopavanja komorno-stupnom metodom otkopavanja uz nepravilan raspored stupova. Metoda se sastoji od otkopavanja blokova u tunelima i galerijama, čime nastaju komore uz ostavljanje potpornih stupova s nepravilnim rasporedom kako bi se prilagodili položaji pukotina radi većeg iskorištenja ležišta.

Razvoj i uvođenje podzemne eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena posljednjih desetljeća i u svijetu i kod nas posljedica je više postavljenih zahtjeva, koji su taj razvoj zapravo omogućili. Od postavljenih zahtjeva u literaturi se najčešće navode ekološki, vezani ponajprije uz zaštitu i očuvanje krajobraza, te tehničko ekonomski, vezani uz dublja ležišta, odnosno ležišta s povećanim debljinama otkrivke koje znatno povećavaju troškove na uklanjanju i odlaganju velikih količina jalovih materijala. Čimbenici koji su omogućili razvoj podzemnog načina otkopavanja ponajprije se odnose na tehnološke napretke vezane uz razvoj posebnih strojeva, od kojih su najvažniju ulogu imale lančane sjekačice (slika 3-5), te povećanje cijena i potražnja određenih materijala na tržištu, a zatim i na ostale čimbenike kao što su jednoliki uvjeti rada tijekom godine i slično (Hrženjak i dr., 2014)



**Slika 3-5.** Lančana sjekačica u podzemnom radu (preuzeto sa <https://www.kamen.hr/hr/kamenolomi/kanfanar/>)

Da bi se utvrdile morfološke značajke diskontinuiteta, provedena su detaljna terenska snimanja orijentacija i hrapavosti na dvije lokacije s reprezentativnim plohama diskontinuiteta u ležištu. Na lokaciji oznake PS-1/20 (slika 3-6) provedeno je snimanje na slojnoj plohi i prvom sustavu diskontinuiteta, dok se na lokaciji PS-2/20 (slika 3-7) snimalo na drugom sustavu diskontinuiteta. Lokacija PS-1/20 nalazi se na sjeverozapadnom, površinskom dijelu kamenoloma, a lokacija PS-2/20 na južnom, podzemnom dijelu kamenoloma.



**Slika 3-6.** Lokacija snimanja PS-1/20



**Slika 3-7.** Lokacija snimanja PS-2/20

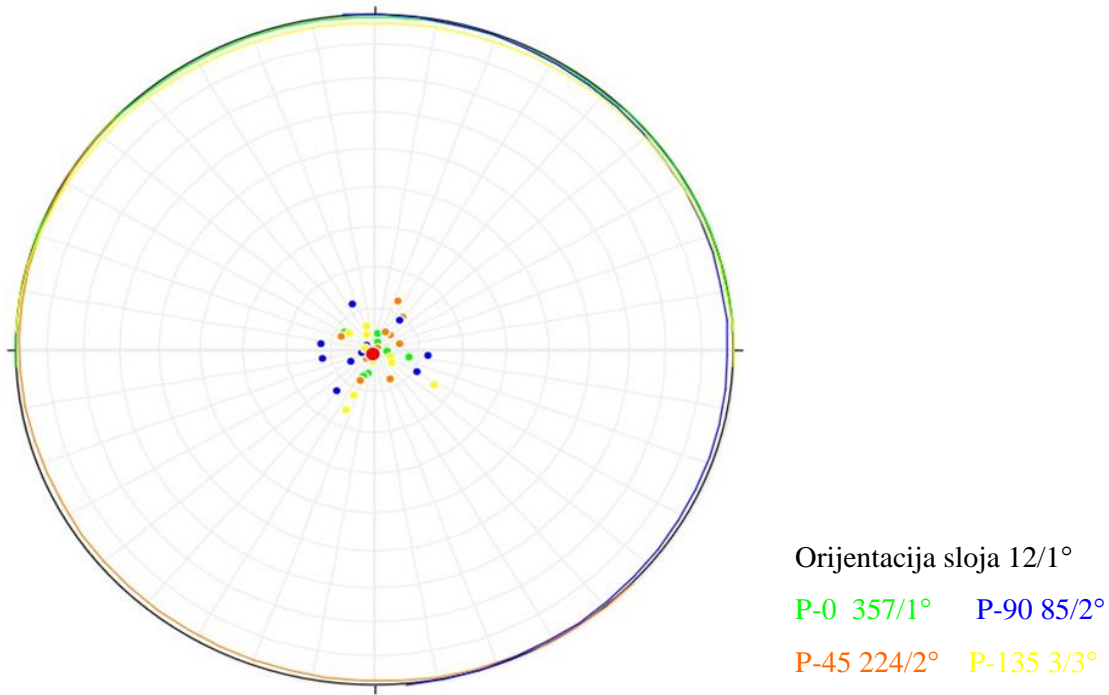
Snimanja su se sastojala od mjerenja orijentacija i uzimanja profila hrapavosti u četiri smjera, odnosno profila snimanja, koji su bili iscrtani na plohama diskontinuiteta. Profili snimanja bili su iscrtani u duljini od jednog metra pod kutom od  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  i  $135^\circ$ , mjereći od horizontalne linije, desno usmjerene, gledajući prema plohi diskontinuiteta. Mjerenje orijentacija kao i uzimanje profila provedeno je duž profilnih linija svakih 10 centimetara. Orijehtacija je mjerena standardnom metodom s pomoću geološkog kompasa i kružne ploče promjera 10 centimetara. Profili hrapavosti uzimani su s pomoću profilometra duljine 10 centimetara, kojim se profilna linija iscrtavanjem prenosila na milimetarski papir. Nakon toga su se iscrtani profili uspoređivali sa standardnim profilima hrapavosti s pomoću kojih su zapravo određivane vrijednosti koeficijenta hrapavosti  $JRC_{10}$ . Osnovni cilj takva sustavnog načina mjerenja orijentacija, kao i hrapavosti stijenci diskontinuiteta jest, osim utvrđivanja prosječnih vrijednosti, bio i utvrđivanje varijacije u mjerenim vrijednostima gledano u različitim smjerovima po plohama kako bi se dobile prostorne raspodjele mjerenih veličina. Određivanje spomenutih značajki provedeno je prema preporučenim metodama za kvantitativni opis

diskontinuiteta u stijenskim masama Međunarodnog društva za mehaniku stijena (Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, 1978).

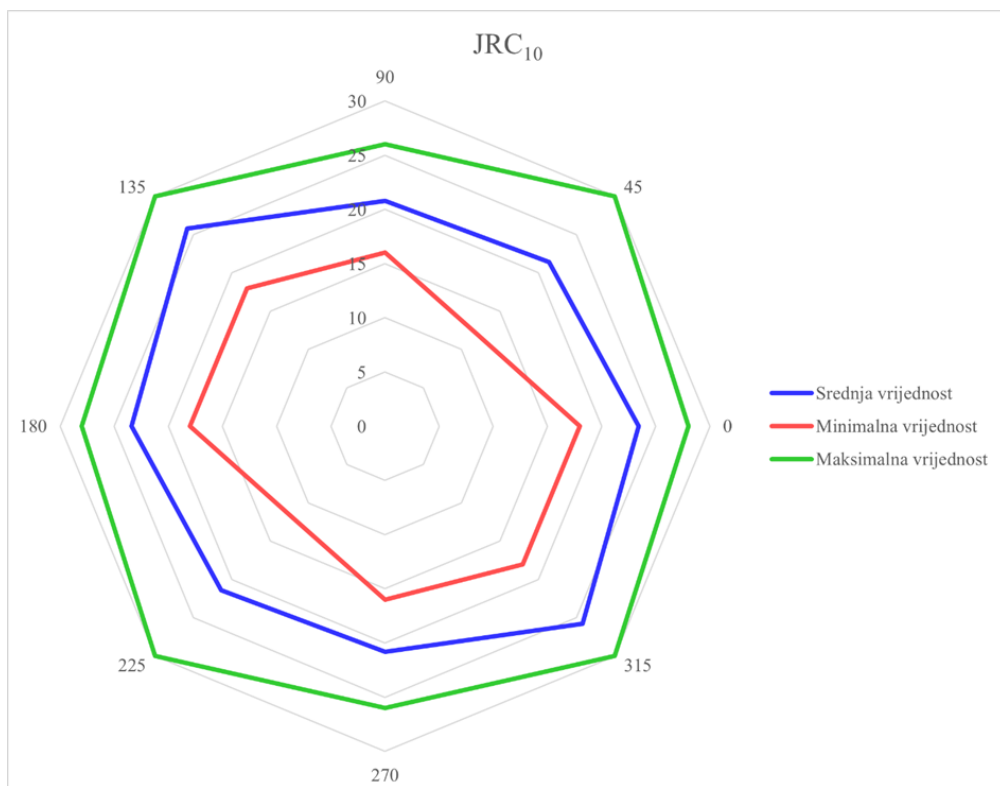
U tablici 3-1 prikazane su izmjerene vrijednosti orijentacije te vrijednosti koeficijenta hrapavosti na slojnoj plohi. Utvrđena je prosječna orijentacija slojne plohe  $12/1^\circ$ . Prilikom mjerenja hrapavosti stijenci diskontinuiteta primijenjen je prijedlog proširenja standardnih profila prikazanih na slici 4-9, dok se detaljna objašnjenja o proširenju standardnih profila hrapavosti nalaze u poglavlju 4. Na slici 3-8 prikazan je strukturni dijagram za slojnu plohu gdje su različitim bojama prikazane orijentacije koje pripadaju pojedinom profilu mjerenja. Na slici 3-9 prikazan je dijagram raspodjela srednjih, minimalnih i maksimalnih vrijednosti koeficijenta hrapavosti  $JRC_{10}$  u odnosu na mjerene profile za slojnu plohu.

**Tablica 3-1.** Izmjerene vrijednosti orijentacije i koeficijenta hrapavosti na slojnoj plohi

Relativni kut mjerenja	Orijentacija	Koeficijent hrapavosti	Relativni kut mjerenja	Orijentacija	Koeficijent hrapavosti
0°	290/4	22-24	90°	96/12	20-22
	122/8	22-24		155/12	18-20
	202/2	18-20		60/6	18-20
	282/8	26-28		40/13	16-18
	190/4	26-28		218/9	24-26
	103/2	18-20		80/12	24-26
	275/3	24-26		125/2	18-20
	20/8	24-26		75/3	18-20
	13/6	26-28		298/11	18-20
	21/7	18-20		276/12	24-26
45°	334/8	20-22	135°	302/16	24-26
	40/3	20-22		162/6	26-28
	24/8	18-20		22/12	28-30
	255/6	24-26		5/3	18-20
	204/13	18-20		102/2	24-26
	114/8	28-30		24/16	24-26
	223/5	24-26		298/4	24-26
	220/10	26-28		310/5	28-30
	210/5	12-14		125/7	26-28
	240/1	14-16		155/4	26-28



**Slika 3-8.** Strukturni dijagram prosječnih orijentacija po kutu mjerenja i pripadajućih polova za slojnu plovu

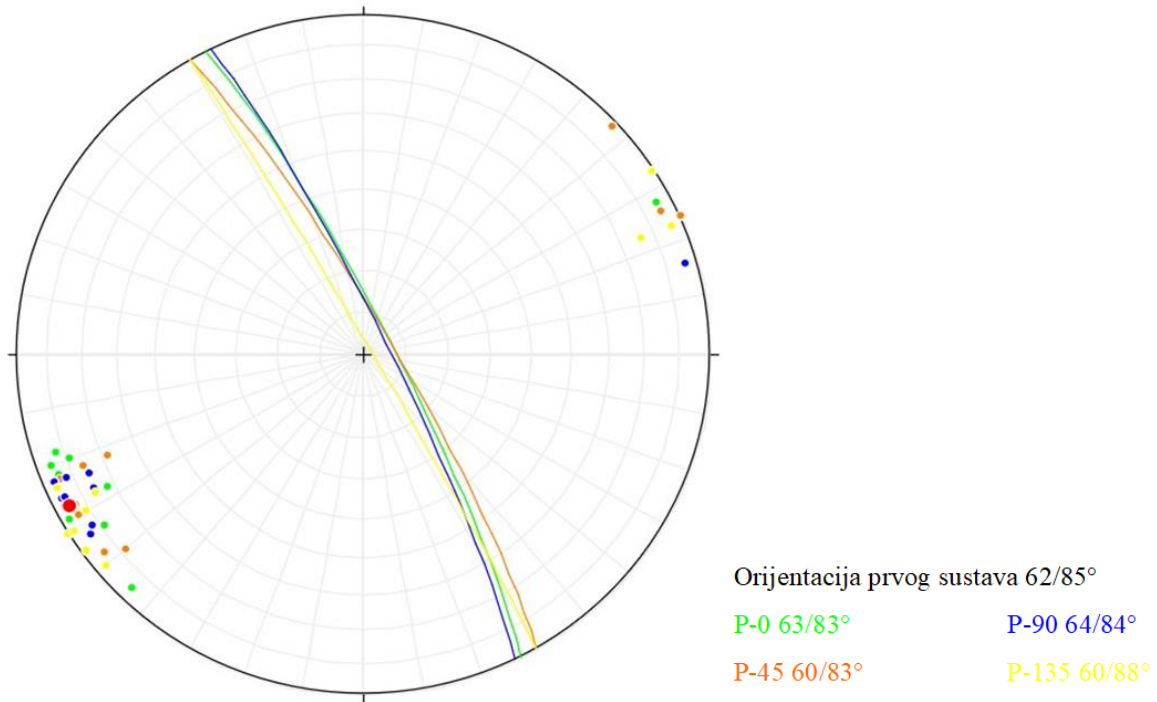


**Slika 3-9.** Dijagram raspodjela vrijednosti JRC<sub>10</sub> za slojnu plovu

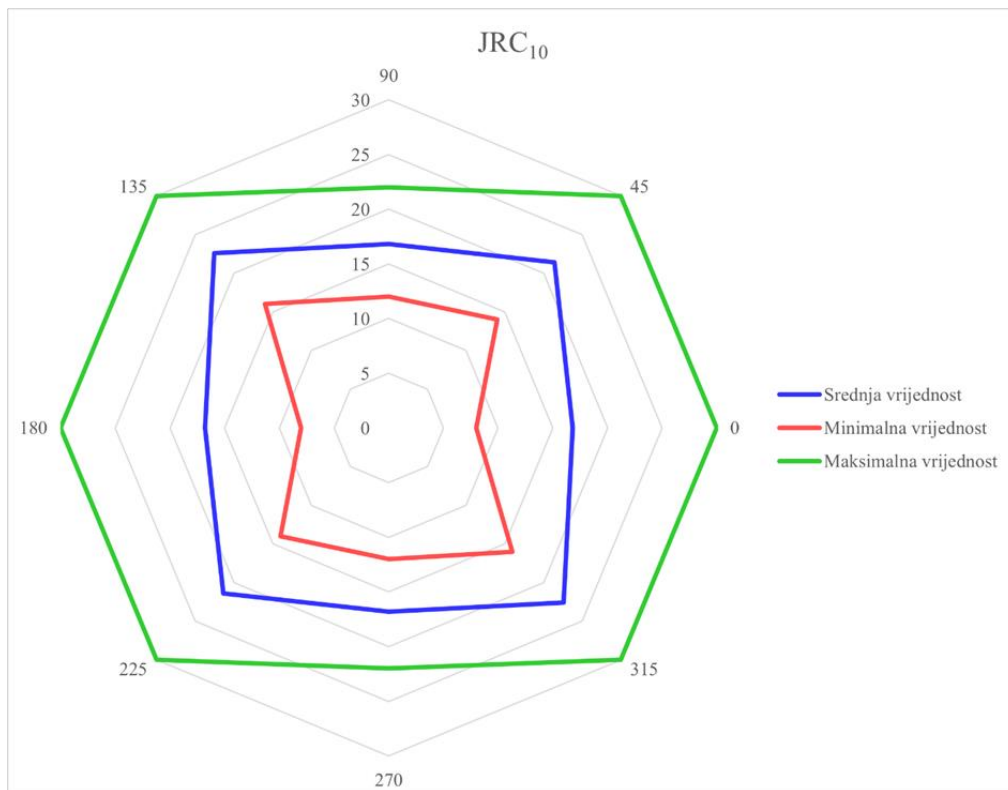
U tablici 3-2 prikazane su izmjerene vrijednosti orijentacije te vrijednosti koeficijenta hrapavosti na prvom sustavu diskontinuiteta za koji je utvrđena prosječna orijentacija od 62/85°. Na slici 3-10 prikazan je strukturni dijagram gdje su kao i za slojnu plohu različitim bojama istaknute orijentacije koje pripadaju pojedinom profilu mjerenja. Na slici 3-11 prikazan je dijagram raspodjela srednjih, minimalnih i maksimalnih vrijednosti koeficijenta hrapavosti  $JRC_{10}$  u odnosu na mjerene profile.

**Tablica 3-2.** *Izmjerene vrijednosti orijentacije i koeficijenta hrapavosti na prvom sustavu diskontinuiteta*

Relativni kut mjerenja	Orijentacija	Koeficijent hrapavosti	Relativni kut mjerenja	Orijentacija	Koeficijent hrapavosti
0°	242/85	10-12	90°	56/75	14-16
	60/87	8-10		67/82	20-22
	72/82	14-16		67/86	16-18
	70/85	28-30		58/88	16-18
	61/84	22-24		56/84	18-20
	44/85	14-16		64/86	12-14
	68/84	14-16		254/86	14-16
	56/79	14-16		64/85	18-20
	62/72	16-18		63/76	14-16
	70/79	18-20		57/82	16-18
45°	68/68	22-24	135°	58/90	28-30
	68/76	20-22		247/76	26-28
	67/84	16-18		66/86	16-18
	52/84	24-26		237/89	16-18
	62/83	24-26		50/86	18-20
	50/78	26-28		54/88	24-26
	60/84	14-16		247/86	16-18
	244/85	14-16		58/88	26-28
	246/90	16-18		60/81	18-20
	227/88	28-30		62/76	28-30



**Slika 3-10.** Strukturni dijagram prosječnih orijentacija po kutu mjerenja i pripadajućih polova za prvi sustav diskontinuiteta



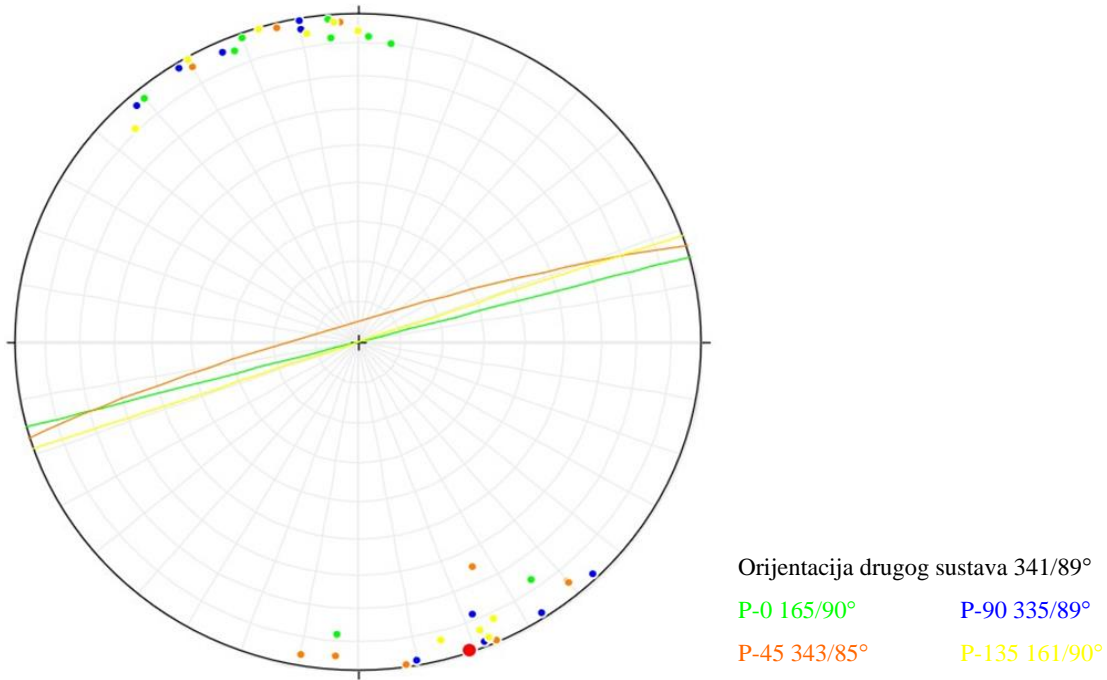
**Slika 3-11.** Dijagram raspodjela vrijednosti JRC<sub>10</sub> za prvi sustav diskontinuiteta



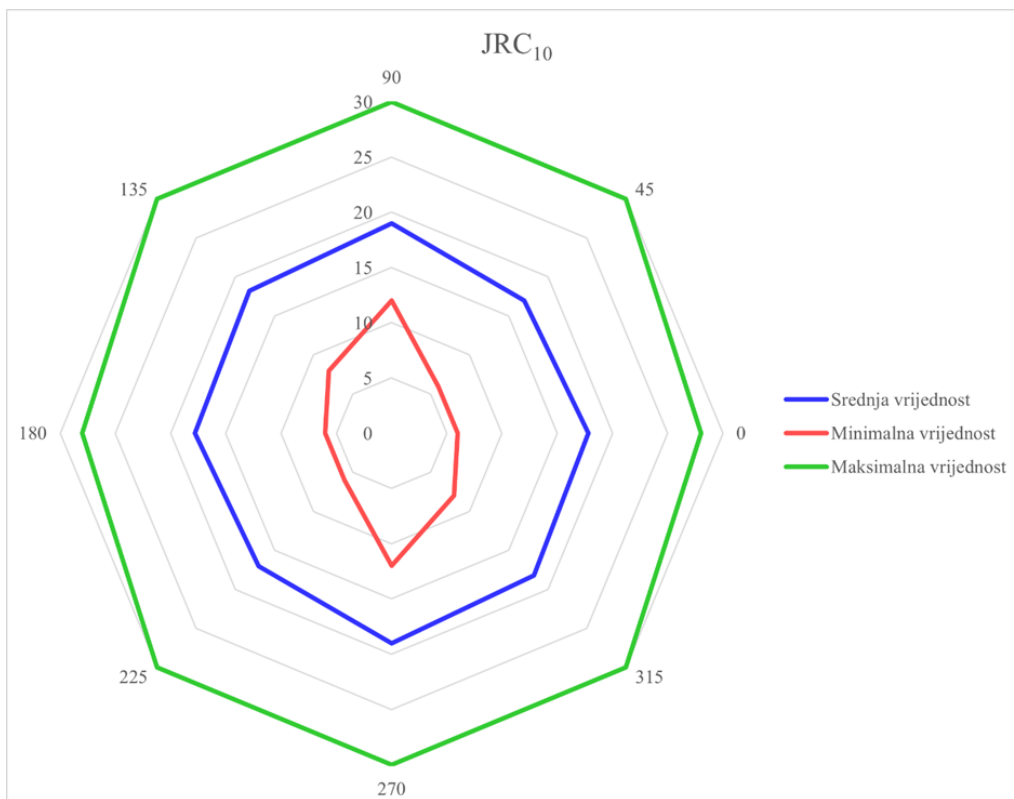
U tablici 3-3 prikazane su izmjerene vrijednosti orijentacije te vrijednosti koeficijenta hrapavosti na drugom sustavu diskontinuiteta za koji je utvrđena prosječna orijentacija od 341/89°. Na slici 3-12 prikazan je strukturni dijagram gdje su kao i prethodnim slučajevima različitim bojama istaknute orijentacije koje pripadaju pojedinom profilu mjerenja. Na slici 3-13 prikazan je dijagram raspodjela srednjih, minimalnih i maksimalnih vrijednosti koeficijenta hrapavosti  $JRC_{10}$  u odnosu na mjerene profile.

**Tablica 3-3.** *Izmjerene vrijednosti orijentacije i koeficijenta hrapavosti na drugom sustavu diskontinuiteta*

Relativni kut mjerenja	Orijentacija	Koeficijent hrapavosti	Relativni kut mjerenja	Orijentacija	Koeficijent hrapavosti
0°	175/88	26-28	90°	170/86	18-20
	4/78	12-14		170/89	16-18
	140/86	28-30		350/88	16-18
	325/77	18-20		148/88	16-18
	327/78	22-24		327/88	16-18
	175/82	22-24		156/86	18-20
	186/80	8-10		338/88	12-14
	182/82	6-8		338/78	28-30
	158/85	14-16		316/88	14-16
	160/88	12-14		138/86	26-28
45°	166/88	12-14	135°	163/89	10-12
	336/89	10-12		176/87	8-10
	150/86	20-22		171/84	18-20
	320/84	26-28		180/84	12-14
	320/85	28-30		345/83	14-16
	352/89	14-16		337/87	24-26
	4/85	12-14		335/82	26-28
	10/86	6-8		135/81	28-30
	177/87	8-10		150/89	16-18
	334/65	24-26		338/84	16-18



**Slika 3-12.** Strukturni dijagram prosječnih orijentacija po kutu mjerenja i pripadajućih polova za drugi sustav diskontinuiteta



**Slika 3-13.** Dijagram raspodjela vrijednosti JRC<sub>10</sub> za drugi sustav diskontinuiteta

Na temelju prikazanih rezultata mjerenja orijentacija može se zaključiti da su utvrđeni malo veći rasapi podataka po azimutu, nego po nagibu mjerenih ploha. Isto tako primjećuje se određena razlika u rasapu vrijednosti, ako se promatraju mjerenja orijentacija po profilima snimanja. Osim navedenog vidljiva je i određena anizotropija koeficijenta hrapavosti, odnosno utvrđene su različite minimalne i maksimalne, te srednje vrijednosti po profilima. Međutim, općenito gledano, navedene razlike ne mogu se pripisati određenoj sustavnosti u odnosu na, primjerice, pružanje ili pad diskontinuiteta.

Usporedbom s tipičnim profilima hrapavosti (slika 2-6) dobivene su vrijednosti koeficijenta hrapavosti u različitim rasponima. Zbog izrazitih neravnina velik broj profila hrapavosti u prvom se koraku nije mogao dodijeliti niti jednom rasponu vrijednosti koje su predložili Barton i Choubey (1977). Od 120 uzetih profila hrapavosti više od 50 profila karakterizirale su izrazito velike neravnine, odnosno neuobičajene vrijednosti u odnosu na one koje su opisane dosad objavljenim preporučenim metodama. Važno je napomenuti da su takve nepravilnosti, odnosno neravnine stijenci diskontinuiteta upravo posljedica procesa okršavanja. Naime, okršavanjem se otapaju stijenske pojedinih, odnosno karakterističnih diskontinuiteta, čime nastaju vrlo nepravilne i hrapave plohe s izraženim neravninama (Hrženjak i dr., 2019). Također, u mnogim objavljenim radovima u kojima se izlaže problematika određivanja hrapavosti nisu u dovoljnoj mjeri spominjane, odnosno rijetko su spominjane značajke takvih diskontinuiteta, a općenito manji broj istraživanja odnosio se na karbonatne, posebno okršene stijene. Iz navedenih razloga, a u svrhu potpunijeg određivanja  $JRC_{10}$  vrijednosti, predloženi su, odnosno dopunjeni su tipični profili hrapavosti u 10-centimetarskoj duljini, koji su detaljnije opisani u sljedećem poglavlju. Na temelju tih profila za veće hrapavosti od standardnih profila utvrđene su vrijednosti koje su prikazane u tablicama.

U skladu s takvim značajkama diskontinuiteta u stijenskoj masi ležišta nisu pronađeni realni uvjeti i mogućnosti za provedbu „in situ” ispitivanja, kojima bi se dobile relevantne vrijednosti parametara posmične čvrstoće za utvrđene sustave diskontinuiteta. Zato je provedeno uzorkovanje, te detaljna laboratorijska ispitivanja s ciljem utvrđivanja mogućeg modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim i okršenim vapnencima.

### **3.3. Uzorkovanje i priprema uzoraka za laboratorijska ispitivanja**

S obzirom na utvrđene velike nepravilnosti i hrapavosti stijenki diskontinuiteta ocijenjeno je da uzorci kamena s prirodnim plohama diskontinuiteta prije svega moraju biti znatno većih dimenzija, kako bi se laboratorijskim postupcima ispitivanja dobili reprezentativni rezultati posmične čvrstoće diskontinuiteta. Stoga je provedeno uzorkovanje tako da je najprije u ležištu izvađen blok kamena približnih dimenzija  $150 \times 130 \times 300$  centimetara, iz kojeg su pripremljeni uzorci odgovarajućih dimenzija za laboratorijska ispitivanja.

Blok kamena izvađen je iz prvog eksploatacijskog sloja koji je sadržavao plohu diskontinuiteta iz prvog pukotinskog sustava. Uzorci za laboratorijska ispitivanja pripremljeni su rezanjem bloka dijamantnim pilama tako da su dobiveni uzorci približnih dimenzija  $150 \times (200-400) \times 300$  milimetara s plohom diskontinuiteta u središnjem dijelu uzorka. Osim tih pripremljeni su i uzorci bez plohe diskontinuiteta, odnosno samo s ispiljenom plohom kroz intaktni materijal za određivanje baznog kuta trenja, približnih dimenzija  $150 \times 100 \times 300$  milimetara.

Materijal ispune iz diskontinuiteta uzorkovan je na nekoliko pozicija u eksploatacijskim slojevima kako bi se dobila potrebna količina, a da se pritom zadrži sastav reprezentativan za cijelo ležište. S obzirom na konfiguraciju terena i pojavnost pukotina nije postojala mogućnost uzorkovanja neporemećenih uzoraka ispune. Laboratorijska ispitivanja materijala ispune provedena su s ciljem utvrđivanja svojstava koja utječu na posmičnu čvrstoću ispunjenih diskontinuiteta.

## 4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

### 4.1. Uvodno o metodama ispitivanja

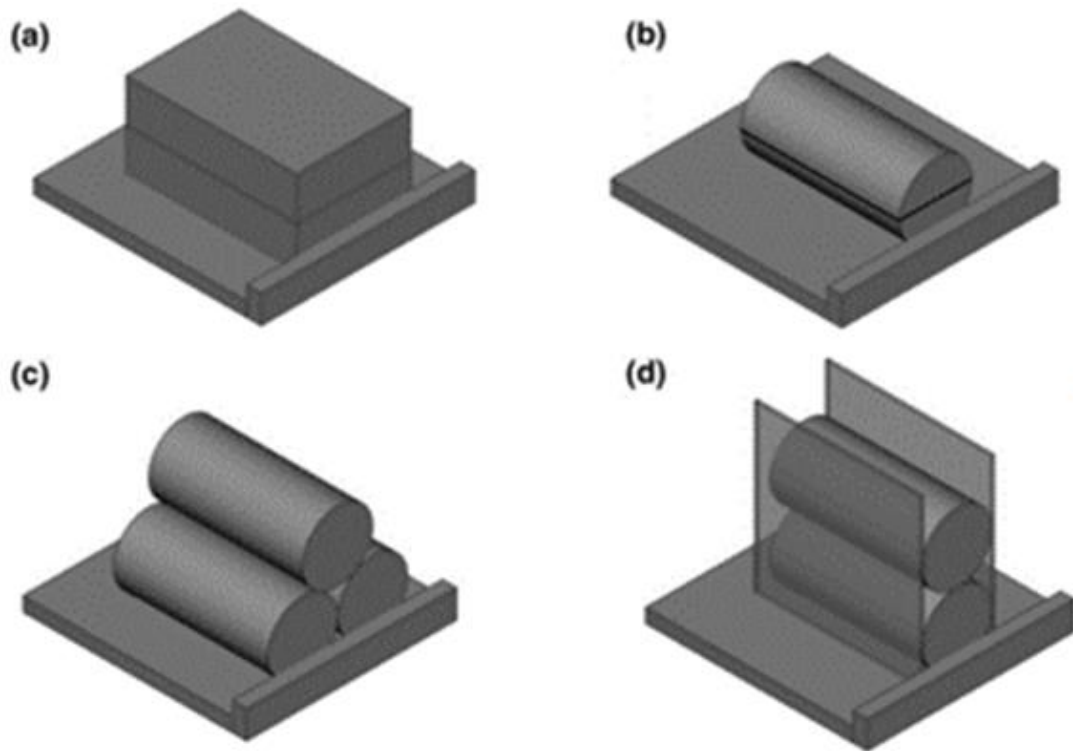
Određivanje značajki diskontinuiteta provedeno je prema preporučenim metodama (Suggested Methods, SM) Međunarodnog društva za mehaniku stijena (International Society for Rock Mechanics, ISRM) za kvantitativan opis diskontinuiteta u stijenskim masama (ISRM, 1978). Mjerene su značajke koje su važne za modele za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta: hrapavost stijenki (*JRC*), tlačna čvrstoća stijenki diskontinuiteta (*JCS*), bazni kut trenja i zijev diskontinuiteta. Bazni kut trenja određen je jednostavnim pokusom klizanja naginjanjem (engl. *tilt test*) prema preporučenoj metodi ISRM-a (Alejano i dr., 2018), te standardnim postupkom ispitivanja posmične čvrstoće izravnim posmikom u uvjetima konstantnog normalnog opterećenja (CNL), također prema preporučenoj metodi ISRM-a (Muralha i dr., 2014). Prema posljednjoj metodi provedena su još i ispitivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta sa ispunom i bez ispune. Osim navedenog, s obzirom na to da su hrapavosti stijenki diskontinuiteta bile znatno veće od onih koje su standardnim profilima hrapavosti predložili Barton i Choubey (Barton i Choubey, 1977), dodatno su predloženi profili hrapavosti u rasponu vrijednosti *JRC*<sub>10</sub> od 20 do 30. Određivanje značajki materijala ispune provedeno je prema normama iz razreda HRN EN ISO 17892, a određivanje parametara čvrstoće prema normi ASTM D 3080.

### 4.2. Određivanje baznog kuta trenja

Određivanje baznog kuta trenja (engl. *basic friction angle*) provedeno je, kako je već spomenuto, primjenom jednostavnog pokusa klizanja naginjanjem na uređaju za ispitivanje većih blokova prema preporučenoj metodi ISRM-a (Alejano i dr., 2018) i u uređaju za izravni posmik velikih uzoraka u CNL uvjetima, također prema preporučenoj metodi ISRM-a (Muralha i dr., 2014).

#### 4.2.1. Određivanje baznog kuta trenja pokusom klizanja naginjanjem

Određivanje baznog kuta trenja pokusom klizanja naginjanjem provedeno je na uređaju za ispitivanje većih blokova koji je, u skladu s preporukama ISRM-a, za tu svrhu razvijen u Geomehaničkom laboratoriju na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Općenito, ispitivanje baznog kuta trenja spomenutim pokusom u skladu s preporukama ISRM-a (Alejano i dr., 2018) može se provesti na valjkastim i blokovitim uzorcima, kako je prikazano na slici 4-1.



**Slika 4-1.** *Mogućnosti određivanja baznog kuta trenja pokusom klizanja nagnjanjem (Alejano i dr., 2018)*

Pritom se kut ispituje na ravno ispiljenim površinama, kao što prikazuju slučaj a) i slučaj b), ili na pravilno izbušena dva ili tri valjka, što je prikazano u slučajevima c) i d) na slici 4-1.

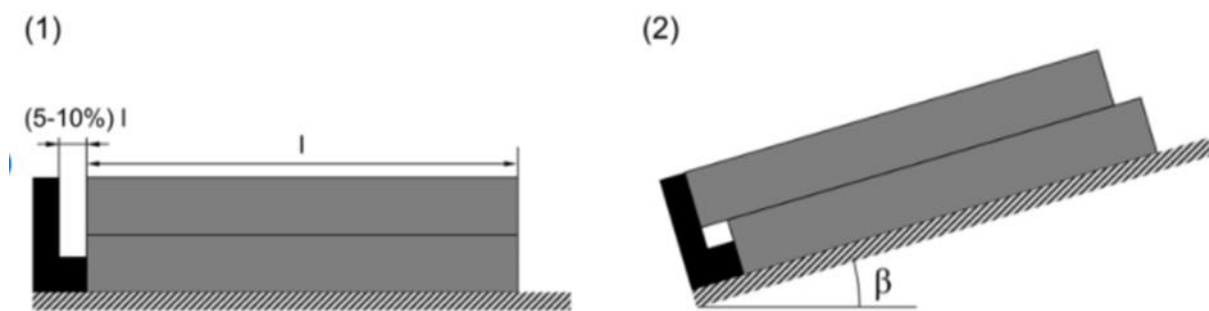
Dimenzije uzoraka koji se ispituju moraju za slučaj valjkastih uzoraka biti takve da omjer duljine i promjera uzorka bude najmanje 2 ili veći, pri čemu promjer mora biti minimalno 50 milimetara. Ako se ispitivanje provodi na valjkastim uzorcima, kako je prikazano u slučaju c) i d) na slici 4-1, onda mora biti zadovoljen uvjet da im omjer duljine i promjera uzorka bude najmanje 2,5 ili veći, a promjer uzorka barem 50 milimetara.

Za slučaj prikazan na slici 4-1 a kod ispitivanja blokovitih uzoraka, omjer duljine i visine gornjeg bloka treba biti najmanje 4 ili veći, a preporučuje se, ako je moguće, da taj omjer bude najmanje 6 ili veći. Također se preporučuje da omjer širine i visine gornjeg bloka bude najmanje 4 ili veći, pri čemu kontaktna površina mora iznositi barem 50 kvadratnih centimetara, širina uzorka treba biti 10 puta veća od veličine zrna u uzorku, a minimalno 50 milimetara. Površine uzoraka duž kojih se provodi ispitivanje trebaju imati ravnost unutar 0,3 milimetara duž cijele

površine, dok uzorci s izraženim nepravilnostima uočenim na površini trebaju biti izuzeti iz ispitivanja.

Oprema koja se upotrebljava za ovaj pokus može biti konstruirana na nekoliko načina, ali važno je da se sastoji od ravne ploče, koja se može rotirati oko jedne osi. Na početku ispitivanja ploča mora biti u horizontalnom položaju. Brzina rotacije oko osi ploče treba biti konstantna, a uređaj konstruiran tako da se vrtnja može zaustaviti u svakom trenutku. Preporučena je brzina rotacije (povećanja nagiba) u pokusu između  $10^\circ/\text{min}$  i  $20^\circ/\text{min}$  za uređaje gdje se očekuje akceleracija podizanja manja od  $0,01\text{ g}$ , dok za uređaje gdje se očekuje akceleracija podizanja veća od  $0,01\text{ g}$ , ta bi brzina trebala iznositi  $5^\circ/\text{min}$  do  $10^\circ/\text{min}$ . Važan je dio opreme uređaj kojim se može mjeriti kut s točnošću  $\pm 0,5^\circ$ , kako bi se mogao izmjeriti bazni kut trenja. Preporučuje se i upotreba uređaja, koji bi mjerio horizontalnu i vertikalnu akceleraciju, pri čemu je dopuštena upotreba aplikacija na pametnim telefonima.

Prije postupka ispitivanja, površine uzorka treba očistiti od kamene prašine. Polovine uzorka treba spojiti na način da se poklapaju, a klizanje bi trebalo biti po onoj dimenziji koja je dulja. Mjerenje kuta klizanja,  $\beta$ , treba započeti odmah nakon pokretanja pokusa. Za svaki uzorak treba napraviti barem pet ponavljanja, pri čemu treba bilježiti još i relativnu vlažnost i temperaturu tijekom ispitivanja. Tijekom izvedbe pokusa važno je brzinu rotiranja održavati konstantnom, a ispitivanje se zaustavlja kad započne klizanje gornje polovine uzorka po donjoj. Maksimalni pomak klizanja ne smije prijeći  $10\%$  početne duljine uzorka, kao što je prikazano na slici 4-2.



**Slika 4-2.** Shema uvjeta maksimalnog pomaka i kuta klizanja (Alejano i dr., 2018)

Kut se bilježi na početku i na kraju ispitivanja, a razlika tih kutova jest kut pri kojem je nastupilo klizanje,  $\beta$ .

Kao što je navedeno, priručni uređaj za potrebe ispitivanja većih blokova pokusom klizanja naginjanjem razvijen je u skladu s preporukama ISRM-a u Geomehničkom laboratoriju na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Uređaj s ugrađenim uzorkom prikazan je na slici 4-3.



**Slika 4-3.** Priručni uređaj za pokus klizanja naginjanjem u Geomehničkom laboratoriju na RGNF-u

Ispitivanja baznog kuta trenja za potrebe ovog istraživanja provedena su na blokovitim uzorcima čije su dimenzije približno iznosile: širina 150 milimetara, duljina 300 milimetara, te visina 196 milimetara. S obzirom na to da je u preliminarnim istraživanjima utvrđeno da vrijednosti baznog kuta trenja koje su mjerene pokusom klizanja naginjanjem mogu varirati, kako bi vrijednosti bile usporedive s vrijednostima dobivenim u uređaju za izravni pokus, dimenzije blokovitih uzoraka određeno odstupaju od dimenzija preporučenih od strane ISRM-a.



Uređaj se upravlja manualno, pa je pokus zaustavljan u trenutku kada je klizanje započelo. Brzina rotacije u pokusu iznosila je u prosjeku 7°/min.

Ispitane su tri serije uzoraka, svaka po pet ispitivanja, a rezultati provedenih ispitivanja prikazani su u tablici 4-1.

**Tablica 4-1. Rezultati izmjerenog baznog kuta trenja**

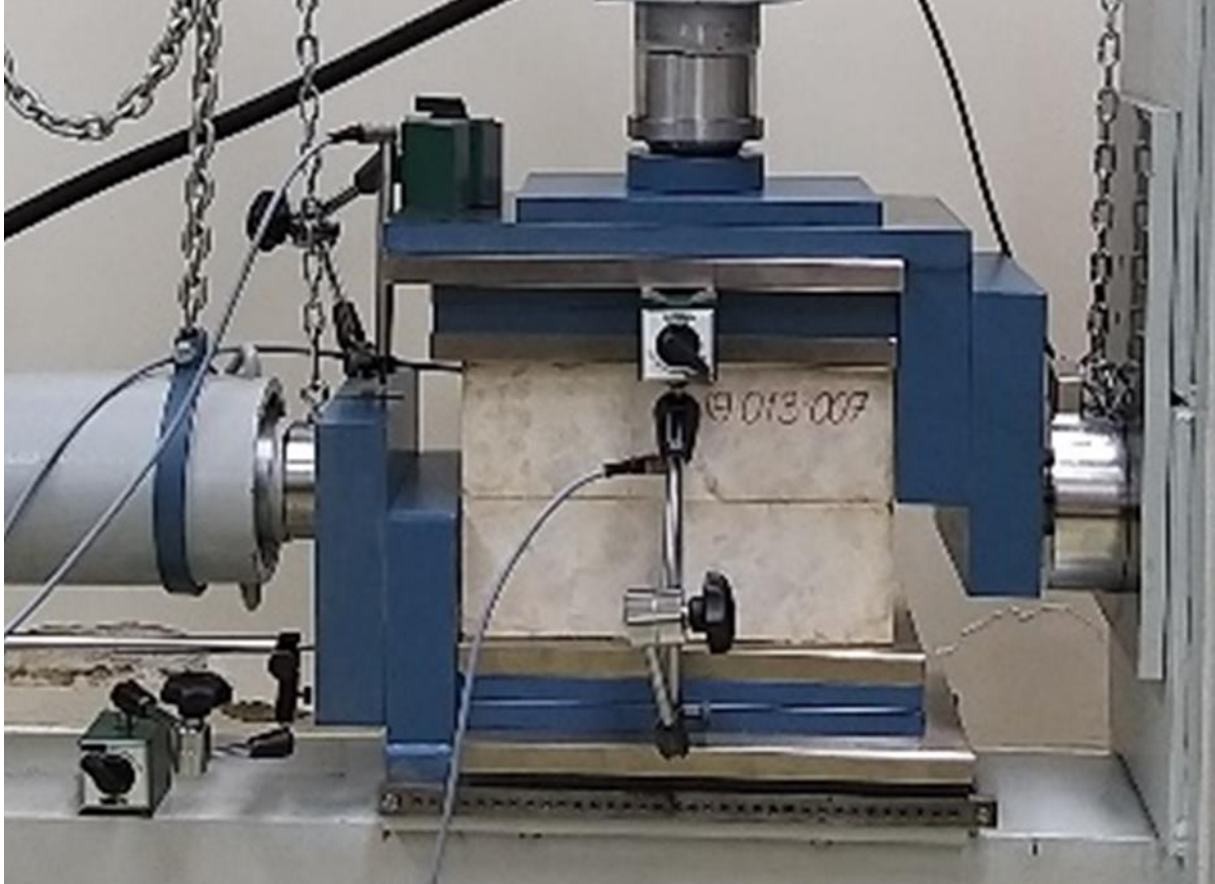
Oznaka uzorka	$\phi_b$ (°)	Oznaka uzorka	$\phi_b$ (°)	Oznaka uzorka	$\phi_b$ (°)
19-013-007	32,0	19-013-008	34,8	19-013-009	39,6
	37,4		33,7		34,3
	38,3		32,8		32,1
	38,6		39,6		38,8
	35,7		34,8		37,9
Srednja vrijednost mjerenja	36,4	Srednja vrijednost mjerenja	35,1	Srednja vrijednost mjerenja	36,5
Standardna devijacija	2,71	Standardna devijacija	2,73	Standardna devijacija	3,20
Srednja vrijednost svih mjerenja	36,0				
Standardna devijacija svih mjerenja	2,73				

Statističkom obradom rezultata ispitivanja uočeno je da nema znatnih odstupanja u rezultatu baznog kuta trenja mjerenog na različitim uzorcima, te su rezultati uprosječeni pri čemu je dobivena prosječna vrijednost baznog kuta trenja od 36,0° uz vrijednost standardne devijacije od 2,73.

#### 4.2.2. Određivanje baznog kuta trenja u uređaju za izravni posmik

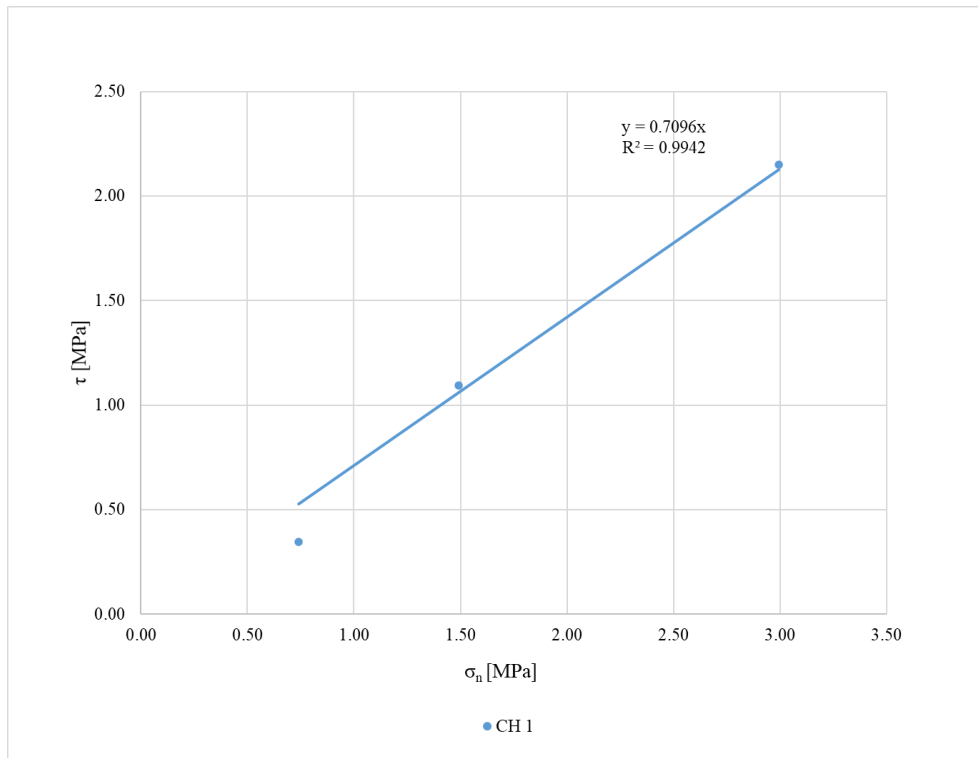
Zbog mogućeg utjecaja više čimbenika na dobivene rezultate pokusa klizanja naginjanjem kao što su: poliranje površine po kojoj se odvija pokus, brzine rotacije, vibracije uređaja, te relativne vlažnosti i adhezije (Alejano i dr., 2018), provedeno je i određivanje baznog kuta trenja standardnim postupkom ispitivanja posmične čvrstoće u CNL uvjetima u uređaju za izravni posmik. Više o ispitivanju posmične čvrstoće u CNL uvjetima, kao i o uređaju za izravni posmik velikih uzoraka koji je razvijen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu (slika 4-4) bit će opisano u poglavlju 4.9.

Ispitivanje je provedeno na jednom nizu uzoraka uz vrijednosti normalnih napreznja od 0,75 MPa, 1,5 MPa i 3 MPa, te uz brzinu smicanja od 0,5 mm/min.



**Slika 4-4.** Ispitivanje baznog kuta trenja u uređaju za izravni posmik velikih uzoraka

Obradom rezultata ispitivanja za dobivene vršne vrijednosti posmičnih čvrstoća u odnosu na vrijednosti normalnih napreznja regresijskom je analizom dobiven Coulombov pravac čvrstoće, na temelju kojeg je dobivena vrijednost baznog kuta trenja od  $35,4^\circ$  uz koeficijent determinacije  $R^2$  od 0,9942. Pravac čvrstoće prikazan je na slici 4-5. Ovdje se uvodi oznaka CH1 koja se odnosi na čiste stijenke bez ispune, a više o stanjima i pripadajućim oznakama opisano je u poglavlju 4.7.



**Slika 4-5.** Pravac čvrstoće za stanje CH1

Usporedbom izmjerenih vrijednosti baznog kuta trenja dobivenih pokusom klizanja naginjanjem koji je iznosio  $36,0^\circ$  i vrijednosti dobivenih pokusom u uređaju za izravni posmik koja je iznosila  $35,4^\circ$ , može se zaključiti da nije bilo većih odstupanja. Ipak, kao mjerodavna vrijednost uzeta je vrijednost baznog kuta trenja dobivena mjerenjima u uređaju za izravni posmik s obzirom na to da ispitivanje bolje simulira stvarne uvjete u ležištu.

### 4.3. Određivanje tlačne čvrstoće stijenki diskontinuiteta

Čvrstoća stijenki diskontinuiteta *JCS* (engl. *joint compressive strenght*) važan je parametar za procjenu posmične čvrstoće. Na terenu se može približno odrediti priručnim sredstvima, odnosno geološkim čekićem, nožićem ili noktom za mekše stijene (ISRM, 1978), dok se u čvršćim stijenama upotrebljava Schmidov čekić.



**Slika 4-6.** Schmidtov čekić (lijevi dio slike preuzet sa stranice <https://www.controls-group.com>)

Schmidtov čekić (slika 4-6) jednostavan je ispitni uređaj za određivanje dinamičke tvrdoće, koji radi na načelu mjerenja odskoka udarnog elementa. Visina odskoka očitava se na skali uređaja, a ovisi o kutu pri kojem se mjeri odskok. U skladu s preporukama ISRM-a može se upotrijebiti L-tip i N-tip čekića. L-tip čekića proizvodi energiju udara 0,735 Nm, a N-tip čekića 2,202 Nm. Normalizacija vrijednosti odskoka upotrebljava se kada orijentacija čekića nije horizontalna, nego je vertikalna prema gore, vertikalna prema dolje ili je pod nekim kutom (Aydin, 2009). Također, u skladu s preporukama ISRM-a ispitivanja se mogu provesti na valjkastim i blokovitim uzorcima. Ako se upotrebljava L-tip čekića, valjkasti uzorci trebali bi imati promjer veći od 54,7 milimetara, dok u slučaju N-tipa čekića taj promjer treba iznositi barem 84 milimetara. Kada se ispitivanja provode na blokovitim uzorcima, visina uzorka treba iznositi barem 100 milimetara. Pri ispitivanju treba provesti barem 20 mjerenja odskoka, iako pokus može biti zaustavljen ako se rezultati 10 uzastopnih mjerenja odskoka ne razlikuju za više od 4 odnosno  $\pm 2$ . Pokus je načelno nedestruktivan, međutim to vrijedi samo za stijene koje imaju čvrstoću veću od 80 MPa.

Jednoosna tlačna čvrstoća stijenki diskontinuiteta (*JCS*) određena je primjenom Schmidtova čekića u skladu s preporukama ISRM-a s pomoću kojeg su dobivene vrijednosti tvrdoće na stijenama, te nerastrošenom intaktnom materijalu. Vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće stijenki diskontinuiteta računata su na temelju jednoosne tlačne čvrstoće intaktnog stijenskog

materijala koji iznosi 115 MPa i stupnja trošnosti stijenki, koji je određen iz omjera Schmidtove tvrdoće na rastrošenoj stijenki ( $r$ ) i tvrdoće na nerastrošenoj plohi intaktnog materijala ( $R$ ). Pri ispitivanju je upotrijebljen L-tip Schmidtova čekića, a rezultati određivanja  $JCS$ -a prikazani su u tablici 4-2.

**Tablica 4-2. Rezultati jednoosne  $JCS$ -a**

Oznaka uzorka	001DSR	002DSR	003DSR	004DSR	005DSR	006DSR
$r$ (-)	46	51	51	44	48	48
$R$ (-)	59	60	62	57	60	61
Stupanj trošnosti	0,78	0,85	0,82	0,77	0,80	0,79
$JCS$ (MPa)	89,7	97,8	94,6	88,8	92,0	90,5

Prema određenom stupnju trošnosti možemo zaključiti da se radi o malo trošnim stijenkama diskontinuiteta.

#### 4.4. Određivanje hrapavosti stijenki diskontinuiteta

Koeficijent hrapavosti  $JRC$  (engl. *joint roughness coefficient*) veličina je kojom se opisuju neravnine na površini stijenki diskontinuiteta. To je važan parametar pri određivanju posmične čvrstoće diskontinuiteta koji ovisi o mjerilu promatranja. Upravo zbog mjerila promatranja, postoje slučajevi kada je za mjerenja potrebno provesti korekcije.

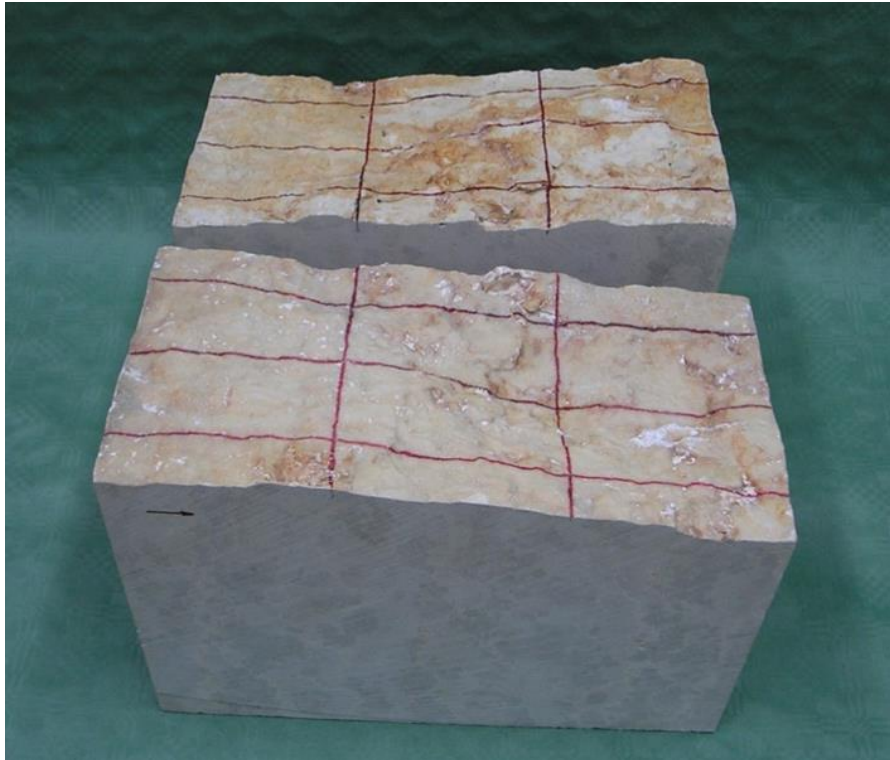
Koeficijent hrapavosti na laboratorijskim uzorcima određen je:

- pomoću ručnog profilometra, kako su predložili autori Barton i Choubey (1977)
- beskontaktnom metodom (digitalna fotogrametrija)
- preko amplitude, odnosno maksimalne neravnine na plohama diskontinuiteta, te
- povratnom analizom kako su predložili autori Barton i Bandis (1982).

##### 4.4.1. Određivanje hrapavosti ručnim profilometrom

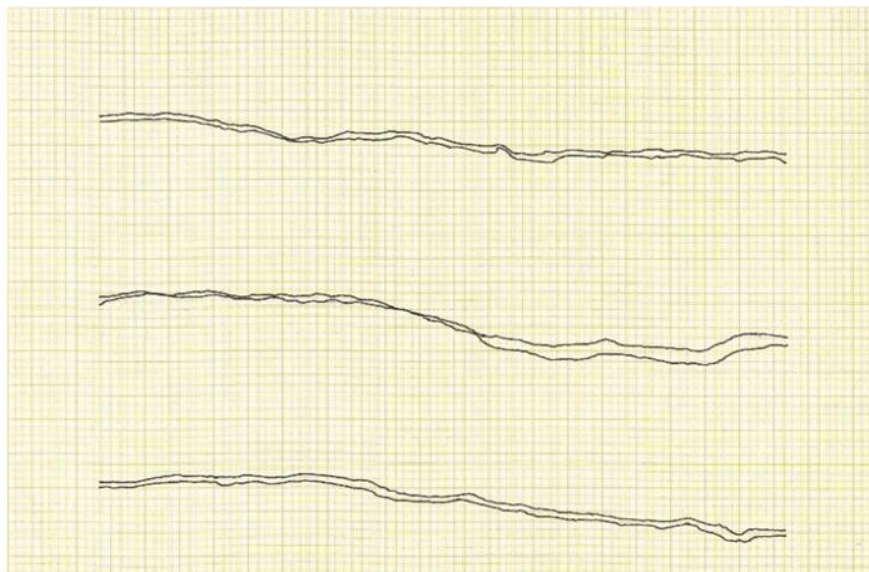
Mjerenja ručnim profilometrom odabrana su, jer je njihova primjena i danas najraširenija u inženjerskoj praksi. To mjerenje provodi se tako da se profilometar prisloni na iscrtani profil na uzorku kako bi iglice profilometra poprimile oblik profila. Preuzeti oblik na profilometru usporedi se sa standardnim profilima te na taj način odredi  $JRC$ .

U ovom istraživanju *JRC* je primjenom profilometra određen tako da su na gornjoj i donjoj polovici uzorka iscrtani profili, kao što je prikazano na slici 4-7.



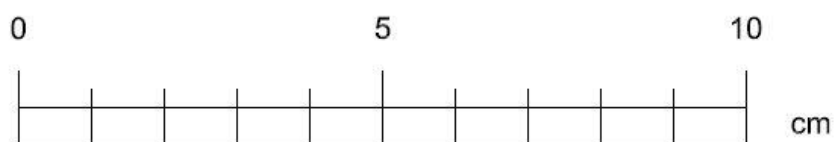
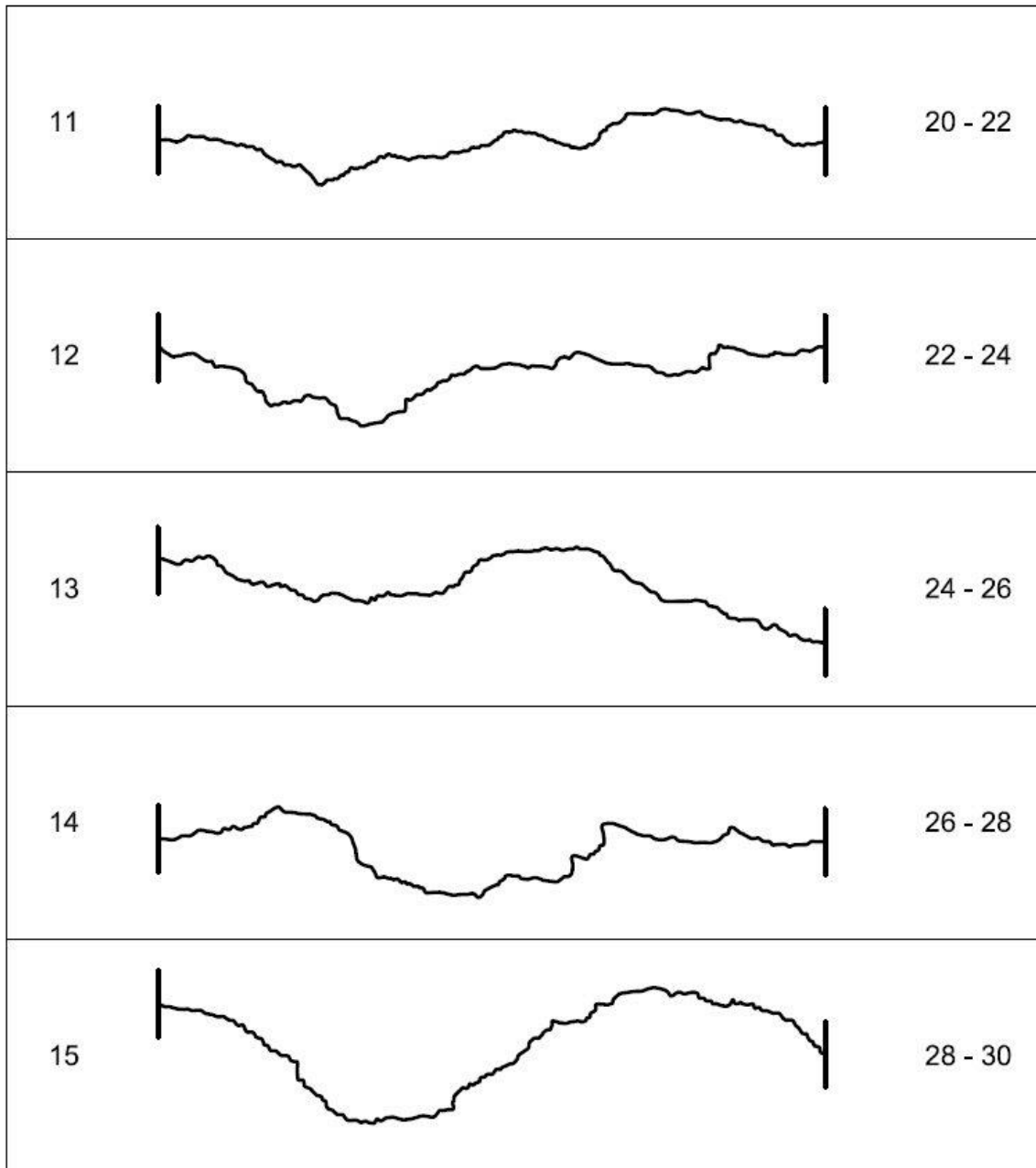
**Slika 4-7.** *Uzorak s iscrtanim profilima za određivanje hrapavosti diskontinuiteta*

Kada su iglice profilometra preuzele oblik hrapavosti promatranog profila, linije su iscrtane na milimetarski papir, kao što je prikazano na slici 4-8.



**Slika 4-8.** *Iscrtani profili hrapavosti diskontinuiteta*

Na pojedinim uzorcima, s obzirom na velike hrapavosti, nije bilo moguće usporedbom sa standardnim profilima odrediti *JRC*. Kako bi se to moglo, postojala je potreba da se proširi prijedlog postojećih standardnih profila profilima koji su uočeni na takvim tipovima diskontinuiteta. Za to proširenje upotrijebljeni su svi uzeti profili i kod terenskog i kod laboratorijskog snimanja iz kojih su odabrani karakteristični s obzirom na prisutne neravnine. Prijedlog novih vrijednosti  $JRC_{10}$  prikazan je na slici 4-9.



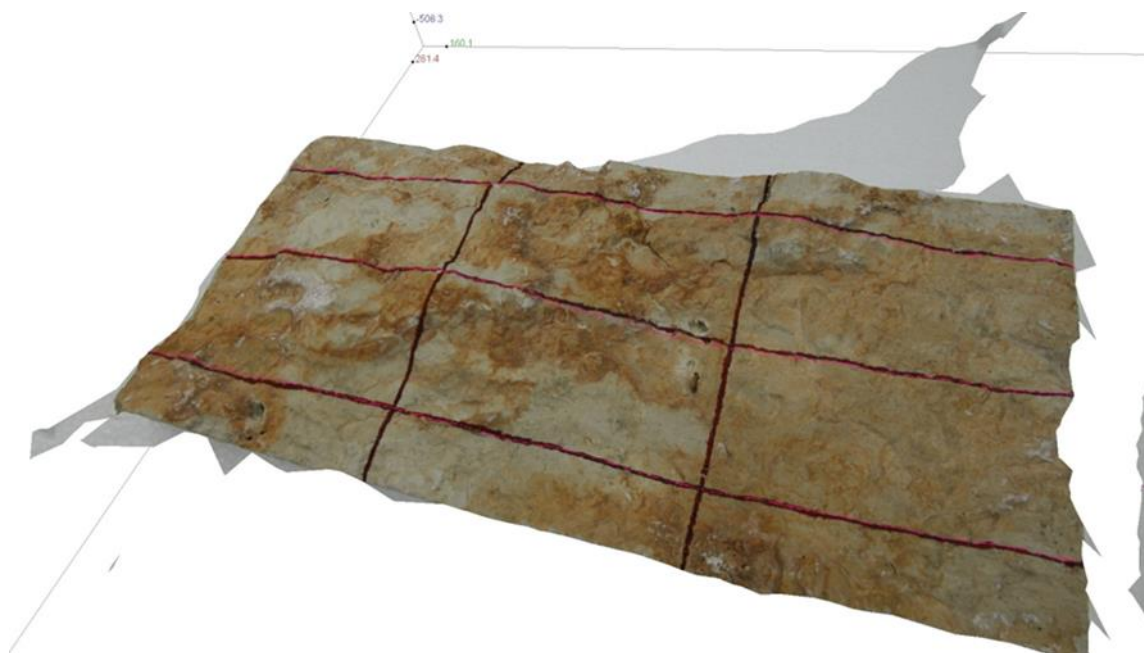
**Slika 4-9.** Prijedlog proširenja standardnih profila hrapavosti diskontinuiteta



*JRC* je izračunat za profile na gornjoj, i za njihove parove na donjoj polovici uzorka, te su vrijednosti *JRC*-a za gornji i donji profil korigirane obzirom na stvarnu mjerenu duljinu uzorka uzduž profila. Kao reprezentativna vrijednost *JRC*-a profila odabrana je manja vrijednost od vrijednosti gornjeg i donjeg profila obzirom da se smicanje odvija po manjoj hrapavosti dok po većim hrapavostima dolazi do loma. Kao vrijednost *JRC*-a za pojedini uzorak odabrana je srednja vrijednost *JRC*-a od izmjerenih minimalnih vrijednosti po profilima. Ta vrijednost predstavlja jedinstven *JRC* za mjereni diskontinuitet. Sve izmjerene vrijednosti prikazane su u prilogu 2.

#### 4.4.2. Određivanje hrapavosti bezkontaktnom metodom

Pri mjerenju hrapavosti primijenjena je i bezkontaktna metoda mjerenja, prikazana na slici 4-10, provedena s pomoću sustava ShapeMetriX3D (Navratil, 2011).



**Slika 4-10.** Digitalna fotogrametrija

Tom se metodom plohe diskontinuiteta snimaju stereoparovima digitalnih fotografija na temelju kojih se pomoću programskog sustava ShapeMetriX3D kreiraju digitalne plohe te izrađuju profili stijenci diskontinuiteta. Na temelju digitalnih profila prvo su računane vrijednosti statističkog parametra  $Z_2$  prema izrazu (2-19), nakon čega su vrijednosti koeficijenta hrapavosti *JRC* određene kao srednja vrijednost *JRC*-a dobivenog prema autorima Tse i Cruden

(1979), Yang (2001), Tatone i Grasselli (2010) te Jang (2014). Taj način je odabran obzirom da su autori korelacije između  $Z_2$  i  $JRC$  postavili na način da su proveli mjerenja za pojedine vrste uzoraka koje su pri tome bile i umjetno proizvedene. Važno je napomenuti da razlike između vrijednosti  $JRC$ -a, a ovisno o tome koji autor ih je predložio, nisu bile značajnije.

Primjerice, nekorrigirana vrijednost parametra  $JRC$  za uzorak oznake 19-013-005, za gornji profil broj 1, prema Tsu i Crudenu iznosila je 18,6, prema Yangu je iznosila 18,9, prema Tatone i Grasselli iznosila je 18,7 dok je prema Jangu iznosila 19,2.

Daljnji postupak određivanja  $JRC$ -a je proveden na isti način kao što je opisano u poglavlju 4.4.1., a primjer izračuna za jedan uzorak prikazan je u tablici 4-3.

**Tablica 4-3.** *Primjer određivanja  $JRC$ -a pomoću statističkog parametra  $Z_2$*

Oznaka profila		$Z_2$	$JRC_{10}(Z_2)$	$JRC_{nZ_2}$	min $JRC_{nZ_2}$	$\overline{\min JRC_{nZ_2}}$
1	g	0,3816823	18,9	12,5	12,5	12,7
	d	0,5839875	26,0	14,7		
2	g	0,4882509	22,9	13,8	13,8	
	d	0,6633505	28,3	15,2		
3	g	0,3482212	17,5	11,9	11,9	
	d	0,5278474	24,2	14,2		

Oznake: g – gornji profil, d – donji profil

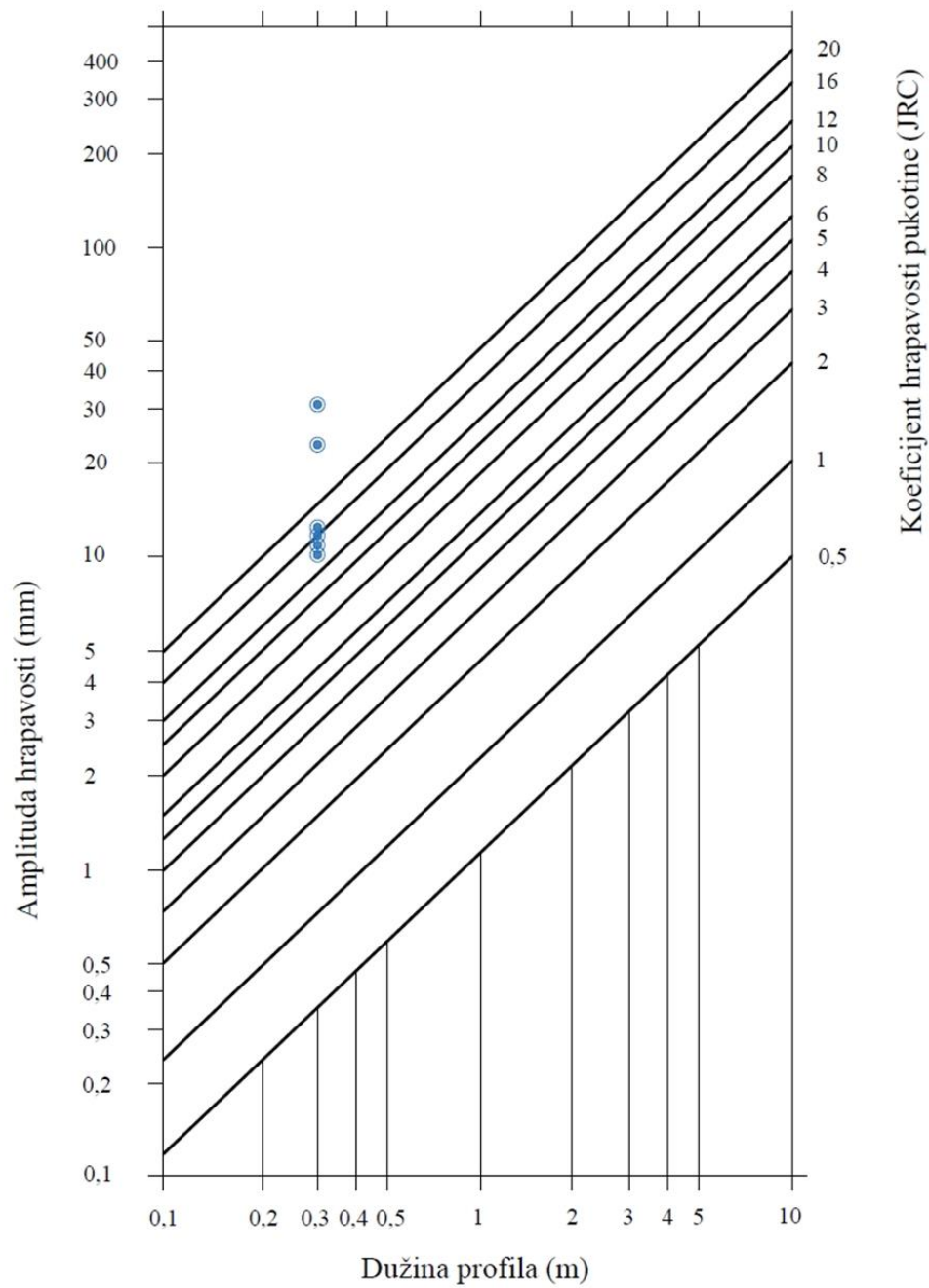
Pripadajuće izmjerene vrijednosti za sve uzorke prikazane su u prilogu 2.

#### 4.4.3. Određivanje hrapavosti preko amplitude

Određivanje  $JRC$ -a iz vrijednosti amplitude predložili su Barton i Bandis. S obzirom na to da su uočili velik utjecaj duljine diskontinuiteta na posmičnu čvrstoću, što je i opisano u poglavlju 2, autori su dali dijagram, koji je prikazan na slici 2-5, s pomoću kojeg se može na osnovi izmjerene maksimalne vrijednosti amplitude i duljine mjerenog diskontinuiteta odrediti  $JRC$  (Barton i Bandis, 1982).

U ovom istraživanju mjerenje maksimalne amplitude provedeno je na tri gornja i tri donja uzdužna profila iscrtana na uzorcima, kao što je prikazano na slici 4-7. S obzirom na to da je duljina uzorka iznosila 300 milimetara, primjenom dijagrama koji su predložili Barton i Bandis određen je  $JRC$ . Za neke uzorke uočene su velike hrapavosti koje su ujedno prisutne u ležištu.

Na slici 4-11 prikazano je područje izmjerenih srednjih vrijednosti, dok su sve izmjerene vrijednosti prikazane u prilogu 2.



**Slika 4-11.** Prikaz vrijednosti JRC-a izmjerenih na uzorcima u laboratoriju

#### 4.4.4. Određivanje hrapavosti povratnom analizom

Koeficijent hrapavosti  $JRC$  određen je i povratnom analizom na temelju rezultata vršnih vrijednosti posmične čvrstoće pri minimalnom normalnom naprezanju prema izrazu (2-11) (uz zamjenu  $\sigma_c$  s  $JCS$ ), kako su predložili autori Barton i Choubey 1977.

S ciljem određivanja vršnih vrijednosti kuta trenja u prvom su koraku provedena ispitivanja na plohama diskontinuiteta pri najmanjim mogućim vrijednostima normalnih naprezanja ostvarenih samo uslijed vlastite težine gornjeg dijela uzoraka, čeličnih podložnih ploča te čelične čeljusti, koje su bile potrebne za prijenos posmičnih naprezanja. Ispitivanja su provedena u uvjetima konstantnog normalnog opterećenja CNL, koji su detaljno opisani u poglavlju 4.9. Rezultati svih provedenih ispitivanja potrebnih za određivanje  $JRC$ -a povratnom analizom prikazani su u tablici 4-4.

**Tablica 4-4.** Rezultati ispitivanja upotrijebljeni za povratnu analizu određivanja  $JRC$ -a

Oznaka uzorka	JCS (MPa)	$\varphi_r$ (°)	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$JRC_{BC}$
001DSR-CNL-CH1	89,7	33,8	0,017	0,026	6,0
002DSR-CNL-CH1	97,6	35,2	0,019	0,065	10,3
003DSR-CNL-CH1	94,6	34,7	0,021	0,155	13,1
004DSR-CNL-CH1	88,8	33,6	0,021	0,039	7,9
005DSR-CNL-CH1	92,0	34,2	0,019	0,081	11,5
006DSR-CNL-CH1	90,5	33,9	0,038	0,213	13,7

Veličina  $JCS$  (MPa) odnosi se na vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće stijenci diskontinuiteta koje su izračunate na temelju jednoosne tlačne čvrstoće intaktnog stijenskog materijala i stupnja trošnosti stijenci, koji je određen iz omjera Schmidtove tvrdoće na rastrošenoj stijenci ( $r$ ) i tvrdoće na nerastrošenoj plohi intaktnog materijala ( $R$ ). Veličina  $\varphi_r$  (°) odnosi se na rezidualni kut trenja na trošnim stijenkama dobiven iz izraza (2-13).

S obzirom na to da su ta ispitivanja hrapavosti diskontinuiteta provedena na uzorcima s duljinom ploha diskontinuiteta od 30 centimetara, za usporedbu s prethodno procijenjenim vrijednostima koeficijenata hrapavosti u mjerilu promatranja od 10 centimetara, provedene su

potrebne korekcije primjenom izraza (2-14). Korigirane vrijednosti koeficijenta hrapavosti s rezultatima dobivenim povratnom analizom usporedno su prikazane u tablici 4-5.

**Tablica 4-5.** Rezultati provedenih korekcija i povratnih analiza za vrijednosti koeficijenta hrapavosti

Oznaka uzorka	JRC <sub>n10</sub>	JRC <sub>nZ2</sub>	JRC <sub>n</sub>	JRC <sub>nBC</sub>
001DSR	11,7	11,0	15,7	6,9
002DSR	10,6	11,8	14,0	11,1
003DSR	15,0	13,8	29,0	13,9
004DSR	11,5	12,4	15,3	8,5
005DSR	12,9	12,7	16,7	12,3
006DSR	13,5	12,7	23,7	14,4

Analizom rezultata za hrapavosti stijenki diskontinuiteta u slučaju dva uzorka uočene su znatno manje vrijednosti *JRC*-a dobivenih povratnom analizom, te znatno veće vrijednosti dobivenih mjerenjima iz maksimalne amplitude. Naime, kako se stijenske diskontinuiteta zapravo poklapaju u manjem postotku od ukupne površine diskontinuiteta, tijekom ispitivanja u uređaju za izravni posmik u pojedinim slučajevima nisu se aktivirale najveće neravnine koje su upravo izmjerene preko amplitude hrapavosti. S druge strane korigirane vrijednosti koeficijenta hrapavosti koje su dobivene usporedbom sa standardnim profilima, te procjenom na temelju  $Z_2$  vrijednosti pokazuju daleko približnije iznose.

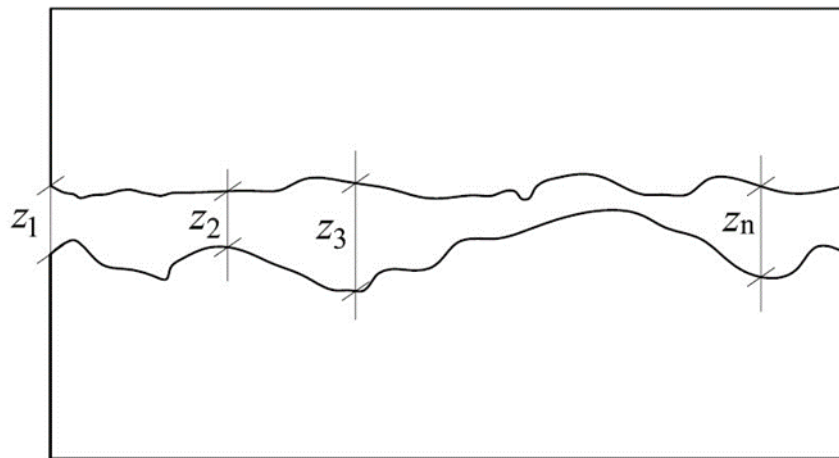
#### 4.5. Određivanje zijeva diskontinuiteta

Zijev diskontinuiteta (engl. *aperture*) okomita je udaljenost između stijenki diskontinuiteta. Prema preporučenim metodama za kvantitativni opis diskontinuiteta u stijenskim masama Međunarodnog društva za mehaniku stijena (Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, 1978) opisuje kao zatvoren, poluotvoren i otvoren s pripadajućim opisima i mjerama, kako je opisano u tablici 4-6. Zijev se može izmjeriti pomičnim mjerilom ili bilo kojim drugim preciznijim mjerilom za mjerenje duljine.

**Tablica 4-6.** Opis zijeve diskontinuiteta (ISRM, 1978)

ZIJEV (mm)	OPIS ZIJEVA	DISKONTINUITET
< 0,1 0,1 – 0,25 0,25 – 0,5	vrlo zatvoren zatvoren djelomično zatvoren	ZATVOREN
0,5 – 2,5 2,5 – 10 > 10	otvoren umjereno širok širok	POLUOTVOREN
10 – 100 100 – 1000 > 1000	vrlo širok ekstremno širok kavernozan	OTVOREN

Stijenke diskontinuiteta su nepravilne te kako bi se zijeve što točnije izmjerio, mjerenja treba provesti na nekoliko karakterističnih mjesta, a jedan od mogućih promjera je prikazan na slici 4-12. Na kraju izmjerene vrijednosti treba svesti na srednju vrijednost, kako bi se dobila što relevantnija vrijednost zijeve.

**Slika 4-12.** Mjerenje zijeve

U ovom istraživanju vrijednost zijeve dobivena je na temelju stvarnog zijeve između profilnih linija koja je određivana na svaki centimetar duljine duž iscrtanih profila na milimetarskom papiru.

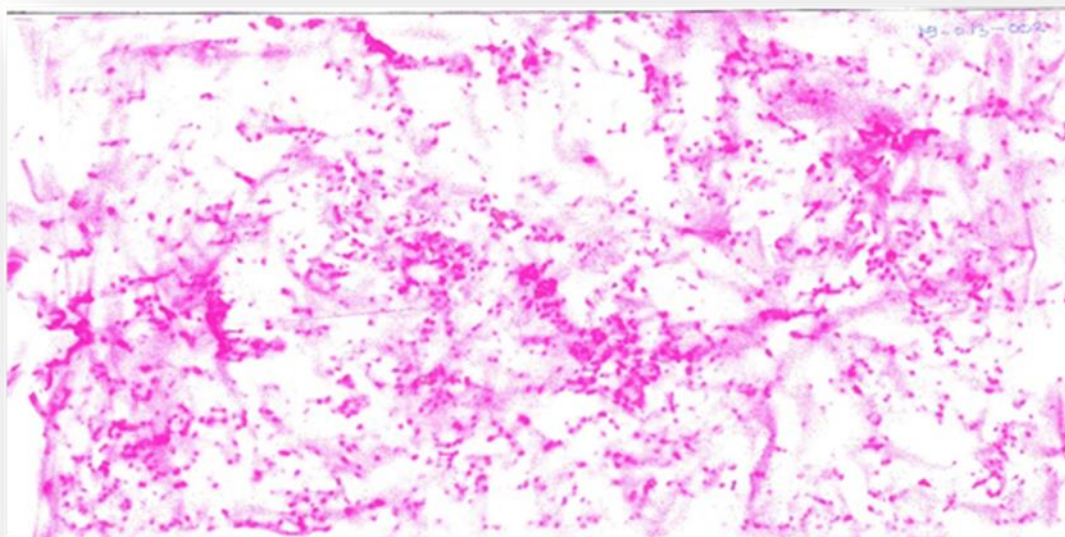
Rezultati srednjih vrijednosti prikazani su u tablici 4-7, dok se sva mjerenja nalaze u prilogu 2.

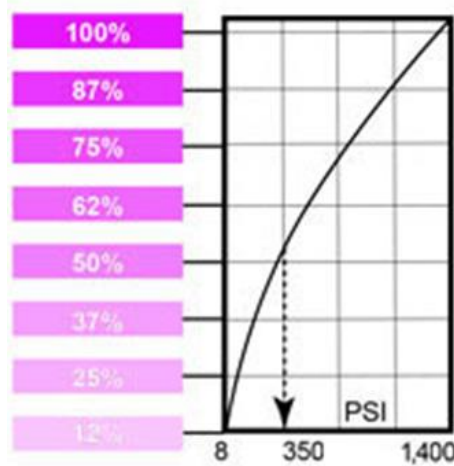
**Tablica 4-7.** Rezultati srednjih vrijednosti izmjerenog zijeva

Oznaka uzorka	001DSR	002DSR	003DSR	004DSR	005DSR	006DSR
Zijev (mm)	2,6	2,8	3,5	4,8	5,5	4,3

#### 4.6. Određivanje koeficijenta kontakta pukotine JCC

S obzirom na to da je već u preliminarnim istraživanjima uočena velika nepravilnost i nepodudaranje stijenki diskontinuiteta, velika pozornost posvećena je određivanju te značajke. Prijedlog koji je dao Zhao o uvođenju koeficijenta poklapanja stijenki pukotine *JMC* (*Joint Matching Coefficient*) (Zhao, 1997) pokazao se previše pojednostavljenim, te zbog toga nepouzdanim. Na temelju zapažanja i provedenih mjerenja u ovom istraživanju uveden je bezdimenzijski koeficijent nazvan koeficijent kontakta pukotine *JCC* (engl. *Joint Contact Coefficient*) koji predstavlja omjer površine stijenki koje su u kontaktu u odnosu na ukupnu površinu plohe diskontinuiteta uzorka. Od nekoliko isprobanih tehnika u sklopu ovog istraživanja (otisak silikonom, indigo papirom i sl.) određivanja *JCC*-a najjednostavnijom se pokazala primjena SPA filma (engl. *Surface Profiler Film*) (slika 4-13).

**Slika 4-13.** Otisak kontakata stijenki diskontinuiteta na SPA filmu

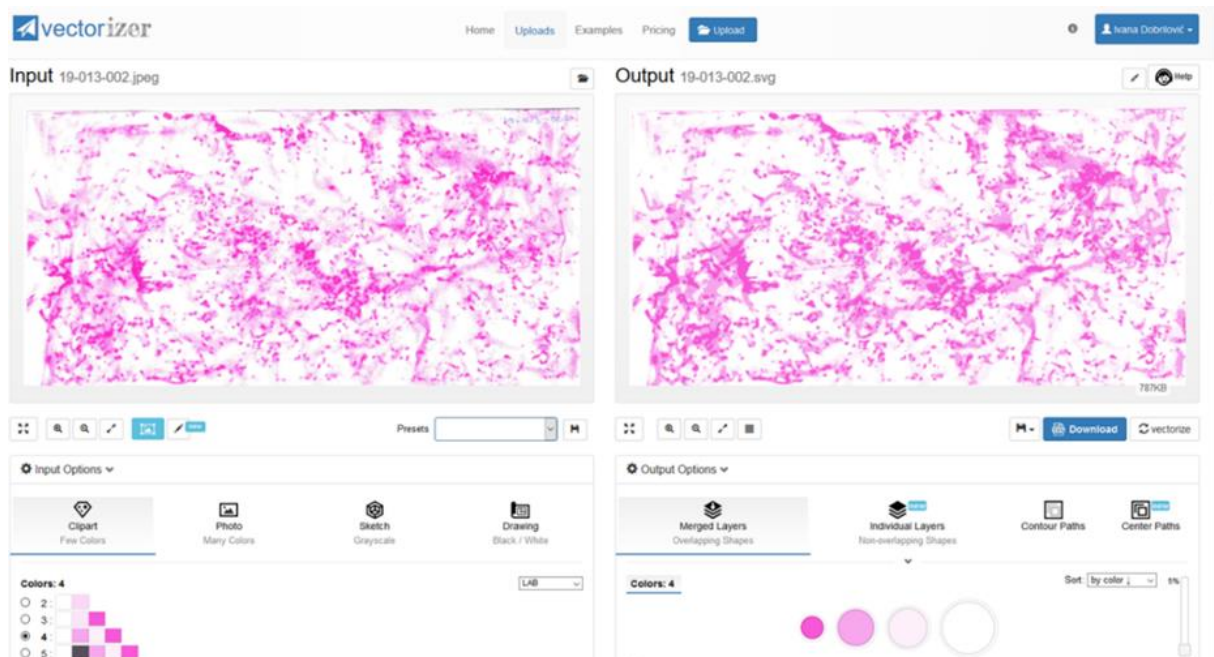


**Slika 4-14.** Graf s opisom intenziteta pritiska na film (preuzeto s <https://www.sensorprod.com/surface-profiler-film/>)

Film za profiliranje površina sastoji se od plastične nosive folije i sloja mikrokuglica. Nanašanjem opterećenja na film mikrokuglice pucaju i trenutačno generiraju trajni otisak odgovarajućeg pritiska na promatranju površini nosive folije. Pri tome je jačina pritiska proporcionalna boji na filmu. Što je veći pritisak, to je boja tamnija. Film je male debljine (0,19 milimetara), što omogućuje njegovu primjenu na uskim, nepravilnim i zakrivljenim površinama. Pogodan je u uvjetima u kojima se druga osjetila ne mogu primijeniti, a točnost mu je  $\pm 10$  (%) od očitane vrijednosti.

Sam postupak provedbe otiska sastojao se od prekrivanja površine diskontinuiteta donjeg dijela uzorka ovim folijama na koji se stavio gornji dio uzorka. Otisak se formirao samo uslijed vlastite težine gornjeg dijela uzorka. Nakon toga otisak sa SPA filma je digitaliziran, na temelju čega je izmjerena površina kontakata primjenom računalnog programa Image Vectorizer (slika 4-15). Softver je prije mjerenja površina validiran. Validacija je provedena tako da je snimana površina poznate dimenzije u plavoj i crvenoj boji. Program je prepoznao točnu površinu za plavu i crvenu boju te je time pokazana visoka pouzdanost softvera Image Vectorizer.





**Slika 4-15.** Mjerenje površina s pomoću softvera Image Vectorizer

Rezultati mjerenja *JCC-a* dobiveni primjenom SPA filma nalaze se u tablici 4-8.

**Tablica 4-8.** Izmjerene vrijednosti *JCC-a*

OZNAKA UZORKA	JCC (-)
001DSR	0,27
002DSR	0,34
003DSR	0,25
004DSR	0,13
005DSR	0,25
006DSR	0,26

Analizom rezultata uočeno je da udio površine diskontinuiteta koji je u kontaktu zapravo iznosi između 13 i 34 %. što je prilično manje od pretpostavljenog, jer se u početnim razmatranjima od kojih su najznačajnija Bartonova (Barton, 1973) smatralo da su stijenske diskontinuiteta gotovo u potpunosti u kontaktu.

## 4.7. Određivanje značajki ispune

Ispuna (engl. *filling*) jest pojam koji se upotrebljava za materijal koji odvaja u okomitom smjeru stijenske diskontinuiteta. Ispitivanja ispune provedena su u laboratoriju za ispitivanje tla i stijena društva Geotehnički studio d.o.o. iz Zagreba, te u laboratoriju Zavoda za geologiju pri Hrvatskom geološkom institutu. U laboratoriju za ispitivanje tla i stijena provedeno je: određivanje granulometrijskog sastava, određivanje plastičnih stanja (Atterbergove granice), određivanje udjela karbonata i određivanje gustoće čvrstih čestica te određivanje parametara posmične čvrstoće, dok je u laboratoriju Zavoda za geologiju pri Hrvatskom geološkom institutu provedena analiza mineraloškog sastava.

### 4.7.1. Određivanje granulometrijskog sastava

Granulometrijski sastav određen je u skladu sa zahtjevima norme HRN EN ISO 17892-4:2016. Prosijana je zahtijevana količina uzorka kroz sita na osnovi koje se zatim mogao odrediti udio pojedine frakcije zrna u odnosu na ukupnu masu prema Wentworthovoj skali, kao što je navedeno u preporučenim metodama za kvantitativni opis diskontinuiteta u stijenskim masama Međunarodnog društva za mehaniku stijena (Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, 1978). Vizualnim pregledom uzorka uočeno je da je riječ o dominantno sitnozrnom tlu, te je provedena kombinirana analiza (sijanje i areometriranje), pri čemu je upotrijebljena oprema, kao što je prikazano na slici 4-16.



**Slika 4-16.** Oprema za granulometrijsku analizu (preuzeto s <https://www.controls-group.com>)

Rezultati analize granulometrijskog sastava uzorka ispune prikazani u tablici 4-9, potvrdili su da je riječ o dominantno sitnozrnom tlu, te su provedeni i pokusi za određivanje granica plastičnih stanja.

**Tablica 4-9.** Rezultati granulometrijske analize uzorka ispune

Promjer zrna	Udio u ukupnoj masi (%)
63 mm – 20 mm	10,4
20 mm – 6,3 mm	1,3
6,3 mm – 2 mm	0,6
2 mm – 0,63 mm	0,3
0,63 mm – 0,2 mm	0,4
0,2 mm – 0,063 mm	0,6
0,063 mm – 0,002 mm	16,2
< 0,002 mm	70,2

Pored toga, određena je gustoća čvrstih čestica prema normi HRN EN ISO 17892-3:2016, pri čemu je izmjerena vrijednost iznosila 2,65 (g/cm<sup>3</sup>), te je određen udio karbonata prema normi HRN U.B1.026:1968, pri čemu je udio karbonata iznosio 21 %.

#### 4.7.2. Određivanje plastičnih stanja

Pokusi za određivanje granica plastičnih stanja provedeni su u skladu sa zahtjevima norme HRN EN ISO 17892-12:2018, pri čemu je za određivanje granice tečenja upotrijebljen Casagrandeov uređaj (slika 4-17).



**Slika 4-17.** Casagrandeov uređaj (preuzeto s <https://www.controls-group.com>)

Materijal ispune je u skladu s jedinstvenom klasifikacijom tla (engl. *Unified Soil Classification System* – USCS) klasificiran kao glina visoke plastičnosti (CH), a rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4-10.

**Tablica 4-10.** Rezultati određivanja plastičnih stanja

Plastično stanje	Izmjerena vrijednost
Granica plastičnosti $w_p$ (%)	29
Granica tečenja $w_L$ (%)	70
Indeks plastičnosti $I_p$ (%)	41

Također, na osnovi rezultata indeksa plastičnosti i granulometrijske analize određena je aktivnost gline primjenom izraza koji glasi:

$$I_A = \frac{I_p}{N_{0,002}} \quad 4-1$$

gdje su:

$I_p$  – indeks plastičnosti (%)

$N_{0,002}$  – udio zrna < 0,002 mm (%).

Aktivnost gline indeksni je pokazatelj primjenom kojeg možemo pretpostaviti koji mineral gline je prisutan u ispitanom uzorku. U ovom slučaju dobivena je vrijednost indeksa 0,58, što upućuje na to da je u uzorku ispune dominantan mineral gline *kaolinit*.

### 4.7.3. Određivanje mineraloškog sastava ispune

Mineraloški sastav ispune određen je primjenom metode rentgenske difrakcije na prahu (eng. *X-Ray Powder Diffraction, XRPD*). To je nedestruktivna eksperimentalna metoda koja se zasniva na upotrebi X-zraka i njihovoj difrakciji na nizu mrežnih ravnina minerala. Kako bi došlo do difrakcije na mrežnim ravninama moraju biti zadovoljeni određeni geometrijski uvjeti iskazani Braggovim zakonom. Prema Braggovom zakonom difrakcija na mrežnim ravninama se ostvaruje kada je višekratnik valne duljine  $\lambda$  ( $n \cdot \lambda$ , gdje je  $n=1, 2, 3 \dots$ ) jednak umnošku  $\sin \theta$  (gdje je  $\theta$  - kut upadne zrake) i dvostruke duljine međumrežnog razmaka ( $2 \cdot d$ ).

Rezultat ispitivanja na rentgenskom difraktometru (engl. *X-Ray Diffractometre, XRD*) je difrakcijska slika ili difraktogram koji prikazuje reflekse određenog intenziteta i  $2\theta$  kuteve na kojima je do refleksa došlo. Svaki mineral, zbog svoje pravilne kristalne strukture, ostvaruje

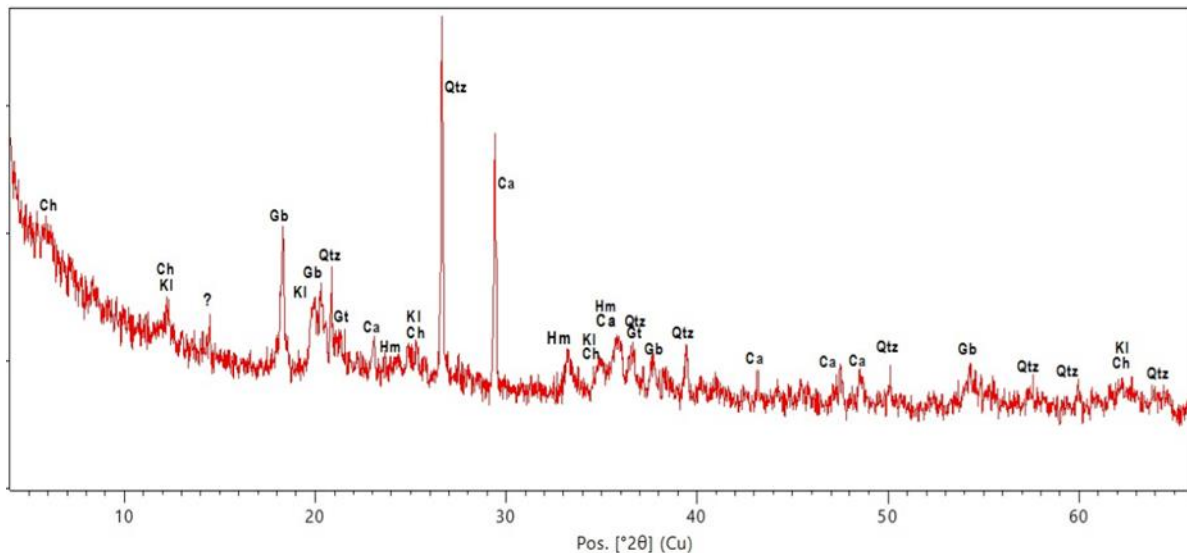
karakterističan difraktogram. Ukoliko se radi o uzorku koji je sastavljen od više različitih minerala, ovom metodom može se dobiti podatak o mineralnom sastavu (kvalitativna analiza) i zastupljenosti pojedinog minerala u uzorku (kvantitativna analiza).

Za potrebe ovog istraživanja provedene su kvalitativna i kvantitativna analiza cjelokupnog uzorka i uzorka glinovite frakcije ( $< 2 \mu\text{m}$ ). Kvantitativna mineraloška analiza provedena je metodom prema Rietveldu, odnosno postupkom utočnjavanja standardnih difraktograma minerala koji su identificirani u uzorku sa difraktogramom uzorka dobivenim nakon snimanja. Dobiveni rezultati dodatno su provjereni metodom koju je razvio Schultz (Schultz, 1964). Rendgenski difraktometar koji je upotrijebljen za tu analizu prikazan je na slici 4-18.



**Slika 4-18.** *Rendgenski difraktometar Hrvatskog geološkog instituta*

Analizom je utvrđeno da se uzorak ispune iz diskontinuiteta sastoji od 44 % kaolinita. Od ostalih minerala u cjelokupnom uzorku nalazi se 12 % kvarca, 10 % kalcita, 19 % gibbsita, 3 % hematita, 1 % getita i 11 % klorita, što je prikazano difraktogramom na slici 4-19.



**Slika 4-19.** Difraktogram dobiven snimanjem cjelokupnog uzorka. Ca – kalcit, Ch – klorit, Gb – gibbsit, Gt – getit, Hm – hematit, Kl – kaolinit, Qtz – kvarc, ? – nepoznati mineral

Rezultati mineraloške analize potvrdili su da je u uzorku ispune dominantan mineral gline *kaolinit*. Riječ je o mineralu koji nema sklonost bujanju, a upravo s aspekta norme za kvantitativno određivanje značajki diskontinuiteta (ISRM, 1978) vrlo je važno utvrditi da materijalom ispune ne dominira bujajuća glina, što je i utvrđeno.

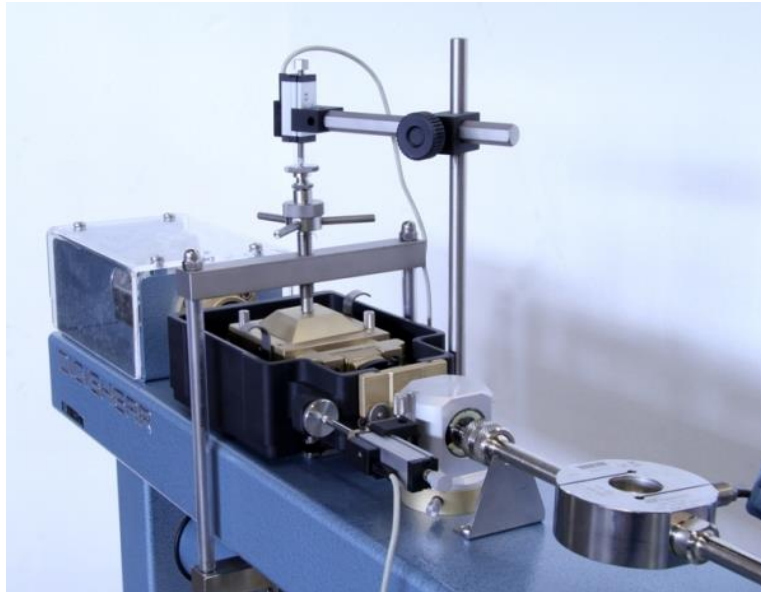
#### 4.7.4. Određivanje posmične čvrstoće ispune za odabrana granična stanja

Određivanje parametara posmične čvrstoće materijala ispune provedeno je standardnim postupkom ispitivanja prema normi ASTM D 3080/3080M-11 (Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, 2011), na laboratorijski pripremljenim uzorcima, odnosno rekonstruiranim uzorcima.

Postupak ispitivanja sastoji se od dvije faze od kojih je prva faza, faza konsolidacije uzorka normalnim naprezanjem ( $\sigma_n$ ), a druga faza je faza posmika gdje se uz povećanje posmičnog naprezanja, a uz konstantno normalno opterećenje uzorak pri malim brzinama ( $\sim 0,007$  mm/min do 0,5 mm/min) dovodi do loma.

Ispitivanje se provodi na neporemećenim uzorcima ili uzorcima rekonstruiranim u laboratorijskim uvjetima.

Uređaj za izravni posmik tla prikazan je na slici 4-20, a način analiziranja rezultata na slici 4-21.



**Slika 4-20.** Uređaj za izravni posmik (preuzeto s <https://www.controls-group.com>)

Odnosi između normalnih naprezanja ( $\sigma_n$ ) i vršne/rezidualne posmične čvrstoće ( $\tau$ ) prikazani su na slici 4-21 desno, kao i pravac čvrstoće definiran Coulombovim zakonom koji glasi:

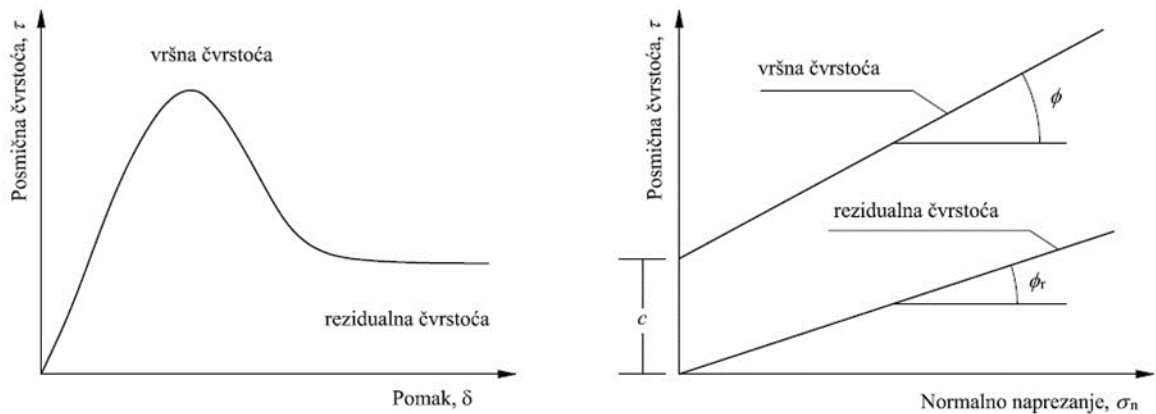
$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad 4-2$$

gdje su:

$c$  - kohezija (kPa),

$\sigma_n$  - normalno naprezanje (kPa),

$\varphi$  - kut unutarnjeg trenja ( $^\circ$ ).



**Slika 4-21.** Prikaz rezultata ispitivanja izravnim posmikom

U ovom istraživanju, s obzirom na položaj i veličinu pukotina, nije bilo moguće osigurati neporemećene uzorke na kojima bi se proveli mehanički pokusi, zbog čega je u ležištu uzorkovan poremećeni materijal, koji je rekonstruiran po kriteriju kontrolirane vlažnosti i pripremljen u laboratorijskim uvjetima, te podvrgnut ispitivanjima.

Budući da su u pojedinim dijelovima ležišta utvrđena različita moguća stanja materijala ispune, od potpuno suhog do stanja na granici tečenja, ali i mjesta gdje je materijal ispune potpuno ispran, odabrana su sljedeća granična stanja materijala ispune za koja su laboratorijski pripremljeni uzorci i određeni parametri posmične čvrstoće:

- stanje CH1 – diskontinuitet bez ispune
- stanje CH2 – ispuna od gline visoke plastičnosti (CH) uključujući zrna promjera  $< 2$  mm u suhom stanju
- stanje CH3 – ispuna od gline visoke plastičnosti (CH) uključujući zrna promjera  $< 0,4$  mm, pripremljena na vlažnost granice tečenja od 70 % i
- stanje CH4 – ispuna od gline visoke plastičnosti (CH) uključujući zrna promjera  $< 6,3$  mm, pripremljena na vlažnost od 45 %.

Navedene vlažnosti su odabrane obzirom da su najbolje odgovarale stvarnom stanju u ležištu. Kako je ranije navedeno, u ležištu su uočena mjesta gdje je materijal ispune potpuno suh ili ispran, ali i u stanju visoke vlažnosti.



Rezultati ispitivanja parametara posmične čvrstoće materijala ispune prikazani su u tablici 4-11, a svi rezultati ispitivanja provedeni na uzorku ispune nalaze se u prilogu 3.

**Tablica 4-11.** Rezultati prametara posmične čvrstoće uzorka ispune

Granična stanja ispune	w (%)	c (kPa)	$\varphi$ (°)
Stanje CH2	-	0,6	35,8
Stanje CH3	70	-	15,1
Stanje CH4	45	11,3	26,6

#### 4.8. Određivanje kuta trenja s ugrađenom ispunom

Budući da su rezultati ispitivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta s ispunama, koji su prikazali više autora, pokazali da se znatno smanjenje posmične čvrstoće događa dodavanjem čak i tankog sloja ispune (Indrartna i Haque, 2000), provedena su dodatna ispitivanja baznog kuta trenja koja su uključivala i ispunu.

Dakle, dodatna ispitivanja provedena su na isti način i s istim uzorcima kao i u slučaju određivanja baznog kuta trenja, ali s ugrađenim ispunama između ispiljenih ploha uzoraka.

##### 4.8.1. Određivanje kuta trenja s ugrađenom ispunom pokusom klizanja naginjanjem

Ispitivanje je provedeno na isti način i u istim uvjetima kao i pri određivanju baznog kuta trenja  $\varphi_b$  pokusom klizanja naginjanjem uz ugrađenu ispunu. Ispitivanja su provedena za sva stanja ispune uz prosječne debljine ugrađene ispune od dva do tri milimetra. Na slici 4-22 prikazan je slučaj kada je između polovina uzorka oznake 19-013-008 ugrađena ispuna oznake stanja CH2. Riječ je o ispuni od gline visoke plastičnosti (CH) uključujući zrna promjera  $< 2$  mm u suhom stanju.



**Slika 4-22.** Pokus klizanja naginjanjem

Rezultati izmjerenih vrijednosti za stanja ispune CH2, CH3 i CH4 prikazani su u tablici 4-11. S obzirom na to da vrijednost izmjerenog kuta nije bazni kut trenja, nego je zapravo riječ o kutu trenja s ugrađenom ispunom, uvedena je oznaka za taj parametar,  $\varphi_{fb}$  (engl. *basic friction angle with filling*).

**Tablica 4-12.** Rezultati kuta trenja s ugrađenom ispunom dobiveni pokusom klizanja naginjanjem

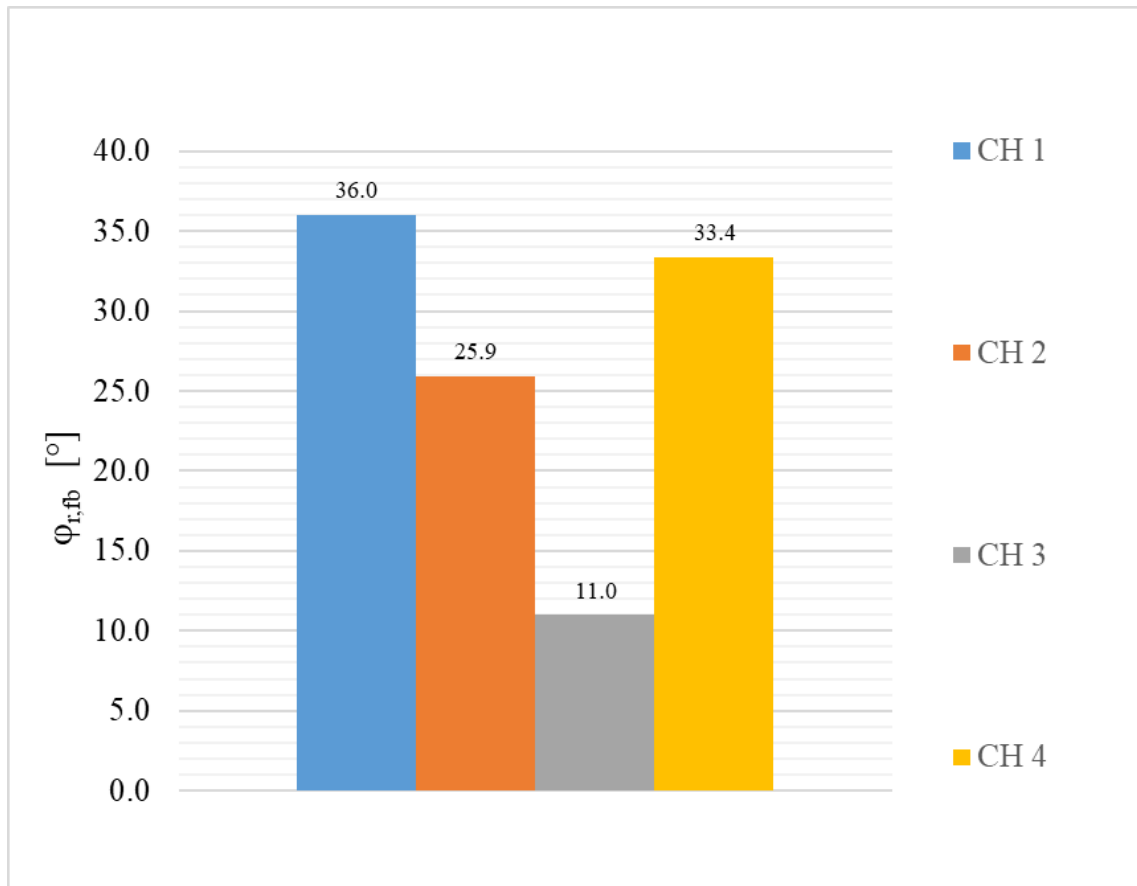
Oznaka uzorka	$\varphi_{fb}$ (°)	Oznaka uzorka	$\varphi_{fb}$ (°)	Oznaka uzorka	$\varphi_{fb}$ (°)
19-013-007CH2	17,1	19-013-008CH2	27,2	19-013-009CH2	27,3
	19,8		26,9		26,9
	25,9		26,4		24,6
	26,6		28,6		28,8
	28,5		28,1		26,1
19-013-007CH3	9,0	19-013-008CH3	11,1	19-013-009CH3	9,8
	12,6		12,7		10,8
	10,0		14,6		12,7
	12,0		11,3		11,4
	8,4		9,9		9,0
19-013-007CH4	24,9	19-013-008CH4	25,2	19-013-009CH4	28,9
	34,6		44,9		29,9
	28,0		26,1		40,0
	32,6		36,1		46,1
	33,8		33,9		36,3

Statističkom obradom rezultata ispitivanja dobivenih pokusom klizanja naginjanjem za stanje ispune CH2 dobivena je prosječna vrijednost kuta trenja ugrađene ispune od 25,9° uz vrijednost standardne devijacije od 3,27. Pritom je izmjerena najmanja vrijednost od 17,1° a najveća vrijednost od 28,8°.

Za stanje ispune CH3 dobivena je prosječna vrijednost kuta trenja od 11,0° uz vrijednost standardne devijacije od 1,71 te najmanja vrijednost od 8,4° i najveća vrijednost od 14,6°.

Za stanje ispune CH4 dobivena je prosječna vrijednost kuta trenja od 33,4° uz vrijednost standardne devijacije od 6,61 te najmanja vrijednost od 24,9° i najveća vrijednost od 46,1°

Dijagram izmjerenih vrijednosti prikazan je na slici 4-23.



**Slika 4-23.** Dijagram izmjerenih kutova trenja pokusom klizanja naginjanjem

#### 4.8.2. Određivanje kuta trenja s ugrađenom ispunom u uređaju za izravni posmik

Određivanje kuta trenja s ugrađenom ispunom provedeno je i standardnim postupkom ispitivanja posmične čvrstoće u CNL uvjetima uz vrijednosti normalnih naprezanja od 0,75 MPa, 1,5 MPa i 3 MPa, te uz brzinu smicanja od 0,5 mm/min, kao što je prikazano na slici 4-24 .

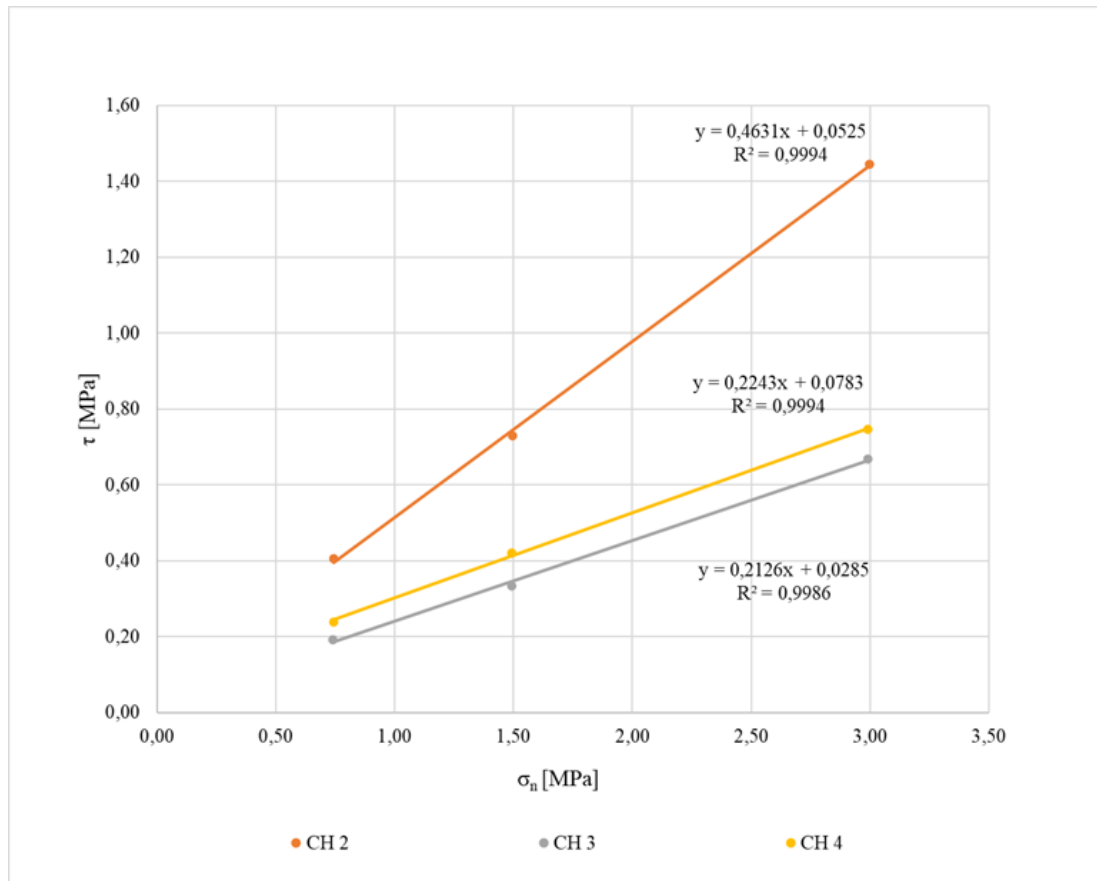


**Slika 4-24.** Ispitivanja kuta trenja s ugrađenom ispunom u uređaju za izravni posmik

Obradom rezultata ispitivanja za dobivene vršne vrijednosti posmičnih čvrstoća  $\tau$  u odnosu na vrijednosti normalnih naprezanja  $\sigma_n$  utvrđeni su pravci Coulombove čvrstoće na temelju kojih su dobivene vrijednosti kuta trenja. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4-13, a pravci čvrstoće na slici 4-25.

**Tablica 4-13.** Rezultati ispitivanja kuta unutarnjeg trenja s ugrađenom ispunom

Oznaka uzorka	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)
19-013-007CH2	0,742	0,406
	1,479	0,731
	2,996	1,445
19-013-007CH3	0,741	0,193
	1,491	0,335
	2,992	0,668
19-013-007CH4	0,742	0,240
	1,492	0,420
	2,992	0,747



**Slika 4-25.** Rezultati mjerenja kuta trenja s ugrađenom ispunom u uređaju za izravni posmik

Za stanje ispune CH2 dobivena je vrijednost kuta trenja od  $24,9^\circ$  uz koeficijent determinacije  $R^2$  od 0,9994.

Za stanje ispune CH3 dobivena je vrijednost kuta trenja od  $12,0^\circ$  uz koeficijent determinacije  $R^2$  od 0,9986.

Za stanje ispune CH4 dobivena je vrijednost kuta trenja od  $12,6^\circ$  uz koeficijent determinacije  $R^2$  od 0,9994.

Uočeno je da su za stanja ispune CH3 (ispuna od gline visoke plastičnosti (CH) uključujući zrna promjera  $< 0,4$  mm, pripremljena na vlažnost granice tečenja od 70 %) i CH4 (ispuna od gline visoke plastičnosti (CH) uključujući zrna promjera  $< 6,3$  mm, pripremljena na vlažnost od 45 %) dobivene gotovo iste vrijednosti kuta trenja s ugrađenom ispunom,  $12,0^\circ$  odnosno  $12,6^\circ$ . S obzirom na to da su oba stanja podvrgnuta visokim normalnim naprezanjima (do 3 MPa), frakcija zrna veličine manje od 6,3 mm koja je bila prisutna kod stanja CH4 usitnjena je

usred normalnog naprezanja te su oba stanja dala rezultate očekivanja za zrna promjera manjeg od 0,4 mm i visoke vlažnosti (45% i 70%).

U prilogu 4 nalaze se sva mjerenja vezana uz ispitivanje ugrađene ispune u uređaju za izravni posmik velikih uzoraka.

Kao što je već i objašnjeno, bazni kut trenja prvotno je izmjeren standardnim postupkom pokus klizanja naginjanjem u skladu s preporukama ISRM-a. Međutim, važno je istaknuti da u slučaju tog pokusa uzorak nije podvrgnut normalnom opterećenju, odnosno ono proizlazi samo iz opterećenja koje uzrokuje gornja polovina uzorka, te više dolazi do izražaja kohezija ispune. U slučaju ispitivanja u CNL uvjetima ispuna se djelomično istiskuje i komprimira s obzirom na to da je uzorak podvrgnut normalnom opterećenju, čime se zapravo simulira realnije uvjete u ležištu. Jedan od primjera istiskivanja i komprimiranja ispune prikazan je na slici 4-26.



**Slika 4-26.** Izgled ispune u stanju CH4 nakon ispitivanja u uređaju za izravni posmik

S obzirom na navedeno ispitivanja trenja ispune u kontaktu sa stijenom smatraju se realnijima kada se provode u CNL uvjetima u uređaju za izravni posmik velikih uzoraka tla i stijena.

#### 4.9. Određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta

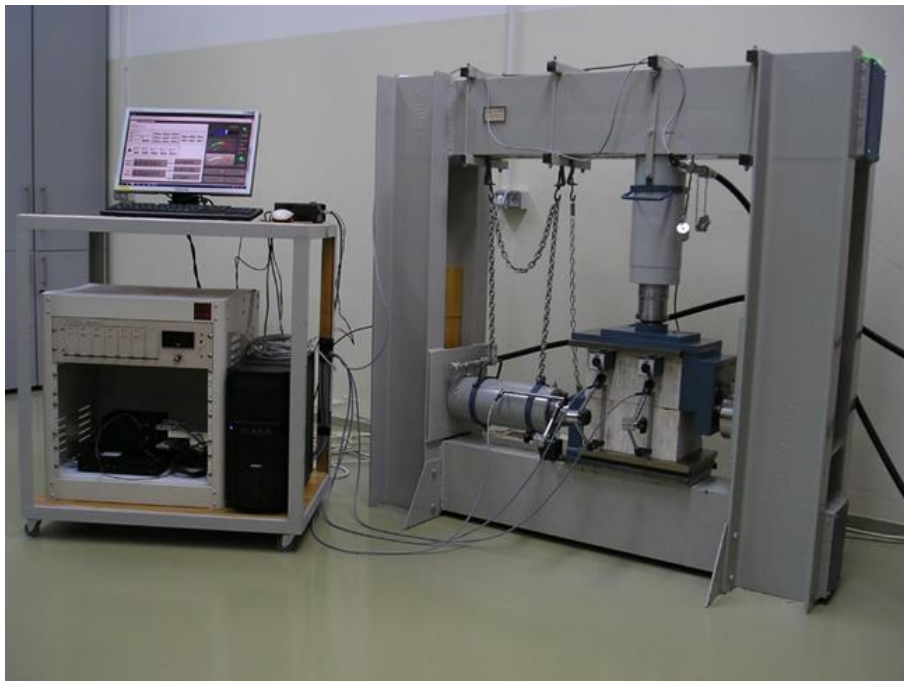
Međunarodno udruženje za Mehaniku stijena (ISRM) 2014. godine izdalo je revidiranu verziju Metode za određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta stijena.

Prema preporučenoj metodi posmična čvrstoća stijenskog diskontinuiteta može se odrediti ispitivanjima u uvjetima konstantnog normalnog opterećenja (engl. *Constant Normal Load*, CNL) ili u uvjetima konstantne normalne krutosti (engl. *Constant Normal Stiffness*, CNS).

Preporučena je metoda revizija i poboljšanje dijela 2. preporučene metode za laboratorijsko određivanje izravne posmične čvrstoće uključene u Preporučene metode za određivanje posmične čvrstoće (ISRM, 2007), a pripremljena je uzevši u obzir tehnološki napredak nakon njezina prvog publiciranja kao i ostale postojeće standardne metode uključujući ASTM D 5607-08 (ASTM, 2008), USACE RTH 203-80 (USACE, 1980) i JGS 2451-2008 (JGS, 2008).

Tehnološki napredak odnosi se na napredak mjerenja pojedinih veličina.

Određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta u ovom istraživanju provedeno je postupkom izravnog posmika prema Preporučenoj metodi ISRM-a (Muralha i dr., 2014) u uvjetima konstantnog normalnog opterećenja (CNL) s ispunom i bez nje, pri čemu je upotrijebljen uređaj za izravni posmik velikih uzoraka tla i stijena prikazan na slici 4-27.



**Slika 4-27.** Uređaj za izravni posmik velikih uzoraka



Uređaj za izravni posmik velikih uzoraka (engl. *the large direct shear testing machine*, LDST) razvijen je na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u Zagrebu za ispitivanja izravnog smicanja velikih uzoraka, koji se ne mogu ispitati standardnom ispitnom opremom. LDST uređaj razvijen je s ciljem ispitivanja na agregatima, šljunku i zdrobljenom kamenu, te blokovima kamena. LDST uređaj sastoji se od čeličnog okvira, čeličnih čeljusti između kojih se ugrađuje velika kutija za smicanje ili blokovi kamena, dva hidraulička potisna cilindra, SBEL servo i Soiltest električne hidraulične pumpe, te računalnog sustava za mjerenje. Kutija za smicanje takvih je dimenzija da se u nju mogu ugraditi uzorci dimenzija  $300 \times 300 \times 300$  milimetara. Računalni sustav za mjerenje sastoji se od LabVIEW programa, sustava za prikupljanje i prijenos signala, te mjernih osjetila za tlak i pomak (Gradiški i dr., 2017).

Budući da je ovdje riječ o ispitivanjima posmične čvrstoće diskontinuiteta, nije upotrijebljena kutija za uzorke, nego su prirodni uzorci kamena ugrađeni između čeličnih podložnih ploča i čeljusti.

U skladu sa zahtjevima preporučene metode za određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta (Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints, 2014) ispitivanjem smicanja pri konstantnom normalnom opterećenju (CNL) ne ispituje se čvrstoća pukotine, nego otpor smicanju pri određenom normalnom opterećenju koje može biti upotrijebljeno pri projektiranju u određenim graničnim uvjetima. U uvjetima konstantnog normalnog opterećenja određivanje posmične čvrstoće uglavnom uključuje primjenu nekoliko vrijednosti konstantnog normalnog opterećenja ili naprezanja na više uzoraka iste pukotine ili ispitne plohe, odnosno diskontinuiteta, te mjerenje posmičnih i normalnih naprezanja, kao i odgovarajućih posmičnih i normalnih pomaka. Norma zahtijeva, da se uzme najmanje tri uzoraka iz iste pukotine ili ispitne plohe sa sličnim značajkama, te da se ispituju duž istog smjera smicanja, što je i učinjeno.

Kao što je i u uvodu navedeno, vrlo je zahtjevno osigurati veći broj uzoraka za ispitivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta, zbog čega isti uzorak može biti više puta ispitan u uvjetima različitog konstantnog normalnog opterećenja, te je tada riječ o višefaznom ispitivanju. Za ispitivanje jednog diskontinuiteta u stijeni treba upotrijebiti najmanje tri normalna naprezanja. Taj se višefazni pristup može upotrijebiti samo kada su lom i degradacija hrapavosti površine diskontinuiteta u prethodnim fazama smicanja minimalni (npr. pod niskim normalnim naprezanjima). Osim toga mogu se provoditi dvije tehnike višefaznih ispitivanja smicanja: ispitivanje bez vraćanja uzorka u njegov početni položaj prije svake faze smicanja ili uz vraćanje uzorka u njegov početni položaj prije svake faze smicanja.

Pri odabiru dimenzija uzorka treba uzeti u obzir da uzorci mogu biti bilo kojeg oblika, ali takvi da područje presjeka može biti određeno s potrebnom točnošću, te da je visina uzorka veća od debljine posmične (ispitne) zone i dovoljna da se uzorak postavi u kućište u držaču uzorka. Duljina ispitne ravnine (mjerena duž smjera smicanja) treba biti 10 puta veća od maksimalne duljine neravnine.

Prije svakog ispitivanja treba odrediti veličinu nominalnog područja presjeka posmične ravnine uzorka s odstupanjem od maksimalno 2,5 mm<sup>2</sup>.

Prije bilo koje serije ispitivanja određuju se uvjeti opterećenja i raspon normalnih opterećenja koja će se primijeniti tijekom smicanja, a u skladu s očekivanim napreznjima na diskontinuitetu u planiranom projektu.

U postupku ispitivanja uzorak je podvrgnut normalnom i posmičnom opterećenju.

Prije bilo kojeg ispitivanja smicanja primjena normalnog opterećenja sastoji se od kontinuiranog povećanja normalnog opterećenja po postupnom prirastu dok se ne postigne određeno normalno napreznje, pri čemu se bilježe posljedični normalni pomaci.

Normalno opterećenje primjenjuje se kontinuirano po izabranom prirastu normalnog napreznja osiguravajući da svaki ciklus opterećenja i rasterećenja traje oko pet minuta. Posmično opterećenje pokreće se kada se normalni pomak stabilizira. Nakon što se normalni pomak stabilizira pod primjenom normalnog opterećenja, kontinuirano se ostvaruje posmični pomak po izabranom prirastu. U skladu s Preporučenom metodom dovoljan je posmični pomak koji iznosi između pet i deset posto duljine diskontinuiteta. Prirasti posmičnog pomaka oko 0,1-0,2 mm/min obično su pogodni za cijelo ispitivanje, iako mogu biti neznatno povećani sve do vrijednosti od oko 0,5 mm/min nakon vršne posmične čvrstoće.

Nominalna napreznja i posmična napreznja računaju se prema sljedećim izrazima:

$$\sigma_n = \frac{N}{A} \quad 4-3$$

$$\tau = \frac{T}{A} \quad 4-4$$

gdje su:

$N$  – normalno opterećenje (kN)

$T$  – posmično opterećenje (kN)

$A$  – nominalna površina (cm<sup>2</sup>)

$\sigma_N$  – normalno napreznje (MPa) i

$\tau$  – posmično napreznje (MPa).

Koristeći se zabilježenim podacima i dijagramom posmičnog naprezanja u odnosu na posmični pomak, određuju se vršna i rezidualna posmična naprezanja za svaki uzorak stijene, te kutovi vršne i rezidualne dilatancije. Zatim treba iscrtati dijagrame koji prikazuju odnose vršnog posmičnog naprezanja u odnosu na normalno naprezanje, da bi se ocijenili parametri čvrstoće propisanog kriterija sloma.

U najjednostavnijem slučaju najčešće se primjenjuje Coulombov kriterij, kako bi se primjereno interpretiralo rezultate ispitivanja smicanja diskontinuiteta u stijeni. U tom slučaju parametri tog linearnog kriterija sloma definirani su kako slijedi:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad 4-5$$

gdje su:

$c$  – kohezija (kPa) i

$\varphi$  – kut unutarnjeg trenja (°).

U slučaju hrapavih ili neravnih stijenki diskontinuiteta nelinearna krivulja posmične čvrstoće mnogo je reprezentativnija od interpretacije linearnim kriterijem, zbog čega se upotrebljava Bartonov JRC-JCS model.

U ovom istraživanju ispitivanja posmične čvrstoće provedena su u skladu s opisanim zahtjevima preporučene metode. Primijenjen je višefazni postupak ispitivanja, pri čemu uzorak nije vraćan u početni položaj, kako bi se minimizirao utjecaj oštećenja i trošenja, te je svaka sljedeća faza smicanja provedena pri višim normalnim naprezanjima, koja su redom iznosila 0,75 MPa, 1,5 MPa i 3 MPa. Ispitani uzorci pripremljeni su na način da su ispiljeni tako da prirodni diskontinuitet prolazi približno horizontalno po sredini uzorka. Pri ispitivanju uz računalni sustav za mjerenje, koji se sastoji od LabVIEW programa, sustava za prikupljanje i prijenos signala te mjernih osjetila za tlak i pomak, upotrijebljena je aplikacija za obradu podataka razvijena u Geomehaničkom laboratoriju. Aplikacija računa korekciju za površinu uslijed međusobnog pomaka pri smicanju, te korekciju za nagib cijele površine. Rezultati aplikacije prikazani su u pripadajućim izvještajima u prilogu.

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta bez ispune prikazani su u tablici 4-14, a rezultati s ispunom u tablicama 4-15 i 4-16. Sva pripadajuća mjerenja nalaze se u prilogu 5.

**Tablica 4-14.** Rezultati izmjerenih vrijednosti za stanje ispune CH1 – bez ispune

Oznaka uzorka	debljina ispune (mm)	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\varphi_{\text{peak}}$ (°)	$\delta_{\text{peak}}$ (mm)	$\psi_{\text{peak}}$ (°)	$k_n$ (MPa / mm)	$k_s$ (MPa / mm)
19-013-001DSR	-	0,017	0,026	56,0	0,697	10,8	-	0,036
	-	0,819	1,138	54,3	1,879	5,4	6,298	0,779
	-	1,634	1,957	50,1	1,396	9,6	3,552	1,126
	-	3,288	3,952	50,2	11,432	8,0	7,275	0,965
19-013-004DSR	-	0,021	0,039	62,3	1,792	17,1	-	0,014
	-	0,728	0,801	47,7	2,300	10,6	5,220	0,309
	-	1,479	1,200	39,0	1,147	5,5	3,128	0,627
	-	2,898	1,890	33,1	1,263	1,7	12,132	1,056

**Tablica 4-15.** Rezultati izmjerenih vrijednosti za stanje ispune CH2 – suha sitnozrna ispuna

Oznaka uzorka	debljina ispune (mm)	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\varphi_{\text{peak}}$ (°)	$\delta_{\text{peak}}$ (mm)	$\psi_{\text{peak}}$ (°)	$k_n$ (MPa / mm)	$k_s$ (MPa / mm)
19-013-002DSR	3,2	0,018	0,038	64,7	2,384	8,2	-	0,014
	3,2	0,813	0,961	49,8	11,974	2,3	3,297	0,083
	3,2	1,605	1,594	44,8	5,266	5,4	1,660	0,263
	3,2	3,174	2,671	40,1	4,468	3,0	3,499	0,528
19-013-005DSR	3,1	0,021	0,039	62,4	2,503	5,5	-	0,015
	2,98	0,714	0,773	47,3	3,524	6,0	5,639	0,203
	2,98	1,444	1,366	43,4	2,361	3,6	6,435	0,475
	2,98	2,909	2,399	39,5	5,812	1,1	8,831	0,352

**Tablica 4-16.** Rezultati izmjerenih vrijednosti za stanje ispune CH4 – vlažna ispuna s kršjem

Oznaka uzorka	debljina ispune (mm)	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\varphi_{\text{peak}}$ (°)	$\delta_{\text{peak}}$ (mm)	$\psi_{\text{peak}}$ (°)	$k_n$ (MPa / mm)	$k_s$ (MPa / mm)
19-013-003DSR	2,7	0,018	0,053	71,5	2,205	19,8	-	0,026
	2,8	0,767	0,782	45,6	2,149	8,6	5,468	0,382
	2,8	1,541	1,505	44,3	5,079	8,8	5,554	0,261
	2,8	3,087	2,745	41,6	3,489	6,7	8,158	0,710
19-013-006DSR	3,0	0,029	0,110	75,4	3,131	15,3	-	0,039
	3,38	0,792	0,702	41,5	1,668	2,5	4,280	0,436
	3,38	1,614	1,670	46,0	0,973	6,7	3,103	1,215
	3,38	3,188	2,557	38,7	4,881	0,4	5,889	0,45

Ispitivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta otkrila su nekoliko karakterističnih pojava. Prvo, ispitivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta s ugrađenim ispunama stanja CH2 i CH4 dala su prema očekivanju niže vrijednosti u odnosu na stanje bez ispune CH1. Ispitivanja posmične čvrstoće s ispunama stanja CH3, koje se zapravo odnosi na ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) uključujući zrna promjera < 0,4 mm koja je pripravljena na vlažnost granice tečenja od 70 %, dala su vrijednosti posmičnih čvrstoća u prosjeku bliže vrijednostima bez ispune nego vrijednostima s ispunama. Osnovni je razlog uočeni mehanizam istiskivanja ispune, koji je prikazan na slici 4-28 te rezultati ispitivanja za stanje CH3 nisu uzeti u daljnja analiziranja.



**Slika 4-28.** *Istiskivanje ispune na granici tečenja*

Naime, pri smicanju diskontinuiteta s izrazito hrapavim i nepravilnim stijenkama, koje se zbog nepodudaranja nalaze u kontaktu samo na nekoliko mjesta, potpuno se istiskuje ispuna na mjestima kontakata, tako da se smicanje odvija zapravo bez ispune.

Kod ispuna koje nisu bile na granici tečenja (CH2 i CH4) istiskivanje se događa u manjoj mjeri, tako da između stijenki ostane ispuna određene debljine, ali koja je dovoljna da osjetno smanji posmičnu čvrstoću. Nadalje, upravo zbog efekta istiskivanja ispune pri smicanju uočeno je da zapravo debljine ispune veće od dva do tri milimetra ne utječu dodatno na smanjenje posmičnih čvrstoća. Drugo, ispitivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta s ugrađenim ispunama stanja CH2 i CH4 pokazala su povećanu kompresibilnost, a smanjenu dilativnost, za razliku od ispitivanja posmične čvrstoće bez ispuna koja su pokazala znatno manju kompresibilnost, ali veću dilativnost, što je u skladu s rezultatima ostalih istraživanja (Indrartna i Haque, 2000).

Na kraju, može se zaljučiti da prisustvo ispune koja se pri tome odnosi na glinu visoke plastičnosti a dominantan mineral joj je kaolinit, ima utjecaj na smanjenje posmične čvrstoće diskontinuiteta.

## **5. RAZVOJ MODELA ZA PROCJENU POSMIČNE ČVRSTOĆE DISKONTINUITETA**

### **5.1. Polazišne osnove**

Osnovni cilj razvoja modela je bio postavljanje jedinstvenog modela za procjenu posmične čvrstoće vrlo nepravilnih i hrapavih diskontinuiteta s i bez materijala ispune. Slučaj vrlo nepravilnih i hrapavih diskontinuiteta s i bez materijala ispune upravo je prisutan u masivnim i/ili debelo uslojenim vapnencima za koje su karakteristični primjeri ležišta arhitektonsko-gradevnog kamena kao na primjeru Kanfanara u Istri. Kako bi se razvio jedinstveni model za procjenu posmične čvrstoće, za polazišnu osnovu prihvaćena su prethodna zapažanja autora vezana uz pojavu značajnog smanjenja posmične čvrstoće dodavanjem čak i tankog sloja ispune (Indrartna i Haque, 2000). Pritom je kao osnovni model uzet Bartonov JRC-JCS model kao najčešće primjenjivan u inženjerskoj praksi koji je dan izrazom 2-12. S ciljem utvrđivanja utjecaja pojedinih veličina na vrijednost posmične čvrstoće provedena je parametarska analiza Bartonovog JRC-JCS modela. Rezultati parametarske analize dani su u tablici 5-1.

**Tablica 5-1.** Rezultati parametarske analize Bartonovog modela

Promjenjivi parametar	$\sigma_n$ (MPa)	JRC (-)	JCS (MPa)	$\varphi_r$ (°)	$\tau$ (MPa)	Korekcija promjenjivog parametra (%)	Promjena $\tau$ (%)
JRC	0,75	10	100	25	0,7834	-	-
	0,75	7	100	25	0,6265	-30	-20
	0,75	13	100	25	0,9818	+30	25,3
JCS	0,75	10	100	25	0,7834	-	-
	0,75	10	70	25	0,7422	-30	-5,3
	0,75	10	130	25	0,8153	+30	4,1
$\varphi_r$ (°)	0,75	10	100	25	0,7834	-	-
	0,75	10	100	17,5	0,6019	-30	23,2
	0,75	10	100	32,5	1,0288	+30	30,6
JRC	1,5	10	100	25	1,4105	-	-
	1,5	7	100	25	1,1622	-30	-17,6
	1,5	13	100	25	1,7081	+30	21,1
JCS	1,5	10	100	25	1,4105	-	-
	1,5	10	70	25	1,3360	-30	-5,3
	1,5	10	130	25	1,4678	+30	4,1
$\varphi_r$ (°)	1,5	10	100	25	1,4105	-	-
	1,5	10	100	17,5	1,0794	-30	23,5
	1,5	10	100	32,5	1,8352	+30	30,1
JRC	3,0	10	100	25	2,5378	-	-
	3,0	7	100	25	2,1526	-30	-15,2
	3,0	13	100	25	2,9789	+30	17,4
JCS	3,0	10	100	25	2,5378	-	-
	3,0	10	70	25	2,1526	-30	5,4
	3,0	10	130	25	2,6419	+30	4,1
$\varphi_r$ (°)	3,0	10	100	25	2,5378	-	-
	3,0	10	100	17,5	1,9281	-30	24,0
	3,0	10	100	32,5	3,3003	+30	30,0



Na temelju prikazanih rezultata u tablici 5-1 uočeno je da najveći utjecaj na procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta imaju rezidualni kut trenja i koeficijent hrapavosti diskontinuiteta. Na primjer, pri normalnom naprezanju  $\sigma_n=0,75$  MPa te  $JCS=100$  MPa i  $\varphi_r=25^\circ$ , pri promjeni  $JRC$ -a tako da je vrijednost povećana za 30% od početne vrijednosti koja je iznosila 10, uočeno je povećanje posmične čvrstoće diskontinuiteta od 25%, odnosno kada se promjena odnosila na smanjenje vrijednosti  $JRC$ -a za 30%, vrijednost posmične čvrstoće smanjena je za 20%. Također je uočeno da promjena rezidualnog kuta trenja tako da je početna vrijednost od  $25^\circ$  povećana za 30% može povećati iznos posmične čvrstoće diskontinuiteta za 31%, dok parametar  $JCS$  pri povećanju od 30% doprinosi promjeni rezultata samo za približno 4 %. Provedena analiza bila je značajan pokazatelj pri postavljanju novog modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta.

S obzirom na to da se u inženjerskoj praksi bazni odnosno rezidualni kut trenja često procjenjivao na osnovu podataka iz literature, provedena parametarska analiza ukazuje na važnost njegova mjerenja jer je upravo taj parametar (uz  $JRC$ ) onaj koji najviše doprinosi konačnom rezultatu posmične čvrstoće diskontinuiteta. Ako se uz navedeno doda da pri procjeni  $JRC$ -a primjenom ručnog profilometra postoji mogućnost utjecaja subjektivnosti ispitivača, cijeli postupak može imati negativne posljedice kada se posmična čvrstoća ne ispituje, nego se procjenjuje primjenom neodgovarajućeg modela za posmičnu čvrstoću diskontinuiteta.

Nadalje, osnovna pretpostavka prilikom razvoja jedinstvenog modela bila je da, kako bazni kut odnosno rezidualni kut trenja, doprinosi posmičnoj čvrstoći diskontinuiteta bez ispunje, da tako i kut trenja dobiven ispitivanjem s ugrađenom ispunom između ispiljenih ploha doprinosi posmičnoj čvrstoći diskontinuiteta s ispunom.

S obzirom na navedene pretpostavke, iz tog su razloga upravo i provedena ispitivanja odnosno mjerenja kuta trenja s ugrađenom ispunom koja su prikazana u prethodnom poglavlju.

## **5.2. Razvoj modela**

U prvom koraku razvoja novog modela, prvo je postavljen model za procjenu posmične čvrstoće tako da je u postojeći Bartonov model dan izrazom 2-12, umjesto rezidualnog kuta trenja, za slučajeve kada diskontinuiteti sadrže ispunu, uvršten kut trenja s ugrađenom ispunom  $\varphi_{fb}$ .

Modifikacijom Bartonovog modela postavljen je dakle novi model koji je dan sljedećim izrazom:

$$\tau = \sigma_n \tan(JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_{r,fb}) \quad 5-1$$

gdje su:

$\tau$  – posmična čvrstoća (MPa),

$\sigma_n$  – normalno naprezanje na plohi diskontinuiteta (MPa),

$\varphi_{r,fb}$  –kut trenja s ugrađenom ispunom (°),

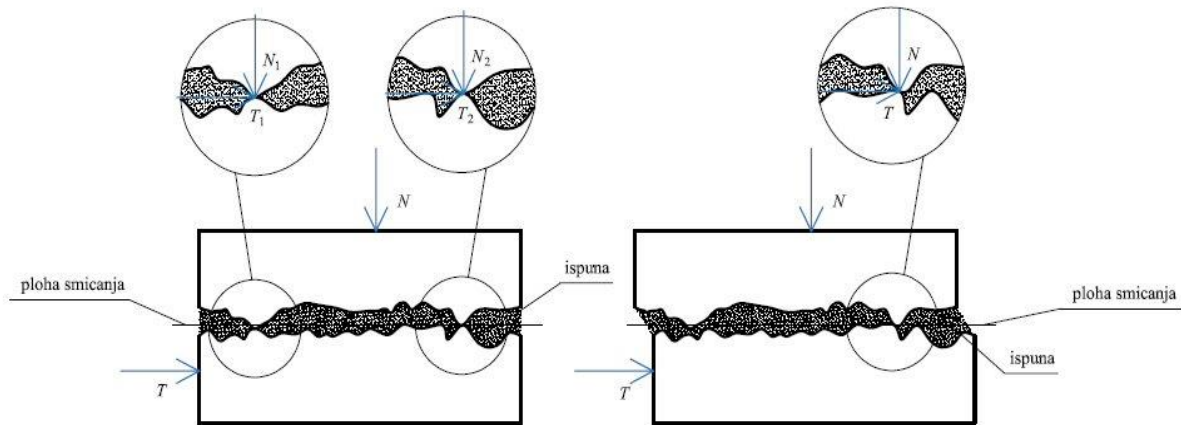
$JRC$  – koeficijent hrapavosti diskontinuiteta (-),

$JCS$  – tlačna čvrstoća stijenki diskontinuiteta (MPa).

Prilikom primjene baznog kuta trenja, odnosno rezidualnog ili kuta trenja s ugrađenom ispunom potrebno je posebno naglasiti da se isključivo radi o primjeni rezultata koji su dobiveni iz standardnog postupka ispitivanja izravnim posmikom u CNL uvjetima. Naime, kao prvo, zapravo su tim postupkom omogućeni uvjeti koji su najbliže stvarnim uvjetima prilikom smicanja međusobnih ploha diskontinuiteta. Kao drugo, uočeni su efekti većeg utjecaja mikrohrapavosti na bazni kut trenja dobiven pokusom klizanja naginjanjem.

Dobivene vrijednosti prikazane u tablicama 4-1 jasno su upućivale upravo na primjenu rezultata kuta trenja s ugrađenom ispunom iz standardnog postupka ispitivanja izravnim posmikom u CNL uvjetima.

Nadalje, prilikom ispitivanja uočeno je da nasuprotne stijenske diskontinuiteta ne ostvaruju kontakt u potpunoj mjeri. S obzirom na uočeno, provedena su mjerenja kako bi se odredila stvarna površina kontakta stijenki diskontinuiteta koja su također prikazana u prethodnom poglavlju. Provedena mjerenja pokazala su da stijenske diskontinuiteta ostvaruju kontakt u rasponu od svega 13% do 34% ukupne površine diskontinuiteta, odnosno izraženo kao koeficijent kontakta stijenki diskontinuiteta  $JCC$  (engl. *Joint Contact Coefficient*) udio površine kontakta kreće se unutar raspona vrijednosti između 0,13 i 0,34. Na slici 5-1 je prikazano poopćeno stanje kontakta stijenki diskontinuiteta s obzirom na hrapavost.



**Slika 5-1.** Shematski prikaz redukcije površina diskontinuiteta pri smicanju s obzirom na hrapavost

Naprezanja između neravnina diskontinuiteta raspoređena su na kontaktnim površinama, odnosno dominantnu ulogu u mehanizmu smicanja imaju područja u kojima je ostvaren kontakt nasuprotnih stijenki diskontinuiteta.

Na osnovu izmjerenog *JCC*-a i pretpostavke da se naprezanja koja doprinose posmičnoj čvrstoći diskontinuiteta zapravo preraspodjeljuju na površinu koja je u kontaktu, provedena je korekcija normalnog naprezanja za stvarnu površinu kontakta, te je model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta koji je dan izrazom 5-1 korigiran i postavljen kako slijedi:

$$\tau = \sigma_n \tan(JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\frac{\sigma_n}{JCC}} \right) + \varphi_{r,fb}) \quad 5-2$$

Konačan oblik nakon sređivanja izraza 5-2 dan je kako slijedi:

$$\tau = \sigma_n \tan(JRC \log_{10} \left( \frac{JCS \times JCC}{\sigma_n} \right) + \varphi_{r,fb}) \quad 5-3$$

gdje su:

$\tau$  – posmična čvrstoća (MPa),

$\sigma_n$  – normalno naprezanje na plohi diskontinuiteta (MPa),

$\varphi_{r,fb}$  – rezidualni ili kut trenja ugrađene ispunjevalne materijala (°),

*JRC* – koeficijent hrapavosti diskontinuiteta (-),

*JCS* – tlačna čvrstoća stijenki diskontinuiteta (MPa),

*JCC* – koeficijent kontakta stijenki diskontinuiteta (-).

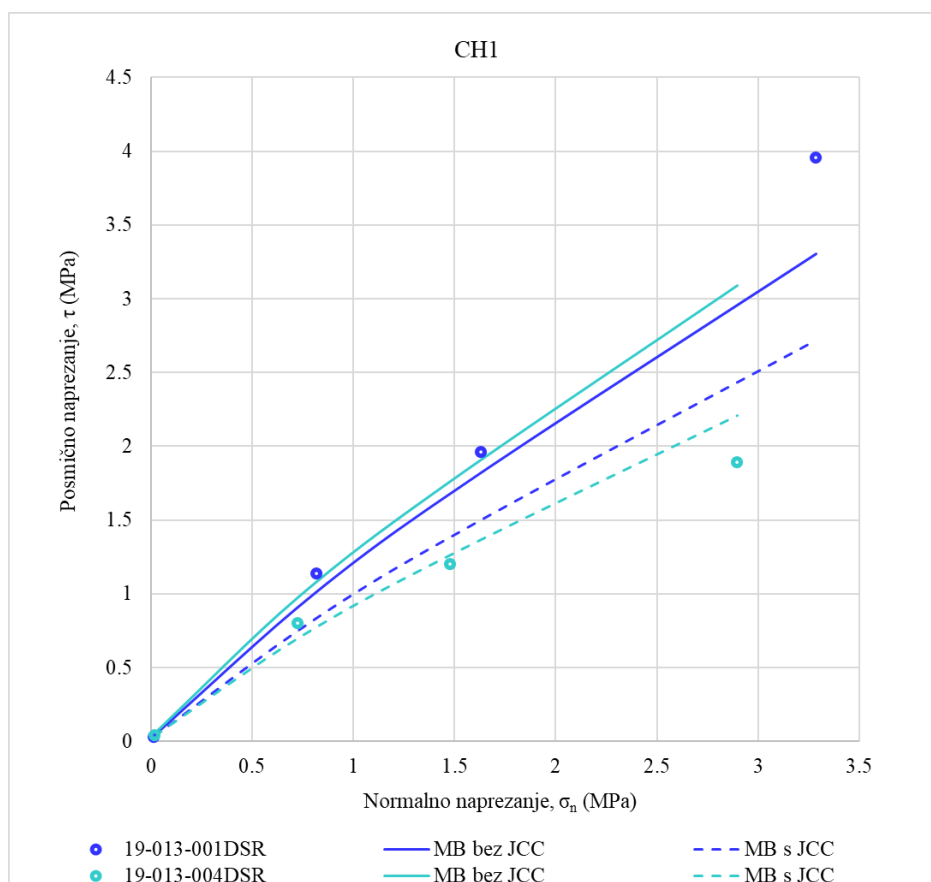
Na temelju rezultata provedenih ispitivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta s i bez ispune, koji su prikazani u prethodnom poglavlju, provedena je analiza primjenjivosti postavljenih modela. Analiza je provedena usporedbom dobivenih vrijednosti prema modelu koji je dan izrazom 5-1, označen kao MB bez JCC (prva inačica), i modelu koji je dan izrazom 5-3, označen kao MB s JCC (druga inačica), te izmjerenih vrijednosti.

Analize su provedene tako da je za svako stanje ispune (CH1, CH2 i CH4) napravljena posebna analiza. Stanje ispune CH3 koje se odnosi na ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) uključujući zrna promjera < 0,4 mm, pripremljenu na vlažnost granice tečenja koja iznosi 70 %, izostavljeno je zbog uočenog istiskivanja materijala ispune, te se u konačnici smicanje u tom slučaju odvija bez prisustva ispune.

Za slučaj CH1, koji predstavlja zapravo slučaj u kojem nema ispune, rezultati su prikazani u tablici 5-2 te dijagramom na slici 5-2. U tablicama 5-2, 5-3 i 5.4 posebno su bojama istaknute procijenjene vrijednosti posmične čvrstoće diskontinuiteta koje su bliže izmjerenim vrijednostima.

**Tablica 5-2.** Rezultati izmjerenih i procijenjenih vrijednosti za slučaj CH1 - bez ispune

Oznaka uzorka	$\varphi_{r,fb}$ (°)	JRC (-)	JCS (MPa)	JCC (-)	$\sigma_n$ (MPa)	Izmjerena vršna posmična čvrstoća $\tau$ (MPa)	MB bez JCC $\tau$ (MPa)	MB s JCC $\tau$ (MPa)
19-013-001DSR	31,0	9,9	89,7	0,27	0,017	0,026	0,042	0,032
	31,0	9,9	89,7	0,27	0,819	1,138	1,016	0,834
	31,0	9,9	89,7	0,27	1,634	1,957	1,825	1,500
	31,0	9,9	89,7	0,27	3,288	3,952	3,307	2,716
19-013-004DSR	30,8	8,5	88,8	0,13	0,021	0,039	0,058	0,037
	30,8	8,5	88,8	0,13	0,728	0,801	0,978	0,697
	30,8	8,5	88,8	0,13	1,479	1,200	1,763	1,260
	30,8	8,5	88,8	0,13	2,898	1,890	3,092	2,206



**Slika 5-2.**  $\sigma$ - $\tau$  dijagram za stanje CH1 – bez ispune

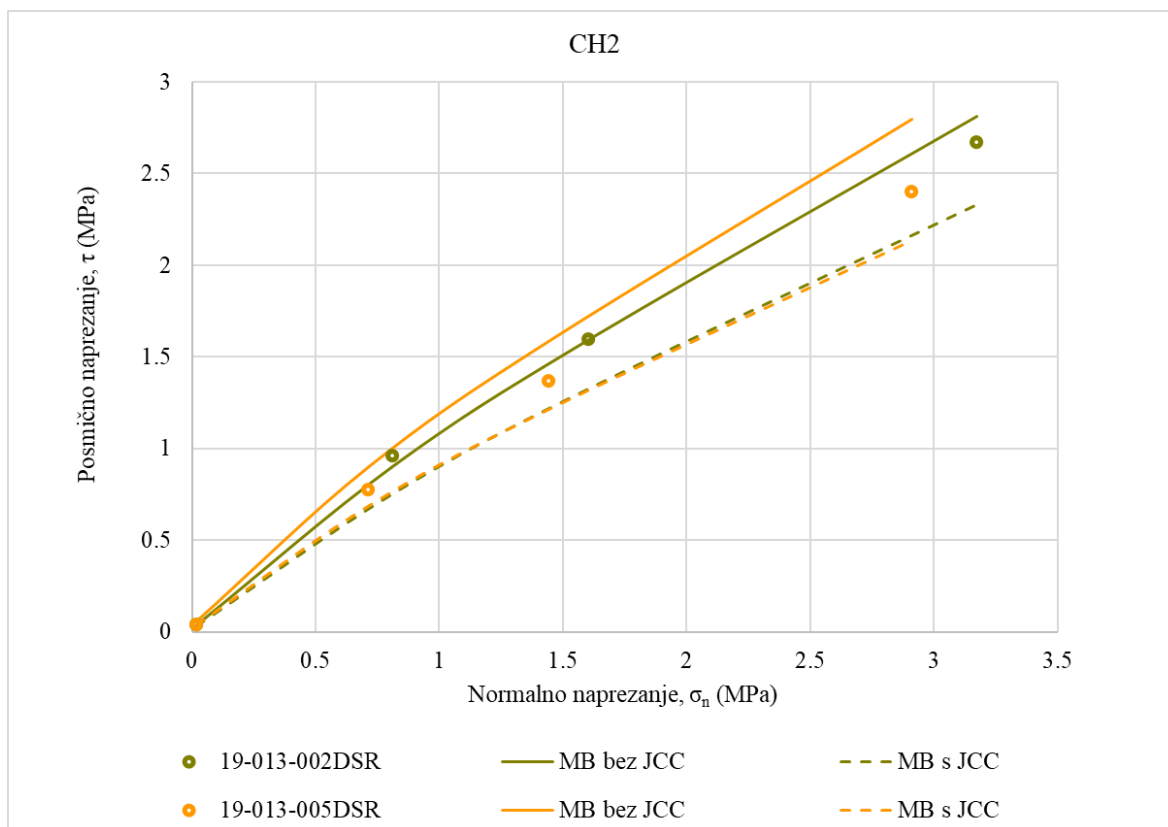
Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da inačica modela koji ne primjenjuje korekciju normalnog naprezanja primjenom koeficijenta *JCC* pokazuje u slučaju uzorka 19-013-001DSR idealno poklapanje, dok u slučaju uzorka 19-013-004DSR ona prilično precjenjuje vrijednosti posmične čvrstoće. Inačica modela koji koristi korekciju normalnog naprezanja u ovim se slučajevima pokazala kao ona koja bolje opisuje, odnosno procjenjuje posmičnu čvrstoću diskontinuiteta. Ovdje je važno istaknuti da slučaj diskontinuiteta bez ispune (MB bez JCC) predstavlja zapravo originalni Bartonov JRC-JCS model s obzirom na to da se u slučaju kada nema ispune koristi rezidualni kut trenja.

Istraživanja koja su proveli Singh i Basu su također pokazala da Bartonov JRC-JCS model u određenim situacijama može znatno precjenjivati vrijednosti posmične čvrstoće diskontinuiteta (Singh i Basu, 2018).

Za slučaj CH2, koji je zapravo stanje ispune od gline visoke plastičnosti (CH) uključujući zrna promjera < 2 mm u suhom stanju, rezultati su prikazani u tablici 5-3 i  $\sigma$ - $\tau$  dijagramom na slici 5-3.

**Tablica 5-3.** Rezultati izmjerenih i procijenjenih vrijednosti za slučaj CH2 – suha sitnozrna ispuna

Oznaka uzorka	$\varphi_{\text{rfb}}$ (°)	JRC (-)	JCS (MPa)	JCC (-)	$\sigma_n$ (MPa)	Izmjerena vršna posmična čvrstoća $\tau$ (MPa)	MB bez JCC $\tau$ (MPa)	MB s JCC $\tau$ (MPa)
19-013-002DSR	24,9	11,2	97,8	0,34	0,018	0,038	0,042	0,033
	24,9	11,2	97,8	0,34	0,813	0,961	0,907	0,755
	24,9	11,2	97,8	0,34	1,605	1,594	1,596	1,328
	24,9	11,2	97,8	0,34	3,174	2,671	2,811	2,331
19-013-005DSR	24,9	12,6	92,0	0,25	0,021	0,039	0,061	0,042
	24,9	12,6	92,0	0,25	0,714	0,773	0,899	0,688
	24,9	12,6	92,0	0,25	1,444	1,366	1,587	1,215
	24,9	12,6	92,0	0,25	2,909	2,399	2,795	2,133



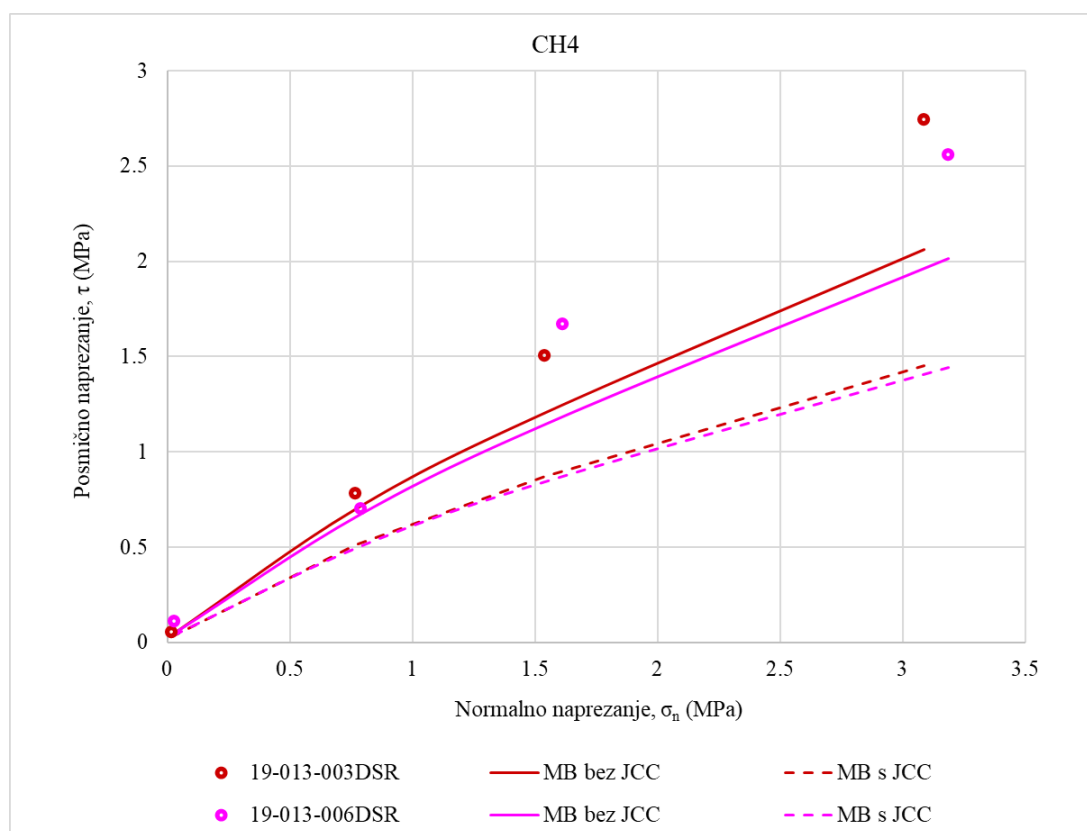
**Slika 5-3.**  $\sigma$ - $\tau$  dijagram za stanje CH2 – suha sitnozrna ispuna

Za stanje CH2 koje se odnosi ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) uključujući zrna promjera  $< 2$  mm u suhom stanju, vidljivo je relativno dobro preklapanje obe inačice modela s dobivenim vrijednostima ispitivanja posmične čvrstoće. Pritom je za prvi uzorak (19-013-002DSR) dobiveno izvrsno poklapanje vrijednosti s inačicom modela koji ne koristi korekciju naprežanja, odnosno inačicom modela koji koristi korekciju normalnih naprežanja dao je podcjenjujuće vrijednosti posmične čvrstoće. U slučaju drugog uzorka (19-013-005DSR) rezultati ispitivanja nalaze se između procijenjenih vrijednosti ovim inačicama modela.

Posljednje promatrano stanje ispune je CH4, gdje se ispuna sastoji od gline visoke plastičnosti (CH) uključujući zrna promjera  $< 6,3$  mm, pripremljena na vlažnost od 45 %, čije su izmjerene i procijenjene vrijednosti prikazane u tablici 5-4 i  $\sigma$ - $\tau$  dijagramom na slici 5-4.

**Tablica 5-4.** Rezultati izmjerenih i procijenjenih vrijednosti za stanje CH4 – vlažna ispuna s kršjem

Oznaka uzorka	$\phi_{\text{rfb}}$ (°)	JRC (-)	JCS (MPa)	JCC (-)	$\sigma_n$ (MPa)	Izmjerena vršna posmična čvrstoća $\tau$ (MPa)	MB bez JCC $\tau$ (MPa)	MB s JCC $\tau$ (MPa)
19-013-003DSR	12,6	14,2	94,6	0,25	0,018	0,053	0,040	0,028
	12,6	14,2	94,6	0,25	0,767	0,782	0,699	0,513
	12,6	14,2	94,6	0,25	1,541	1,505	1,206	0,871
	12,6	14,2	94,6	0,25	3,087	2,745	2,063	1,452
19-013-006DSR	12,6	13,5	90,5	0,26	0,029	0,110	0,050	0,037
	12,6	13,5	90,5	0,26	0,792	0,702	0,675	0,505
	12,6	13,5	90,5	0,26	1,614	1,670	1,184	0,871
	12,6	13,5	90,5	0,26	3,188	2,557	2,013	1,443



**Slika 5-4.**  $\sigma$ - $\tau$  dijagram za slučaj ispune CH4 – vlažna ispuna s kršjem



Primjena inačica modela za slučaj ispune CH<sub>4</sub> pokazala je da vrijednosti dobivene pomoću obje inačice modela značajnije podcjenjuju stvarne vrijednosti u području većih normalnih naprezanja. Naime, kako ovaj slučaj ispune predstavlja slučaj u kojem je korištena frakcija zrna sve do 6,3 mm uz povećanu vlažnost glinovitih čestica, na dobivene vrijednosti moguća su dva utjecaja. U prvom slučaju može se pretpostaviti da su većim izmjerenim vrijednostima doprinijela i zrna koja su bila u neposrednom kontaktu s hrapavim površinama stijenki diskontinuiteta, pri čemu su onda povećala otpor smicanju stijenki diskontinuiteta. U drugom slučaju moguće je i veće istiskivanje same ispune u području većih neravnina stijenki koje su bile u kontaktu, što se upravo dogodilo u slučaju CH<sub>3</sub> ispune.

S obzirom na to da su rezultati analize pokazali određeno preklapanje, odnosno podudaranje i nepodudaranje procijenjenih i izmjerenih vrijednosti, za općenitu primjenu postavljenog modela provedena je validacija primjenom regresijske analize i usporedbom s dobivenim rezultatima takvih analiza drugih modela.

### 5.3. Validacija modela primjenom regresijske analize

Pravac najbolje aproksimacije dobiva se metodom najmanjih kvadrata. Pri tome se 'kvadrat razlike' računa kao kvadrirana vrijednosti razlike između vrijednosti na pravcu korelacije i izmjerene vrijednosti.

Za mjeru pouzdanosti procjene modela služi standardna devijacija.

*RMS* je pozitivni drugi korijen iz varijance, naziva se *regresijska standardna devijacija* ili *standardna greška procjene* ili *standardna pogreška regresije*, a dana je izrazom:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{mea} - x_{est})^2} \quad 5-4$$

gdje su:

$n$  – broj mjerenja,

$x_{mea}$  – izmjerena vrijednost,

$x_{est}$  – procijenjena vrijednost.

*RMS* daje mjeru odstupanja pravca regresije od parova mjerenih i modelom procijenjenih vrijednosti. Procjena, odnosno model, će biti najbolji kada točke na pravcu regresije najmanje

odstupaju od parova vrijednosti dobivenih mjerenjem i proračunom. Budući da odstupanja od pravca mogu biti i pozitivne i negativne vrijednosti, da bi se izbjeglo njihovo poništavanje, vrijednosti se kvadriraju. Tako dobivena mjera odstupanja ovisila bi o broju podataka - broju mjerenja, odnosno iznos bi bio to veći što bi broj mjerenja bio veći. Zbog toga se ona dijeli s brojem podataka, čime se dobije aritmetička sredina koja je onda neosjetljiva u odnosu na broj mjerenja  $n$ .

Srednja apsolutna postotna pogreška ( $\sigma_{avg}$ ) je razlika stvarne vrijednosti, odnosno u ovom slučaju izmjerene vrijednosti, i modelom proračunate vrijednosti. Srednja apsolutna postotna pogreška dana je izrazom:

$$\sigma_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{mea} - x_{est}}{x_{mea}} \right| \times 100 \quad 5-5$$

gdje su:

$n$  – broj mjerenja,

$x_{mea}$  – izmjerena vrijednost,

$x_{est}$  – procijenjena vrijednost.

Udio odstupanja vrijednosti izračunat na taj način pretvori se u apsolutnu vrijednost kako bi se izbjeglo poništavanje pozitivnih i negativnih vrijednosti. Ukupna dobivena vrijednost zbrojenih vrijednosti pogreški dijeli se s brojem mjerenja kako bi se dobila prosječna vrijednost te se izražava u postotku.

Nagib regresijskog pravca ( $\widehat{B}$ ) može se izračunati na više načina. Jedan od njih je korištenjem standardnih devijacija  $x$  vrijednosti i  $y$  vrijednosti odnosno varijance  $S_{xx}$  i kovarijance  $S_{xy}$ . Ta formula proizlazi iz poznatih formula za račun koeficijenta korelacije. Nagib regresijskog pravca ( $\widehat{B}$ ) dan je izrazom:

$$\widehat{B} = \left( \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \right) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} \quad 5-6$$

gdje su:

$x_i$  – izmjerena vrijednost,

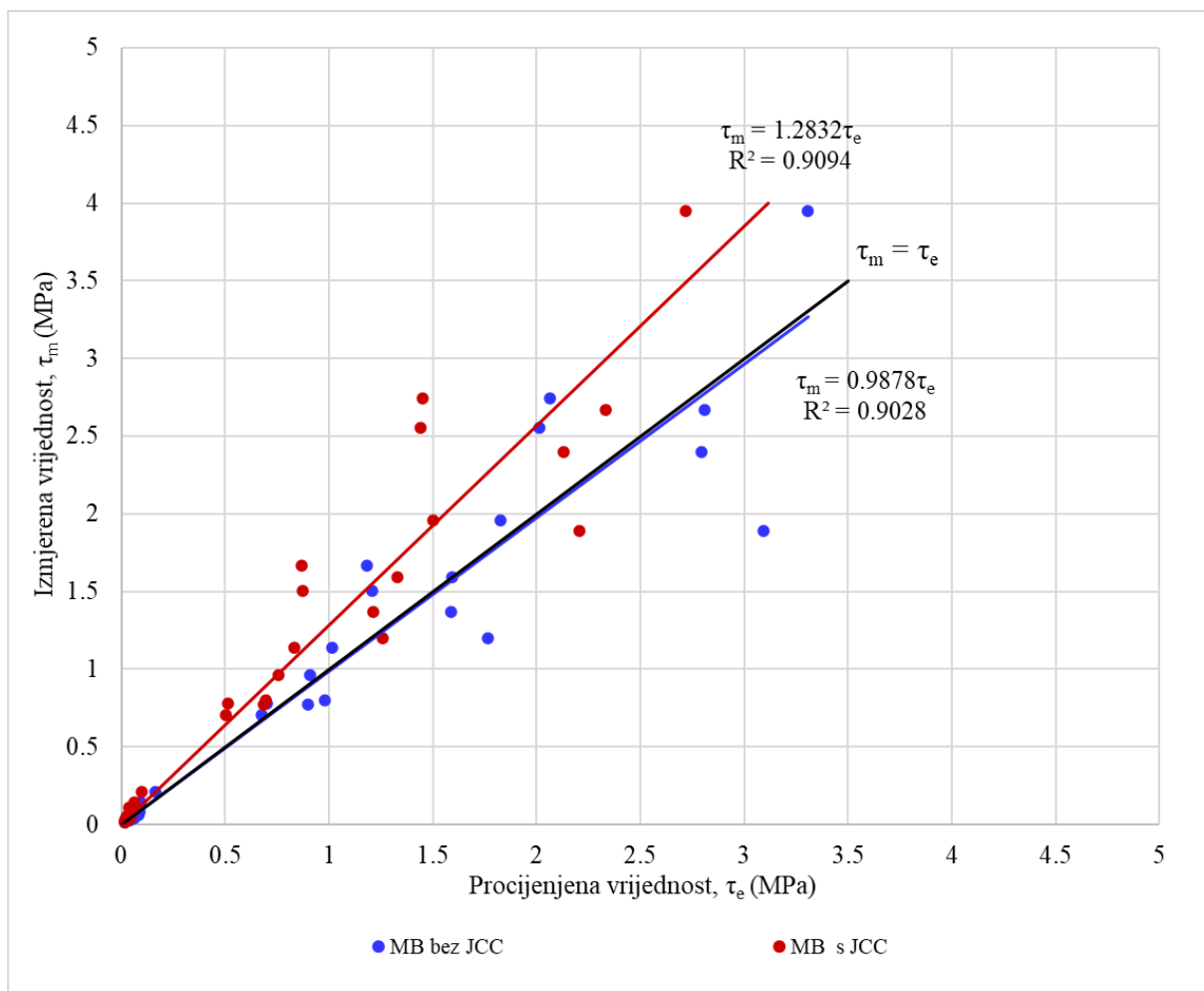
$y_i$  – procijenjena vrijednost.

Kovarijanca pokazuje koliko se dvije varijable mijenjaju zajedno.

Tako se vrijednost kovarijance razlikuje od vrijednosti varijance koja opisuje promjene u vrijednosti jedne varijable (njezino osciliranje oko srednje vrijednosti). Kovarijanca postaje sve više pozitivnom za svaki par vrijednosti koji se razlikuje od njihovih srednjih vrijednosti u istom smjeru (zajedničkom pozitivnom ili negativnom odstupanju od svojih aritmetičkih sredina), te postaje više negativna za svaki par vrijednosti koji se razlikuje od njihovih srednjih vrijednosti u suprotnim smjerovima (Pfaff, 2012).

Ocjena uspješnosti primjene modificiranog Bartonovog JRC-JCS modela provedena je regresijskom analizom za stanje bez ispune CH1, te za stanja s ispunom CH2 i CH4 pri čemu je korištena prosječna vrijednost *JRC*-a.

U prvom koraku ocjena je provedena za inačicu modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta koji je dan izrazom 5-1 (MB bez JCC) i za inačicu modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta koji je dan izrazom 5-3 (MB s JCC) uz prosječne vrijednosti *JRC*-a. Rezultati regresijske analize dani su dijagramima odnosa procijenjenih i izmjerenih vrijednosti koji su prikazani na slici 5-5 i u tablici 5-5.



**Slika 5-5.** Regresijska analiza rezultata izmjerene i procijenjene posmične čvrstoće diskontinuiteta s i bez ispune za prosječne vrijednosti JRC-a

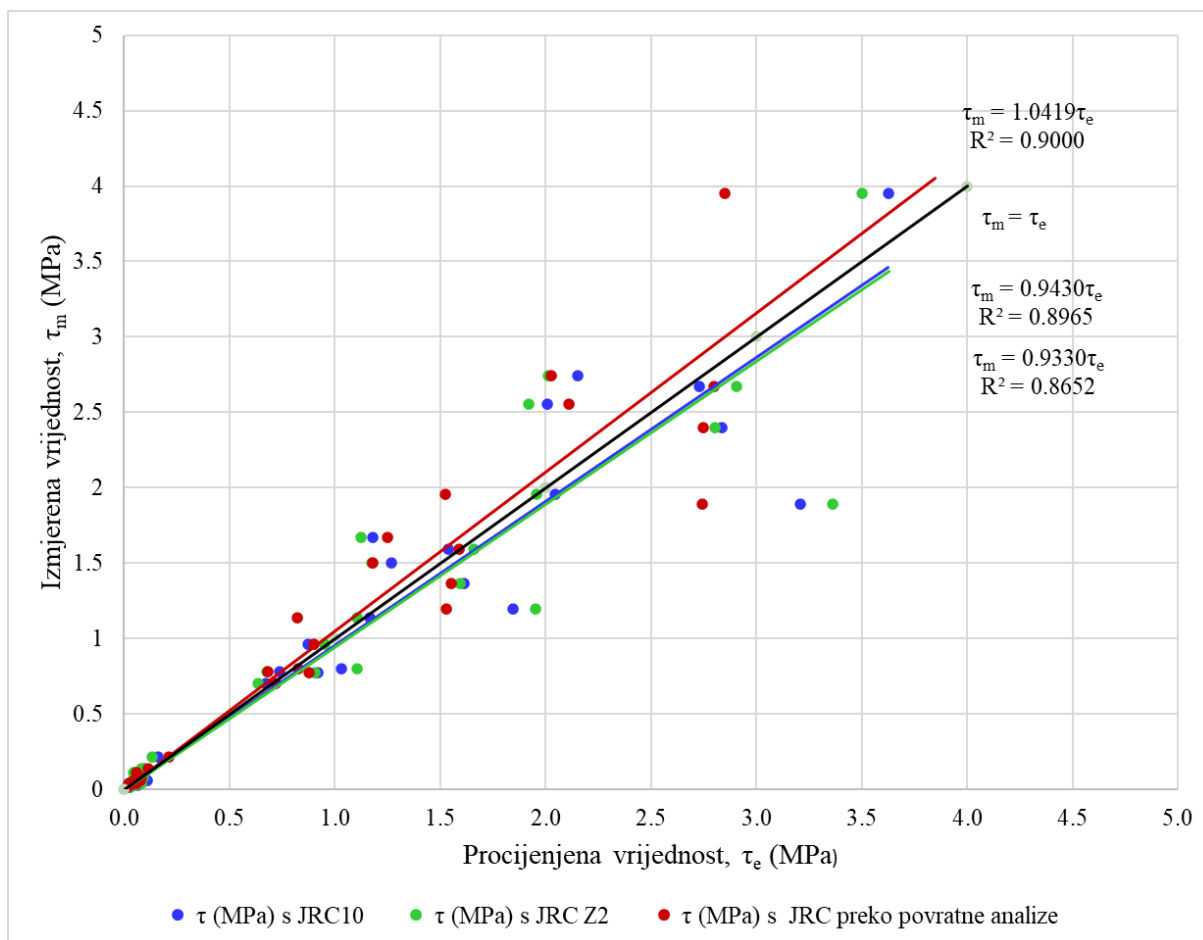
**Tablica 5-5.** Vrijednosti statističkih parametara za prosječne vrijednosti JRC-a

Predloženi model	$\sigma_{avg}$	RMS	$\hat{B}$	$R^2$
MB bez JCC	22,25	0,3202	0,9878	0,9028
MB s JCC	27,34	0,4265	1,2832	0,9094

Prema vrijednostima statističkih parametara, za obje inačice modela može se utvrditi da imaju jake korelacijske veze te da inačica modela koji koristi JCC u određenoj mjeri podcjenjuje rezultate posmične čvrstoće diskontinuiteta dok inačica modela koji ne koristi koeficijent JCC u određenoj mjeri precjenjuje rezultate.

Kako je ranije navedeno, analizom utjecaja parametara modela za procjenu posmične čvrstoće uočeno je da osim baznog kuta trenja hrapavost stijenki diskontinuiteta ima značajnu ulogu pri

procjeni posmične čvrstoće diskontinuiteta, zbog čega je provedena analiza modela ovisno o primjeni metode kojom je određen koeficijent hrapavosti  $JRC$ . Na slici 5-6 je prikazan dijagram odnosa procijenjenih i izmjerenih vrijednosti za inačicu modela koji ne koristi  $JCC$ , a ovisno o metodi kojom je određen  $JRC$ . Metoda određivanja hrapavosti preko amplitude nije bila predmetom analize s obzirom da se u ovom istraživanju pokazala ne primjenjivom. Naime izmjerene vrijednosti su prelazile iz područja dijagrama koji je predložen od strane Bartona (Barton i dr., 1982.) što je i prikazano na slici 4-11.



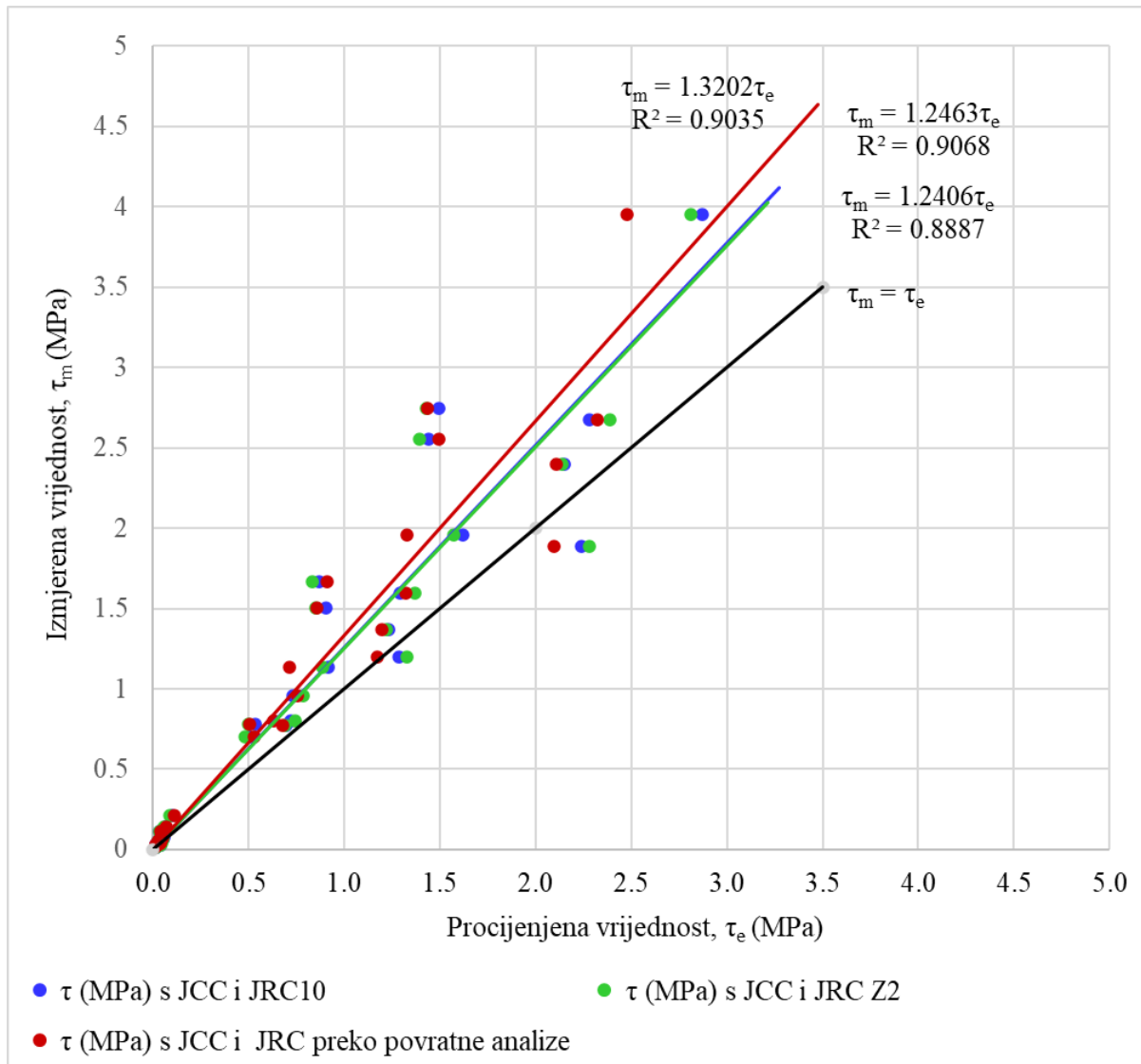
**Slika 5-6.** Regresijska analiza rezultata izmjerene i procijenjene posmične čvrstoće diskontinuiteta s i bez ispune prema izrazu 5-1 (MB bez JCC)

**Tablica 5-6.** Rezultati statističke analize za model dan izrazom 5-1 (MB bez JCC)

Predloženi model	$\sigma_{avg}$	RMS	$\hat{B}$	$R^2$
Primijenjen $JRC_{n10}$	28,20	0,3191	0,9430	0,8965
Primijenjen $JRC_{nZ2}$	29,68	0,3667	0,9330	0,8652
Primijenjen $JRC_{nBC}$	18,43	0,3181	1,0419	0,9000

Vezano uz primjenu koeficijenta hrapavosti diskontinuiteta *JRC*, rezultati regresijskih analiza modela pokazuju da su za slučajeve primjene koeficijenta hrapavosti koji su određeni preko statističkog parametra  $Z_2$  na temelju digitaliziranih profila te slučajeve primjene koeficijenta hrapavosti koji su određeni na temelju usporedbe sa standardnim profilima, dobivene nešto precijenjene vrijednosti posmičnih čvrstoća. Za razliku od primjene koeficijenta hrapavosti koji su određeni povratnim analizama kod kojih su dobivene nešto podcijenjene vrijednosti posmičnih čvrstoća. S obzirom na to da se vrijednosti koje su dobivene primjenom statističkog parametra  $Z_2$  i vrijednosti koje su dobivene usporedbom sa standardnim profilima gotovo poklapaju, može se zaključiti da su one jednakovrijedne.

Nadalje, ocjena uspješnosti postavljenog modela za procjenu posmične čvrstoće danog izrazom 5-3, dakle modelom koji sadrži parametar *JCC*, provedena je također regresijskom analizom čiji su rezultati prikazani dijagramom na slici 5-7 te tablicom 5-7.



**Slika 5-7.** Regresijska analiza rezultata izmjerene i procijenjene posmične čvrstoće diskontinuiteta s i bez ispune prema izrazu 5-3 (MB s JCC)

**Tablica 5-7.** Rezultati statističke analize za model dan izrazom 5-3 (MB s JCC)

Predloženi model	$\sigma_{avg}$	RMS	$\hat{B}$	$R^2$
Primijenjen JRC <sub>n10</sub>	27,03	0,4064	1,2463	0,9068
Primijenjen JRC <sub>nZ2</sub>	26,86	0,4248	1,2406	0,8887
Primijenjen JRC <sub>nBC</sub>	30,37	0,4525	1,3202	0,9035

Rezultati analize su pokazali da primjena koeficijenta *JCC* u svim slučajevima primjene *JRC*-a daje podcijenjene vrijednosti. S obzirom na to da je *JCC* u ovom istraživanju određen primjenom filma za profiliranje, tako da su kao mjerodavne vrijednosti kontakata uzeta područja koja su ukazivala da je ostvareno više od 75% intenziteta traga koji je ostao na filmu,

proširenjem područja kontakata preko kontrolnog parametra intenziteta traga koji je ostao na filmu (na pr. umanjenje s 75% na oko 60%) procijenjene vrijednosti posmične čvrstoće diskontinuiteta bi se još više približile izmjerenim vrijednostima.

S obzirom na vrijednosti koeficijenta determinacije možemo konstatirati da su za sva tri slučaja, a ovisno o primijenjenom načinu određivanja *JRC*-a, ostvarene jake korelacijske veze. Također, obzirom na vrijednosti ostalih statističkih parametara, može se konstatirati da je predloženi model u velikoj mjeri prihvatljiv.

Naime, statistički parametri (*RMS*,  $\sigma_{avg}$ ,  $\hat{B}$ ,  $R^2$ ), kojima se ocjenjuje uspješnost primjene određenog modela, pokazali su dobru primjenjivost modela u usporedbi s dobivenim parametrima ocjene uspješnosti ostalih modela koje su u svom radu prikazali Singh i Basu (Singh i Basu, 2018).

Za većinu modela prikazanih u 2. poglavlju ovog rada spomenuti autori su dobili raspone vrijednosti za srednju apsolutnu postotnu pogrešku,  $\sigma_{avg}$  od 10,0 do 192,68, za regresijsku standardnu devijaciju *RMS* od 0,085 do 1,444 te za nagib regresijskog pravca,  $\hat{B}$ , vrijednosti od 0,35 do 1,31, dok je koeficijent determinacije  $R^2$  iznosio od 0,82 do 0,93.

Pritom treba posebno napomenuti da su se sve te vrijednosti ocjene primjenjivosti odnosile isključivo na modele za procjenu posmičnih čvrstoća diskontinuiteta bez ispuna. Prema tome, može se konstatirati da bi predloženi model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta s i bez ispune, razvijenog u ovom radu kao modifikacija i proširenje Bartonovog *JRC*-*JCS* modela (izrazi 5-1 i 5-3), mogao biti prihvatljiv u inženjerskoj primjeni u slučajevima kada ostali uvjeti diskontinuiteta i ispune odgovaraju uvjetima u ovom istraživanju.



## 6. ZAKLJUČAK

Istraživanja koja su prikazana u doktorskom radu utemeljena su na potrebi za postavljanjem jedinstvenog modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta s materijalom i bez materijala ispune u masivnim i okršenim vapnencima. Karakteristični primjer takve potrebe i takvih stijena upravo je ležište arhitektonsko-građevnog kamena Kanfanar-jug u Istri na kojem su provedena terenska istraživanja i na čijim su uzorcima provedena detaljna laboratorijska ispitivanja. Određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta pokazalo se važnim u određivanju stabilnosti prostorija tijekom podzemne eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena. Potreba utvrđivanja modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta među ostalim je uvjetovana otežanom, gotovo nemogućom provedbom terenskih ispitivanja posmične čvrstoće, ali i otežanom provedbom laboratorijskih ispitivanja u redovitim okolnostima zbog troškova, trajanja te teškog pribavljanja dostatnog broja uzoraka.

Ležište arhitektonsko-građevnog kamena Kanfanar-jug karakteristično je upravo zbog diskontinuiteta koji imaju velike nepravilne i hrapave stijenske s izraženim neravninama i u velikom i u malom mjerilu promatranja. Osim toga koji mogu biti bez ispune ili u većini slučajeva s materijalom ispune, koji se može naći u različitim stanjima konzistencije.

Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u dvije inačice, koji je postavljen u doktorskom radu temeljen je na Bartonovu empirijskom JRC-JCS modelu koji kao ključne parametre upotrebljava koeficijent hrapavosti pukotina  $JRC$ , tlačnu čvrstoću stijenki pukotina  $JCS$  i rezidualni kut trenja  $\varphi_r$  te na zapažanjima pojedinih autora vezanim uz pojavu znatnog smanjenja posmične čvrstoće dodavanjem čak i tankog sloja materijala ispune (Indraratna i Haque, 2001).

Provedbom terenskih ispitivanja uočeno je da se hrapavost stijenki diskontinuiteta ne može odrediti usporedbom sa standardnim profilima hrapavosti, kao što su to preporučili Barton i Choubey (Barton i Choubey, 1977), zbog čega se javila potreba za prijedlogom proširenja standardnih profila hrapavosti. Od 120 izmjerenih profila hrapavosti više od 50 profila karakterizirale su izrazito velike neravnine, odnosno neuobičajene vrijednosti u odnosu na one koje su opisane dosad objavljenim preporučenim metodama. Važno je napomenuti da su takve nepravilnosti, odnosno neravnine stijenki diskontinuiteta upravo posljedica procesa okršavanja.

Također, u mnogim objavljenim radovima u kojima se izlaže problematika određivanja hrapavosti nisu u dovoljnoj mjeri spominjane, odnosno rijetko su spominjane značajke takvih diskontinuiteta, a općenito manji broj istraživanja odnosio se na karbonatne, posebno okršene stijene. Iz navedenih razloga, a u svrhu potpunijeg određivanja  $JRC_{10}$  vrijednosti, predloženi su, odnosno dopunjeni su tipični profili hrapavosti u 10-centimetarskoj duljini. To proširenje učinjeno je na osnovi izmjerenih vrijednosti  $JRC$ -a na terenu i na laboratorijskim uzorcima prijedlogom dodatnih pet karakterističnih profila za raspone vrijednosti  $JRC$ -a od 20 do 30, kao standardnih profila hrapavosti koji su prikazani na slici 4-9. Predloženi profili validirani su tako što je određena hrapavost stijenci diskontinuiteta na temelju izrađenih profila digitalnom fotogrametrijom preko statističkog parametra  $Z_2$ , pri čemu su dobivene praktički jednake vrijednosti. Uz navedeno primijenjena je i metoda određivanja hrapavosti mjerenjem amplitude hrapavosti koja se u ovom slučaju nije pokazala primjenjivom s obzirom na to da su izmjerene vrijednosti hrapavosti izlazile iz područja predloženog dijagrama što je i prikazano na slici 4-11.

Nadalje, vezano za pojavu smanjenja posmične čvrstoće zbog prisutnosti tankog sloja ispune, provedena su ispitivanja kuta trenja koja su uključivala i ispunu ugrađenu između ispiljenih ploha uzoraka na kojima se prethodno provelo određivanje baznog kuta trenja. Ispitivanje je provedeno pokusom klizanja naginjanjem i u uređaju za izravni posmik u CNL uvjetima. Ispitivanjem u CNL uvjetima uočeno je da se ispuna djelomično komprimira, a djelomično istiskuje, ovisno o stupnju vlažnosti. Također je uočeno da su za stanja ispune CH3 (ispuna od gline visoke plastičnosti (CH) uključujući zrna promjera  $< 0,4$  mm, pripremljena na vlažnost granice tečenja od 70 %) i CH4 (ispuna od gline visoke plastičnosti (CH) uključujući zrna promjera  $< 6,3$  mm, pripremljena na vlažnost od 45 %) dobivene gotovo iste vrijednosti kuta trenja s ugrađenom ispunom u CNL uvjetima. Vrijednosti su iznosile  $12,0^\circ$  za stanje ispune CH3, odnosno  $12,6^\circ$  za stanje ispune CH4. S obzirom na to da su oba stanja podvrgnuta visokim normalnim naprezanjima (do 3 MPa), frakcija zrna veličine manje od 6,3 mm koja je bila prisutna kod stanja CH4 usitnjena je usred normalnog naprezanja te su oba stanja dala rezultate očekivane za zrna promjera manjeg od 0,4 mm i visoke vlažnosti (45% i 70%). Upravo takva normalna opterećenja zapravo realnije simuliraju uvjete u ležištu. Preporučuje se da se taj postupak ispitivanja upotrebljava pri određivanju baznog kuta trenja kao i kuta trenja s ugrađenom ispunom. Vrijednost izmjerenog kuta trenja s ugrađenom ispunom nije bazni kut trenja, nego je riječ o trenju ugrađene ispune između ispiljenih ploha stijene, za taj parametar uvedena je posebna oznaka,  $\varphi_{fb}$ .

Uz navedeno uočeno je da stijenke osobito okršenijih diskontinuiteta u manjoj mjeri ostvaruju stvarne kontakte što uzrokuje preraspodjelu normalnih naprezanja samo na određene točke kontakta, te normalna naprezanja treba korigirati. Zbog toga su provedena mjerenja površina kontakata nasuprotnih stijenci diskontinuiteta. Budući da to nije standardizirano ispitivanje, primijenjen je film za profiliranje koji je izvedbom namijenjen upravo uskim i neravnomjernim površinama. Rezultat je iskazan koeficijentom kontakta pukotine *JCC*.

Prije postavljanja modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta provedena je parametarska analiza Bartonova *JRC-JCS* modela kojom je utvrđeno da na procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta najviše utječu rezidualni kut trenja i koeficijent hrapavosti diskontinuiteta. S obzirom na to da se u inženjerskoj praksi bazni kut trenja često procjenjivao na osnovu podataka iz literature, provedena parametarska analiza ukazuje na važnost njegova mjerenja jer je upravo taj parametar (uz *JRC*) onaj koji najviše doprinosi konačnom rezultatu posmične čvrstoće diskontinuiteta.

Na temelju provedenih ispitivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta i uočenih mehanizama ponašanja pri smicanju za stijenke diskontinuiteta s ispunom i bez ispune modificiran je Bartonov *JRC-JCS* model. Pri tome, uočeni mehanizmi se prvenstveno odnose na smanjenje posmične čvrstoće uz prisustvo ispune. Zatim se odnose na mehanizam istiskivanja ispune pri čemu je evidentno da ispune, veće od dva do tri milimetra, ne utječu dodatno na smanjenje posmičnih čvrstoća. Važno je napomenuti da ispitivanja posmične čvrstoće diskontinuiteta s ugrađenim ispunama pokazuju povećanu kompresibilnost, a smanjenu dilativnost, za razliku od ispitivanja posmične čvrstoće bez ispuna koja su pokazala znatno manju kompresibilnost, ali veću dilativnost.

Modifikacija Bartonovog *JRC-JCS* modela je učinjena tako da je umjesto baznog, odnosno rezidualnog kuta trenja, primijenjen kut trenja ugrađene ispune dobiven ispitivanjima u *CNL* uvjetima u uređaju za direktni posmik. Pritom je normalno naprezanje koje pridonosi posmičnoj čvrstoći korigirano koeficijentom kontakta pukotine *JCC*.

U uređaju za izravni posmik velikih uzoraka provedena su ispitivanja na prirodnim uzorcima kamena s prirodnim ispunama u stanjima konzistencije koje su približno simulirale granične uvjete u ležištu. Pri tome treba naglasiti da je ispuna prirodan materijal uzorkovan u ležištu a sastoji se od gline visoke plastičnosti kojoj je dominantan mineral kaolinit. Izmjerene vrijednosti posmične čvrstoće diskontinuiteta su uspoređene s vrijednostima koje su

procijenjene primjenom postavljenog modela, pri čemu je u jednom slučaju upotrijebljena korekcija normalnog napreznja *JCC* koeficijentom, dok u drugom nije.

Ocjena uspješnosti primjene modificiranog Bartonovog JRC-JCS modela provedena je regresijskom analizom. Prema vrijednostima statističkih parametara za obe inačice modela može se utvrditi da imaju jake korelacijske veze te da inačica modela koji upotrebljava *JCC* u određenoj mjeri podcjenjuje rezultate posmične čvrstoće diskontinuiteta, dok inačica modela koji ne upotrebljava koeficijent *JCC* u određenoj mjeri precjenjuje rezultate.

Vežano na primjenu *JCC*-a, a s obzirom na to da su u ovom istraživanju kao mjerodavne vrijednosti prisutnosti kontakata nasuprotnih stijenki, uzeta područja koja su ukazivala da je ostvareno više od 75% intenziteta boje traga koji je ostao na filmu, u daljnjim istraživanjima preporuča se proširenje područja kontakata preko kontrolnog parametra intenziteta boje traga. Procijenjene vrijednosti posmične čvrstoće diskontinuiteta primjenom inačice modela, MB s *JCC*, tako bi se još više približile izmjerenim vrijednostima.

Također se pokazalo da, matematički gledano, upravo tako postavljen model, u kojem je primjenjena logaritama odnosa čvrstoće stijenki diskontinuiteta i normalnog napreznja, najbolje opisuje posmičnu čvrstoću diskontinuiteta.

S obzirom na to da su modeli koje su dosad predložili brojni autori (Patton, 1966; Barton, 1973; Barton i Choubey, 1977; Zhao, 1997; Grasselli i Egger, 2003; Grasselli i Tatone, 2011; i dr.) u većini slučajeva nastali ispitivanjima na umjetno proizvedenim diskontinuitetima s pravilnim hrapavostima, koji nisu sadržavali ispunu, predloženi model u ovom radu uzima u obzir ispunu, to više ima značaj što je nastao na osnovi ispitivanja na prirodnim uzorcima kamena s prirodnim diskontinuitetima te s prirodnim materijalom ispune. Analizom statističkih parametara za predloženi model i njegove inačice utvrđen je visok stupanj korelacijskih veza, zbog čega se mogu smatrati pouzdanim za primjenu u inženjerskoj praksi u masivnim vapnencima. U skladu s time, kao mogući smjer daljnjih istraživanja, predlaže se istraživanje mogućnosti primjene modela i u drugim vrstama stijena.

Na kraju se može zaključiti da je ostvaren cilj ovog istraživanja i da su postignuti očekivani znanstveni doprinosi koji se mogu sažeti:

- 1) Postavljen je modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta s ispunom i bez ispune u masivnim i okršenim vapnencima.

- 2) Određen je i kvantificiran utjecaj ispune na smanjenje posmične čvrstoće diskontinuiteta, pri čemu je predloženo uvođenje parametra koji predstavlja kut trenja ugrađene ispune između ispiljenih ploha uzoraka stijene,  $\varphi_{fb}$ .
- 3) Modificirana je metoda određivanja koeficijenta hrapavosti pukotina *JRC* tako što je predloženo proširenje standardnih profila hrapavosti s profilima koje naznačuju vrijednosti *JRC*-a u rasponu od 20 do 30.

## **LITERATURA**

Abolfazli, M., Fahimifar, A. (2020): An investigation on the correlation between the joint roughness coefficient (JRC) and joint roughness parameters. *Construction and Building Materials*, 259, 1-17.

ASTM D 3080/3080M-11 Standard test method for direct shear test under consolidated drained conditions

Alejano, L.R., Muralha, J., Ulusay, R., Li, C.C., Perez-Rey, I., Karakul, H., Chryssanthakis, P., Aydan, O. (2018): ISRM Suggested method for determining the basic friction angle of planar rock surfaces by means of tilt tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 3853-3859.

Aydan, O., Shimizu, Y. Kawamoto, T. (1996): The anisotropy of surface morphology characteristic of rock discontinuities. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29, 47-59.

Aydin, A. (2009): ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 46, 627-634.

Bandis, S., Lumsden, A.C., Barton, N. (1981): Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 18, 1-21.

Barton, N. (1973): Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, 7, 287-332.

Barton, N. (1982): Modelling rock joint behavior from in situ block tests: Implications for nuclear waste repository design. ONWI-308, Columbus, OH, 96.

Barton, N., Bandis, S. (1982): Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. 23rd U.S. Symposium on Rock Mechanics, Berkeley, CA, 739-760.

Barton, N., Choubey, V. (1977): The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10, 1-54.

Bae, J D., Kim, K., Koh, Y., Kim, J. (2011) Characterization of joint roughness in granite by applying the scan circle technique to images from a borehole televiewer, *Rock.Mech. Rock Eng.* 44 497–504.

Carr, J.R., Warriner, J.B. (1989) Relationship between the fractal dimension and joint roughness coefficient, *Bull. Assoc. Eng. Geol.* 26, 253–264.

Chaddock, R. E. (1925), *Principles and Methods of Statistics*“(1st Edition), Houghton Mifflin Company, The Riverside Press, Cambridge.

Cotman, I. (2006): Glavni rudarski projekt podzemne eksploatacije – tipski. Kamen d.d. Pazin.

Cotman, I., Vujes, S. (1998): Planiranje i početna iskustva podzemnog otkopavanja arhitektonsko-građevnog kamena u Istri. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 10, 63-72.

Ghazvinian, A.H., Azinfar, M.J., Vaneghi, R.G. (2012): Importance of tensile strength on the shear behaviour of discontinuities. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 349-359.

Gradiški, K., Mulabdić, M., Minažek, K. (2017): Selected results of determining the friction interaction coefficient between crushed stone and polyester strip. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geological-Petroleum Engineering Bulletin)*, 32 (4), 37-43.

Grasselli, G., Egger, P. (2003): Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 40, 25-40.

HRN EN ISO 17892-3:2016 Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 3: Determination of particle density (ISO 17892-3:2015; EN ISO 17892-3:2015)

HRN EN ISO 17892-4:2016 Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 4: Determination of particle size distribution (ISO 17892-4:2016; EN ISO 17892-4:2016)

HRN EN ISO 17892-12:2018 Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 12: Determination of liquid and plastic limits (ISO 17892-12:2018; EN ISO 17892-12:2018)

Hrženjak, P., Dobrilović, I. and Navratil, D. (2019): Problemi određivanja značajki stijenki karakterističnih diskontinuiteta u kršu (The problems of determining walls features of

characteristic discontinuities in karts). 8th Conference of Croatian Geotechnical Society and ISRM Specialised Conference, 211-217, 470 p. (in Croatian with English abstract)

Hrženjak, P., Jaguljnjak-Lazarević, A., Briševac, Z. (2014): Istraživanje stabilnosti podzemnih prostorija kamenoloma arhitektonsko-građevnog kamena na eksploatacijskom polju "Kanfanar-jug" (Investigation of the stability of the underground rooms of the dimension stone quarry on the exploitation field "Kanfanar-south"). Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu. (in Croatian, unpublished)

Indraratna, B., Haque, A. (2000): Shear behaviour of rock joints. A.A. Balkema, Rotterdam.

ISRM (1978) Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geotechnical Abstracts, 15, 319-368

Jang, H.S., Jang, B.A. (2015): New method for shear strength determination of unfilled, unweathered rock joint. Rock Mechanics and Rock Engineering, 48, 1515-1534.

Jang, H.S., Kang, S.S., Jang, B.A. (2014): Determination of joint roughness coefficients using roughness parameters. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47, 2061-2073.

Jia, H.Q. (2011) Experimental Research on Joint Surface State and the Characteristics of Shear Failure, Central South University, p. 86.

Jing, I., Nordlund, E., Stephansson, O. (1992): An experimental study on the anisotropy and stress-dependency of strength and deformability of rock joints. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 29, 535-542.

Kulatilake, P.H.S.W., Shou, G., Huang, T.H., Morgan, R.M. (1995): New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 32, 673-697.

Lee, Y.K., Park, J.W., Song, J.J. (2014): Model for the shear behaviour of rock joints under CNL and CNS conditions. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 70, 252-263.

Matičec, D., Fuček, L., Paleniki, D., Oštrić, N. (2013): Geološka karta i tumač geološke karte Istarske županije. Arhitektonsko-građevni kamen. U: Miko, S., Kruk, B., Dedić, Ž., Kruk, L.J.,



- Peh, Z., Kovačević-Galović, E. and Gabrić, A. (2013): Rudarsko-geološka studija potencijala i gospodarenja mineralnim sirovinama Istarske županije. Hrvatski geološki institut, Zagreb
- Maerz, N., Franklin, J., Bennett, C. (1990) Joint roughness measurement using shadow profilometry, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 27, 329–343.
- Muralha, J., Grasselli, G., Tatone, B., Blumel, M., Chryssaanthakis, P., Yujing, J. (2014): ISRM Suggested methods for laboratory determination of the shear strength of rock joints: Revised version. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 291-302.
- Navratil, D. (2011): Statistički model osnovnih geometrijskih značajki diskontinuiteta u mezozojskim karbonatnim stijinama (Statistical model of the basic geometric features of discontinuities in mesozoic carbonate rocks). Ph.D. Thesis. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Pfaff, S. (2012): Osnove statistike. Udžbenik Sveučilišta u Zagrebu.
- Patton, F. D. (1966): Multiple modes of shear failure in rock. 1.st Congress ISRM Lisbon, 1, 509-513.
- Schultz, L. G. (1964): Quantitative interpretation of mineralogical composition from X-ray and chemical data for the Pierre Shale., USGS Professional Paper, 391-C, 31.
- Singh, H.K., Basu, A. (2018): Evaluation of existing criteria in estimating shear strength of natural rock discontinuities. *Engineering Geology*, 232, 171-181.
- Tang, Z.C., Wong, I.N.Y. (2016): New criterion for evaluating the peak shear strength of rock joints under different contact states. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 1191-1199.
- Tang, Z.C., Liu, Q.S. Huang, J.H. (2014): New criterion for rock joints based on three-dimensional roughness parameters. *Journal of Central South University*, 21, 4653-4659.
- Tatone, B.S.A, Grasselli, G. (2009): A method to evaluate the three-dimensional roughness of fracture surfaces in brittle geomaterials. *Review of Scientific Instruments*, 80, 1-10.
- Tatone, B.S.A., Grasselli, G (2010): A new 2D discontinuity roughness parameter and its correlation with JRC. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 47 (8), 1391-1400.

Tatone, B.S.A., Grasselli, G. (2013): An Investigation of Discontinuity Roughness Scale Dependency Using High-Resolution Surface Measurements. *Rock Mech Rock Eng* 46, 657–681.

Tišljar, J. (2001) *Sedimentologija karbonata i evaporita*. Zagreb, Institut za geološka istraživanja.

Tse, R, Cruden, D.M. (1979): Estimating joint roughness coefficients. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 16, 303-307.

Vrkljan, D., Velić, J., Dunda, S., Kujundžić, T., Rajković, D, Karasalihović, D., Krejči, M., Škrlec, V. (2007): *Studija potreba i opravdanosti eksploatacije mineralnih sirovina na prostoru Istarske županije*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

Xu, J H.F., Li, Y.R., Liu, X.Y. (2002) Fractal simulation of joint profiles and relationship between JRC and fractal dimension, *Chin. J. Rock Mech. Eng.* 21 (11),1663–1666.

Yang, Z.Y., Lo, S.C., Di, C.C. (2001): Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using Z2. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 34 (3), 243-251.

Yu, X. Vayssade. (1991) Joint profiles and their roughness parameters, *Int. J. Rock Mech. Min. Sct. Geomech. Abstr.* 28(4) 333–336.

Zhao, J. (1997): Joint surface matching and shear strength part B: JRC-JMC shear strength criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 34, 179-185.

#### INTERNET STRANICE:

<https://www.controls-group.com>

<https://www.kamen.hr/hr/kamenolomi/kanfanar/>

<https://www.sensorprod.com/surface-profiler-film/>

## Popis tablica

Tablica 2-1. <i>Prikaz podataka o ispitnim uzorcima kojim se Patton koristio u laboratorijskim ispitivanjima</i> .....	7
Tablica 2-2. <i>Pregled modela za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta</i> .....	22
Tablica 2-3. <i>Kronološki pregled korelacijski funkcija prema statističkim parametrima</i> .....	27
Tablica 2-4. <i>Chaddockova skala jakosti veza (Chaddock, 1925)</i> .....	28
Tablica 3-1. <i>Izmjerene vrijednosti orijentacije i koeficijenta hrapavosti na slojnoj plohi</i> .....	37
Tablica 3-2. <i>Izmjerene vrijednosti orijentacije i koeficijenta hrapavosti na prvom sustavu diskontinuiteta</i> .....	39
Tablica 3-3. <i>Izmjerene vrijednosti orijentacije i koeficijenta hrapavosti na drugom sustavu diskontinuiteta</i> .....	41
Tablica 4-1. <i>Rezultati izmjerenog baznog kuta trenja</i> .....	49
Tablica 4-2. <i>Rezultati jednoosne JCS-a</i> .....	53
Tablica 4-3. <i>Primjer određivanja JRC-a pomoću statističkog parametra <math>Z_2</math></i> .....	58
Tablica 4-4. <i>Rezultati ispitivanja upotrijebljeni za povratnu analizu određivanja JRC-a</i> .....	60
Tablica 4-5. <i>Rezultati provedenih korekcija i povratnih analiza za vrijednosti koeficijenata hrapavosti</i> .....	61
Tablica 4-6. <i>Opis zijeva diskontinuiteta (ISRM, 1978)</i> .....	62
Tablica 4-7. <i>Rezultati srednjih vrijednosti izmjerenog zijeva</i> .....	63
Tablica 4-8. <i>Izmjerene vrijednosti JCC-a</i> .....	65
Tablica 4-9. <i>Rezultati granulometrijske analize uzorka ispune</i> .....	67
Tablica 4-10. <i>Rezultati određivanja plastičnih stanja</i> .....	68
Tablica 4-11. <i>Rezultati prametara posmične čvrstoće uzorka ispune</i> .....	73
Tablica 4-12. <i>Rezultati kuta trenja s ugrađenom ispunom dobiveni pokusom klizanja naginjanjem</i> .....	75
Tablica 4-13. <i>Rezultati ispitivanja kuta unutarnjeg trenja s ugrađenom ispunom</i> .....	77
Tablica 4-14. <i>Rezultati izmjerenih vrijednosti za stanje ispune CH1 – bez ispune</i> .....	84
Tablica 4-15. <i>Rezultati izmjerenih vrijednosti za stanje ispune CH2 – suha sitnozrna ispuna</i>	84
Tablica 4-16. <i>Rezultati izmjerenih vrijednosti za stanje ispune CH4 – vlažna ispuna s kršjem</i> .....	85
Tablica 5-1. <i>Rezultati parametarske analize Bartonovog modela</i> .....	88
Tablica 5-2. <i>Rezultati izmjerenih i procijenjenih vrijednosti za slučaj CH1 - bez ispune</i> .....	93

Tablica 5-3. Rezultati izmjerenih i procijenjenih vrijednosti za slučaj CH2 – suha sitnozrna ispuna .....	94
Tablica 5-4. Rezultati izmjerenih i procijenjenih vrijednosti za stanje CH4 – vlažna ispuna s kršjem .....	96
Tablica 5-5. Vrijednosti statističkih parametara za prosječne vrijednosti JRC-a .....	100
Tablica 5-6. Rezultati statističke analize za model dan izrazom 5-1 (MB bez JCC).....	101
Tablica 5-7. Rezultati statističke analize za model dan izrazom 5-3 (MB s JCC) .....	103

## Popis slika

Slika 1-1. <i>Plan istraživanja</i> .....	3
Slika 2-1. <i>Grafički prikaz Pattonovih rezultata ispitivanja, 1. dio (Patton, 1966)</i> .....	8
Slika 2-2. <i>Grafički prikaz Pattonovih rezultata ispitivanja, 2. dio (Patton, 1966)</i> .....	8
Slika 2-3. <i>Pattonov bilinearni model smicanja (Patton, 1966)</i> .....	9
Slika 2-4. <i>Bartonova preliminarna klasifikacija hrapavosti (Barton, 1973)</i> .....	11
Slika 2-5. <i>Opis hrapavosti u Q klasifikaciji</i> .....	13
Slika 2-6. <i>Standardni profili hrapavosti pukotine i pripadne JRC vrijednosti (Barton i Choubey, 1977)</i> .....	14
Slika 2-7. <i>Određivanje amplitude hrapavosti (Barton i Bandis, 1982)</i> .....	17
Slika 2-8. <i>Određivanje JRC-a iz amplitude hrapavosti (Barton i Bandis, 1982)</i> .....	17
Slika 2-9. <i>Zhaov prijedlog određivanja JMC-a (Zhao, 1997)</i> .....	18
Slika 2-10. <i>Geometrijska identifikacija površine diskontinuiteta (Grasselli i Egger, 2003)</i> ...	19
Slika 3-1. <i>Geografski položaj eksploatacijskog polja Kanfanar-jug (preuzeto s <a href="https://www.google.com/earth/">https://www.google.com/earth/</a>)</i> .....	29
Slika 3-2. <i>Naslage ležišta na čelu radilišta</i> .....	31
Slika 3-3. <i>Mjerenje amplitude hrapavosti</i> .....	32
Slika 3-4. <i>Mjerenje zijeve na terenu</i> .....	33
Slika 3-5. <i>Lančana sjekačica u podzemnom radu (preuzeto sa <a href="https://www.kamen.hr/hr/kamenolomi/kanfanar/">https://www.kamen.hr/hr/kamenolomi/kanfanar/</a>)</i> .....	34
Slika 3-6. <i>Lokacija snimanja PS-1/20</i> .....	35
Slika 3-7. <i>Lokacija snimanja PS-2/20</i> .....	36
Slika 3-8. <i>Strukturni dijagram prosječnih orijentacija po kutu mjerenja i pripadajućih polova za slojnu plohu</i> .....	38
Slika 3-9. <i>Dijagram raspodjela vrijednosti JRC<sub>10</sub> za slojnu plohu</i> .....	38
Slika 3-10. <i>Strukturni dijagram prosječnih orijentacija po kutu mjerenja i pripadajućih polova za prvi sustav diskontinuiteta</i> .....	40
Slika 3-11. <i>Dijagram raspodjela vrijednosti JRC<sub>10</sub> za prvi sustav diskontinuiteta</i> .....	40
Slika 3-12. <i>Strukturni dijagram prosječnih orijentacija po kutu mjerenja i pripadajućih polova za drugi sustav diskontinuiteta</i> .....	42
Slika 3-13. <i>Dijagram raspodjela vrijednosti JRC<sub>10</sub> za drugi sustav diskontinuiteta</i> .....	42

Slika 4-1. <i>Mogućnosti određivanja baznog kuta trenja pokusom klizanja naginjanjem (Alejano i dr., 2018)</i> .....	46
Slika 4-2. <i>Shema uvjeta maksimalnog pomaka i kuta klizanja (Alejano i dr., 2018)</i> .....	47
Slika 4-3. <i>Priručni uređaj za pokus klizanja naginjanjem u Geomehaničkom laboratoriju na RGNF-u</i> .....	48
Slika 4-4. <i>Ispitivanje baznog kuta trenja u uređaju za izravni posmik velikih uzoraka</i> .....	50
Slika 4-5. <i>Pravac čvrstoće za stanje CH1</i> .....	51
Slika 4-6. <i>Schmidov čekić (lijevi dio slike preuzet sa stranice <a href="https://www.controls-group.com">https://www.controls-group.com</a>)</i> .....	52
Slika 4-7. <i>Uzorak s iscrtanim profilima za određivanje hrapavosti diskontinuiteta</i> .....	54
Slika 4-8. <i>Iscrtani profili hrapavosti diskontinuiteta</i> .....	54
Slika 4-9. <i>Prijedlog proširenja standardnih profila hrapavosti diskontinuiteta</i> .....	56
Slika 4-10. <i>Digitalna fotogrametrija</i> .....	57
Slika 4-11. <i>Prikaz vrijednosti JRC-a izmjerenih na uzorcima u laboratoriju</i> .....	59
Slika 4-12. <i>Mjerenje zijeve</i> .....	62
Slika 4-13. <i>Otisak kontakata stijenki diskontinuiteta na SPA filmu</i> .....	63
Slika 4-14. <i>Graf s opisom intenziteta pritiska na film (preuzeto s <a href="https://www.sensorprod.com/surface-profiler-film/">https://www.sensorprod.com/surface-profiler-film/</a>)</i> .....	64
Slika 4-15. <i>Mjerenje površina s pomoću softvera Image Vectorizer</i> .....	65
Slika 4-16. <i>Oprema za granulometrijsku analizu (preuzeto s <a href="https://www.controls-group.com">https://www.controls-group.com</a>)</i> .....	66
Slika 4-17. <i>Casagrandeov uređaj (preuzeto s <a href="https://www.controls-group.com">https://www.controls-group.com</a>)</i> .....	67
Slika 4-18. <i>Rendgenski difraktometar Hrvatskog geološkog instituta</i> .....	69
Slika 4-19. <i>Difraktogram dobiven snimanjem cjelokupnog uzorka. Ca – kalцит, Ch – klorit, Gb – gibbsit, Gt – getit, Hm – hematit, Kl – kaolinit, Qtz – kvarc, ? – nepoznati mineral</i> .....	70
Slika 4-20. <i>Uređaj za izravni posmik (preuzeto s <a href="https://www.controls-group.com">https://www.controls-group.com</a>)</i> .....	71
Slika 4-21. <i>Prikaz rezultata ispitivanja izravnim posmikom</i> .....	72
Slika 4-22. <i>Pokus klizanja naginjanjem</i> .....	74
Slika 4-23. <i>Dijagram izmjerenih kutova trenja pokusom klizanja naginjanjem</i> .....	76
Slika 4-24. <i>Ispitivanja kuta trenja s ugrađenom ispunom u uređaju za izravni posmik</i> .....	77
Slika 4-25. <i>Rezultati mjerenja kuta trenja s ugrađenom ispunom u uređaju za izravni posmik</i> .....	78
Slika 4-26. <i>Izgled ispune u stanju CH4 nakon ispitivanja u uređaju za izravni posmik</i> .....	79

---

Slika 4-27. Uređaj za izravni posmik velikih uzoraka .....	80
Slika 4-28. Istiskivanje ispune na granici tečenja.....	86
Slika 5-1. Shematski prikaz redukcije površina diskontinuiteta pri smicanju s obzirom na hrapavost .....	91
Slika 5-2. $\sigma$ - $\tau$ dijagram za stanje CH1 – bez ispune.....	93
Slika 5-3. $\sigma$ - $\tau$ dijagram za stanje CH2 – suha sitnozrna ispuna .....	95
Slika 5-4. $\sigma$ - $\tau$ dijagram za slučaj ispune CH4 – vlažna ispuna s kršjem.....	96
Slika 5-5. Regresijska analiza rezultata izmjerene i procijenjene posmične čvrstoće diskontinuiteta s i bez ispune za prosječne vrijednosti JRC-a .....	100
Slika 5-6. Regresijska analiza rezultata izmjerene i procijenjene posmične čvrstoće diskontinuiteta s i bez ispune prema izrazu 5-1 (MB bez JCC).....	101
Slika 5-7. Regresijska analiza rezultata izmjerene i procijenjene posmične čvrstoće diskontinuiteta s i bez ispune prema izrazu 5-3 (MB s JCC) .....	103

## **Popis priloga**

**Prilog 1. REZULTATI ISPITIVANJA BAZNOG KUTA TRENJA**

**Prilog 2. REZULTATI MJERENJA HRAPAVOSTI DISKONTINUITETA**

**Prilog 3. REZULTATI ISPITIVANJA MATERIJALA ISPUNE**

**Prilog 4. REZULTATI ISPITIVANJA KUTA TRENJA S UGRAĐENOM ISPUNOM**

**Prilog 5. REZULTATI ISPITIVANJA POSMIČNE ČVRSTOĆE DISKONTINUITETA  
S ISPUNOM I BEZ ISPUNE**



**Prilog 1. REZULTATI ISPITIVANJA BAZNOG KUTA TRENJA**



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU baznog kuta trenja

(strana 1/1)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 28. 09. 2020.

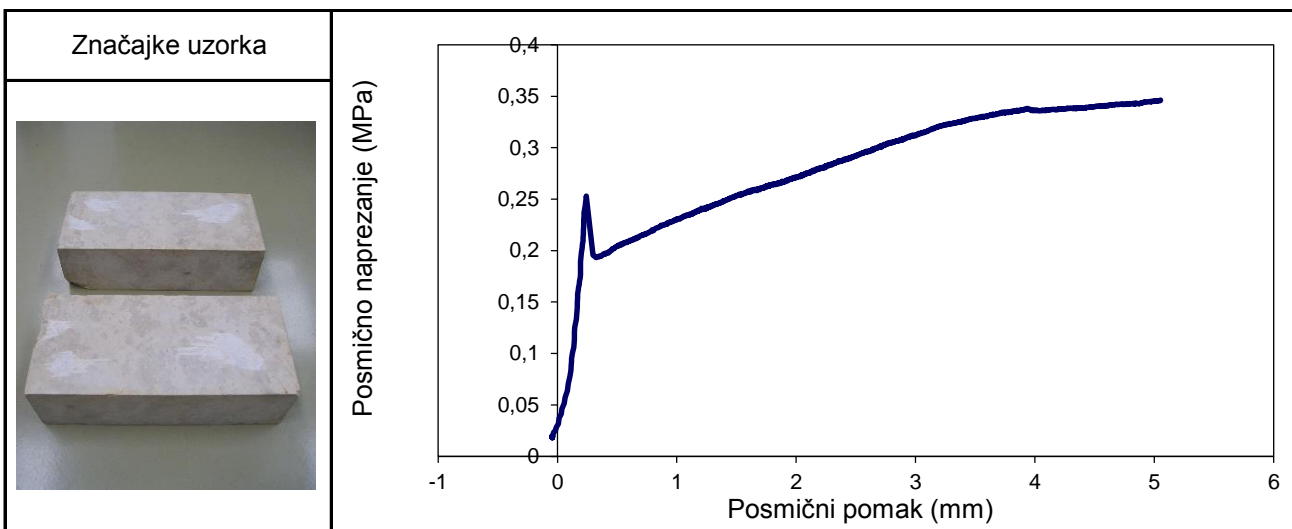
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakter. uzorka: Uzorak vapnenca s ispijenom plohom bez ispune

Lab. broj: 19-013-007 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,2	195,7	2626		



Normalno naprezanje $\sigma_n$	Posmična čvrstoća $\tau$	Bazni kut trenja $\varphi_b$
<b>0,741</b> MPa	<b>0,346</b> MPa	<b>25,0</b> °

Brzina smicanja 0,44 mm/min

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 29. 09. 2020.

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditelj odjela:
Dr. sc. Petar Hrženjak	19-013-007DSR-BFA-1-1 29. 09. 2020.	Dr. sc. Petar Hrženjak



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU baznog kuta trenja

(strana 1/1)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 28. 09. 2020.

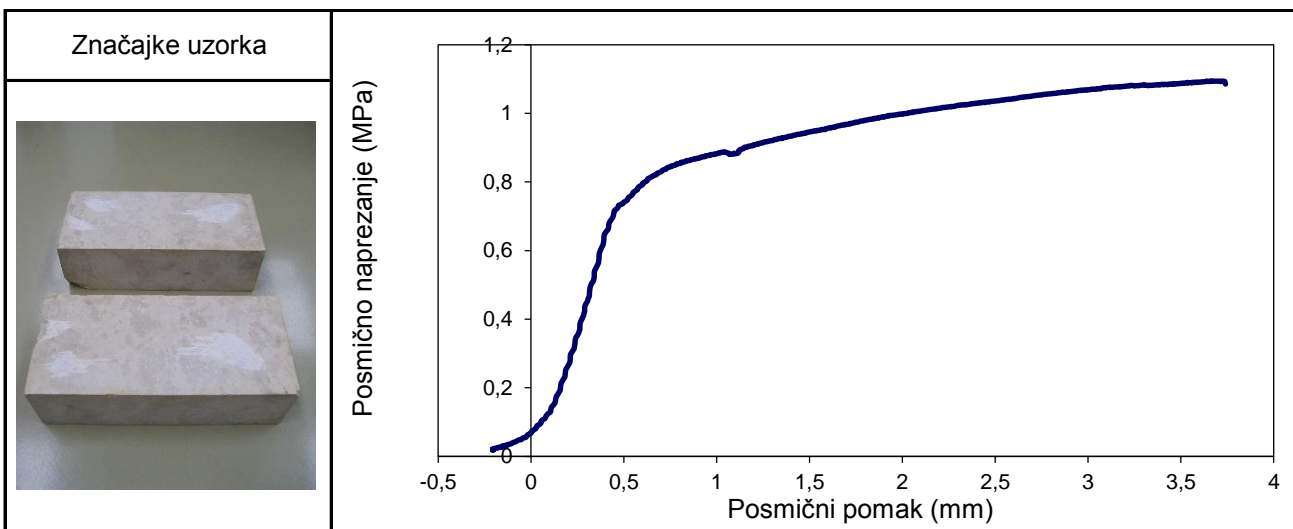
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakter. uzorka: Uzorak vapnenca s ispijenom plohom bez ispune

Lab. broj: 19-013-007 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,2	195,7	2626		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>1,490</b> MPa	Posmična čvrstoća $\tau$ <b>1,095</b> MPa	Bazni kut trenja $\varphi_b$ <b>36,3</b> °
--	--	---

Brzina smicanja 0,63 mm/min

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 29. 09. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-007DSR-BFA-1-2 29. 09. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU baznog kuta trenja

(strana 1/1)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 28. 09. 2020.

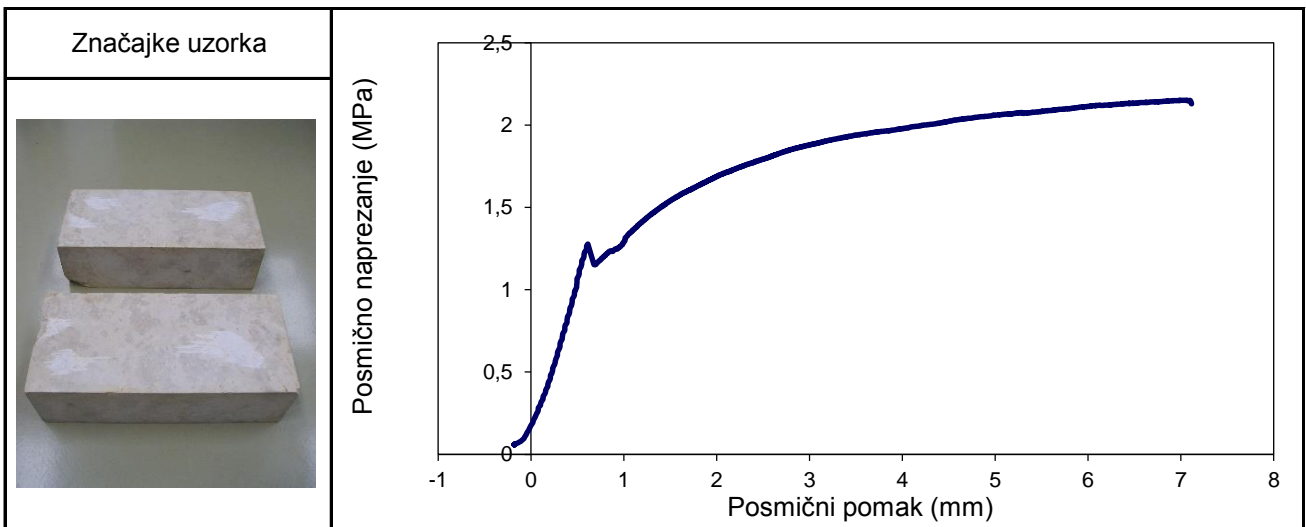
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i  
karak. uzorka: Uzorak vapnenca s ispijenom plohom bez ispune

Lab. broj: 19-013-007 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,2	195,7	2626		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>2,995</b> MPa	Posmična čvrstoća $\tau$ <b>2,151</b> MPa	Bazni kut trenja $\varphi_b$ <b>35,7</b> °
--	--	---

Brzina smicanja 0,52 mm/min

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 29. 09. 2020.

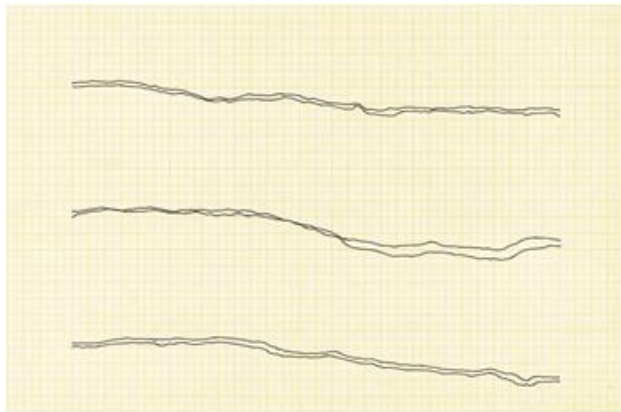
Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-007DSR-BFA-1-3 29. 09. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--

**Prilog 2. REZULTATI MJERENJA HRAPAVOSTI DISKONTINUITETA**

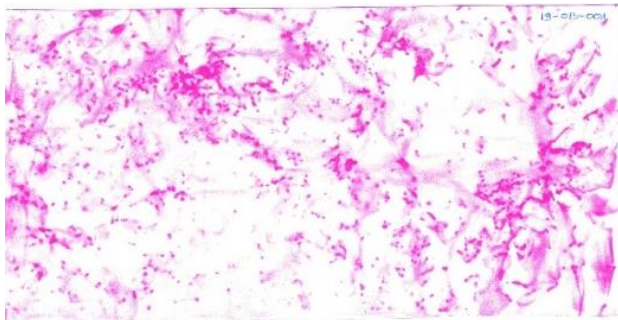
Oznaka uzorka: 19-013-001



Uzorak sa ucrtanim profilima



Ucrtani profili uzorka



Otisak kontakata stijenci na SPA filmu

Izmjerene vrijednosti:

Visina (mm): 391.1  
 Širina (mm): 150.3  
 Dužina (mm): 300.0  
 Masa (g): 45321

Oznaka profila		JRC <sub>10</sub>	JRC <sub>n10</sub>	min JRC <sub>n10</sub>	$\bar{x}$
1	g	20	12.9	12.9	11.7
	d	20	12.9		
2	g	20	12.9	12.9	
	d	20	12.9		
3	g	12	9.2	9.2	
	d	12	9.2		
Oznaka profila		JRC <sub>10(Z<sub>2</sub>)</sub>	JRC <sub>nZ2</sub>	min JRC <sub>nZ2</sub>	$\bar{x}$
1	g	14.8	10.7	10.7	11.0
	d	16.2	11.3		
2	g	16.3	11.4	11.4	
	d	18.1	12.2		
3	g	15.0	10.8	10.8	
	d	18.5	12.3		
Oznaka profila		Amplituda (mm)	JRC <sub>n</sub>	min JRC <sub>n</sub>	$\bar{x}$
1	g	14	18	18	15.7
	d	16	24		
2	g	15	19	19	
	d	19	26		
3	g	9	12	10	
	d	7	10		

Ukupna površina diskontinuiteta (mm<sup>2</sup>): 45225

Ukupna površina kontakta (mm<sup>2</sup>): 12211

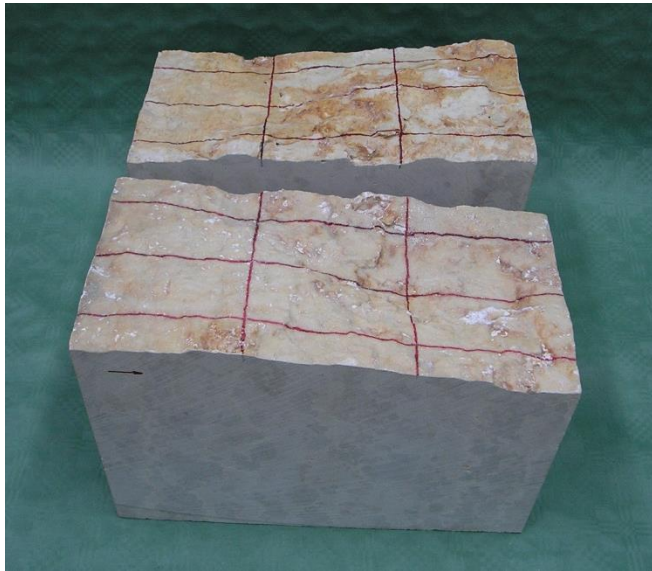
JCC (-): 0.27

Raspon vrijednosti zijeve (mm): 1 do 7

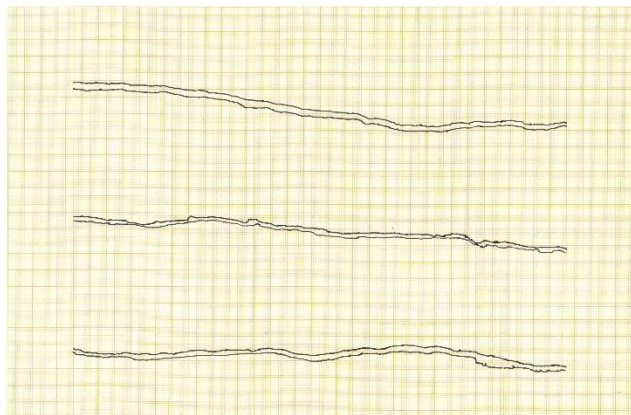
Srednja vrijednost zijeve (mm): 2.6

Oznaka uzorka: 19-013-002

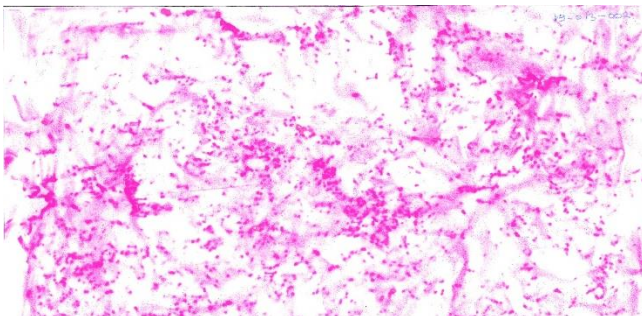
Izmjerene vrijednosti:



Uzorak sa ucrtanim profilima



Ucrtani profili uzorka



Otisak kontakata stijenki na SPA filmu

Visina (mm): 383,5  
 Širina (mm): 150,3  
 Dužina (mm): 300,5  
 Masa (g): 45359

Oznaka profila		JRC <sub>10</sub>	JRC <sub>n10</sub>	min JRC <sub>n10</sub>	$\bar{x}$
1	g	16	11.3	11.3	10.6
	d	20	12.9		
2	g	14	10.3	10.3	
	d	14	10.3		
3	g	16	11.3	10.3	
	d	14	10.3		
Oznaka profila		JRC <sub>10(Z<sub>2</sub>)</sub>	JRC <sub>nZ2</sub>	min JRC <sub>nZ2</sub>	$\bar{x}$
1	g	17.8	12.0	12.0	11.8
	d	22.3	13.7		
2	g	18.2	12.2	12.2	
	d	22.4	13.7		
3	g	16.1	11.3	12.3	
	d	24.5	14.3		
Oznaka profila		Amplituda (mm)	JRC <sub>n</sub>	min JRC <sub>n</sub>	$\bar{x}$
1	g	13	18	16	14.0
	d	12	16		
2	g	6	10	10	
	d	7	10		
3	g	13	16	16	
	d	12	16		

Ukupna površina diskontinuiteta (mm<sup>2</sup>): 45210

Ukupna površina kontakta (mm<sup>2</sup>): 12207

JCC (-): 0.34

Raspon vrijednosti zijeva (mm): 1 do 7

Srednja vrijednost zijeva (mm): 2.8

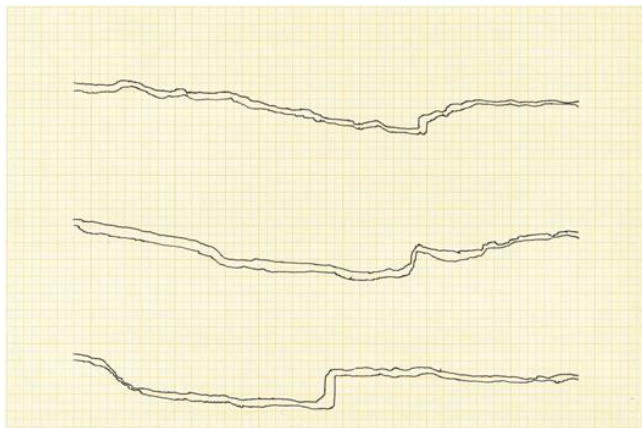
Oznaka uzorka: 19-013-003

Izmjerene vrijednosti:

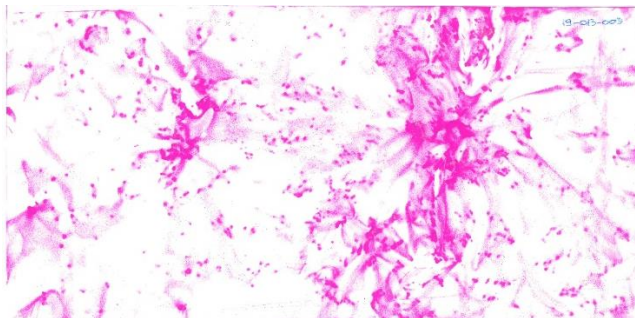


Uzorak sa ucrtanim profilima

Visina (mm): 383,9  
 Širina (mm): 150,6  
 Dužina (mm): 300,4  
 Masa (g): 45203



Ucrtani profili uzorka



Otisak kontakata stijenki na SPA filmu

Oznaka profila		JRC <sub>10</sub>	JRC <sub>n10</sub>	min JRC <sub>n10</sub>	$\bar{x}$
1	g	30	15.5	15.5	15.0
	d	30	15.5		
2	g	26	14.7	14.7	
	d	26	14.7		
3	g	26	14.7	14.7	
	d	26	14.7		
Oznaka profila		JRC <sub>10(Z<sub>2</sub>)</sub>	JRC <sub>nZ2</sub>	min JRC <sub>nZ2</sub>	$\bar{x}$
1	g	26.0	14.7	14.7	13.8
	d	26.5	14.8		
2	g	22.4	13.7	13.7	
	d	29.2	15.4		
3	g	20.6	13.1	13.1	
	d	20.8	13.2		
Oznaka profila		Amplituda (mm)	JRC <sub>n</sub>	min JRC <sub>n</sub>	$\bar{x}$
1	g	43	38	30	29.0
	d	24	30		
2	g	36	35	31	
	d	28	31		
3	g	24	30	26	
	d	20	26		

Ukupna površina diskontinuiteta (mm<sup>2</sup>): 45165


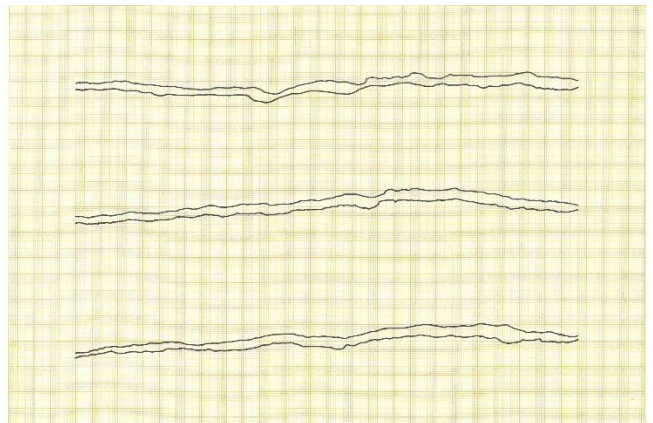
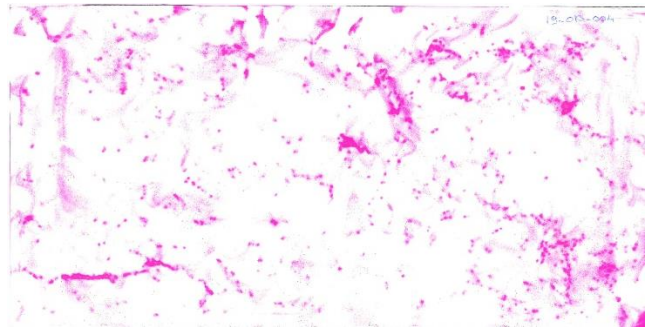
Ukupna površina kontakta (mm<sup>2</sup>): 12195

JCC (-): 0.25

Raspon vrijednosti zijeva (mm): 1 do 10

Srednja vrijednost zijeva (mm): 3.5



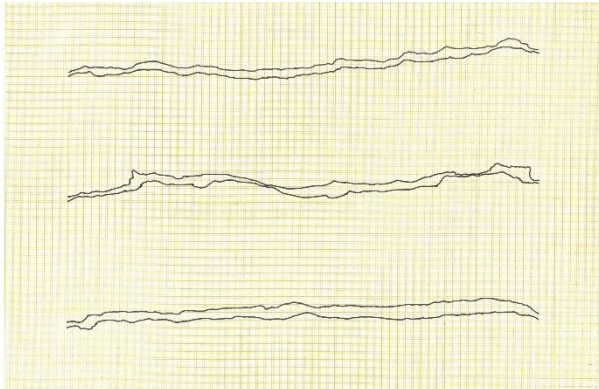
Oznaka uzorka: 19-013-004		Izmjerene vrijednosti:				
		Visina (mm): 278,6 Širina (mm): 150,3 Dužina (mm): 300,0 Masa (g): 32800				
		Oznaka profila	JRC <sub>10</sub>	JRC <sub>n10</sub>	min JRC <sub>n10</sub>	$\bar{x}$
1	g	16	11.3	11.3	11.5	
	d	20	12.9			
2	g	18	12.1	12.1		
	d	18	12.1			
3	g	16	11.3	11.3		
	d	16	11.3			
Oznaka profila	JRC <sub>10(Z<sub>2</sub>)</sub>	JRC <sub>nZ2</sub>	min JRC <sub>nZ2</sub>	$\bar{x}$		
1	g	19.2	12.6	12.4	12.4	
	d	18.6	12.4			
2	g	18.4	12.3	12.3		
	d	18.4	12.3			
3	g	19.4	12.7	12.6		
	d	19.3	12.6			
Oznaka profila	Amplituda (mm)	JRC <sub>n</sub>	min JRC <sub>n</sub>	$\bar{x}$		
1	g	10	14	14	15.3	
	d	12	16			
2	g	12	16	16		
	d	16	24			
3	g	12	16	16		
	d	12	16			
		Ukupna površina diskontinuiteta (mm <sup>2</sup> ): 45120 Ukupna površina kontakta (mm <sup>2</sup> ): 5866 JCC (-): 0.13 Raspon vrijednosti zijeva (mm): 2 do 8 Srednja vrijednost zijeva (mm): 4.8				
		Otisak kontakata stijenki na SPA filmu				

Oznaka uzorka: 19-013-005

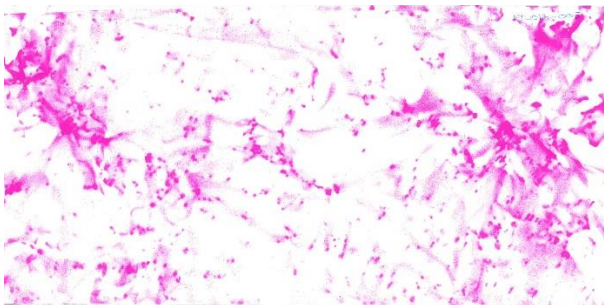
Izmjerene vrijednosti:



Uzorak sa ucrtanim profilima



Ucrtani profili uzorka



Otisak kontakata stijenki na SPA filmu

Visina (mm): 277,9  
 Širina (mm): 150,2  
 Dužina (mm): 299,9  
 Masa (g): 32689

Oznaka profila		JRC <sub>10</sub>	JRC <sub>n10</sub>	min JRC <sub>n10</sub>	$\bar{x}$
1	g	20	12.9	12.9	12.9
	d	20	12.9		
2	g	20	12.9	12.9	
	d	20	12.9		
3	g	20	12.9	12.9	
	d	20	12.9		
Oznaka profila		JRC <sub>10(Z<sub>2</sub>)</sub>	JRC <sub>nZ2</sub>	min JRC <sub>nZ2</sub>	$\bar{x}$
1	g	18.9	12.5	12.5	12.7
	d	26.0	14.7		
2	g	22.9	13.8	13.8	
	d	28.3	15.2		
3	g	17.5	11.9	11.9	
	d	24.2	14.2		
Oznaka profila		Amplituda (mm)	JRC <sub>n</sub>	min JRC <sub>n</sub>	$\bar{x}$
1	g	12	16	10	16.7
	d	6	10		
2	g	16	24	24	
	d	17	25		
3	g	12	16	16	
	d	11	16		

Ukupna površina diskontinuiteta (mm<sup>2</sup>): 45045

Ukupna površina kontakta (mm<sup>2</sup>): 11261

JCC (-): 0.25

Raspon vrijednosti zijeva (mm): 1 do 10

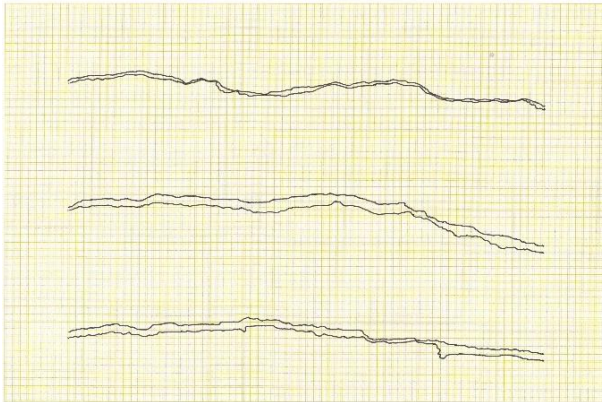
Srednja vrijednost zijeva (mm): 5.5

Oznaka uzorka: 19-013-006

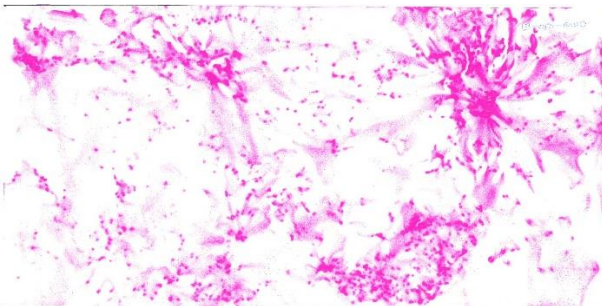
Izmjerene vrijednosti:



Uzorak sa ucrtanim profilima



Ucrtani profili uzorka



Otisak kontakata stijenki na SPA filmu

Visina (mm): 279,4  
Širina (mm): 150,4  
Dužina (mm): 300,1  
Masa (g): 32824

Oznaka profila		JRC <sub>10</sub>	JRC <sub>n10</sub>	min JRC <sub>n10</sub>	$\bar{x}$
1	g	20	12.9	12.9	13.5
	d	26	14.7		
2	g	24	14.2	14.2	
	d	24	14.2		
3	g	22	13.6	13.6	
	d	22	13.6		
Oznaka profila		JRC <sub>10(Z<sub>2</sub>)</sub>	JRC <sub>nZ2</sub>	min JRC <sub>nZ2</sub>	$\bar{x}$
1	g	19.3	12.6	12.6	12.7
	d	31.0	15.7		
2	g	20.0	12.9	12.9	
	d	28.9	15.3		
3	g	19.3	12.6	12.6	
	d	19.3	12.6		
Oznaka profila		Amplituda (mm)	JRC <sub>n</sub>	min JRC <sub>n</sub>	$\bar{x}$
1	g	14	18	18	23.7
	d	20	26		
2	g	23	29	29	
	d	36	35		
3	g	17	25	24	
	d	16	24		

Ukupna površina diskontinuiteta (mm<sup>2</sup>): 45225

Ukupna površina kontakta (mm<sup>2</sup>): 11759

JCC (-): 0.26

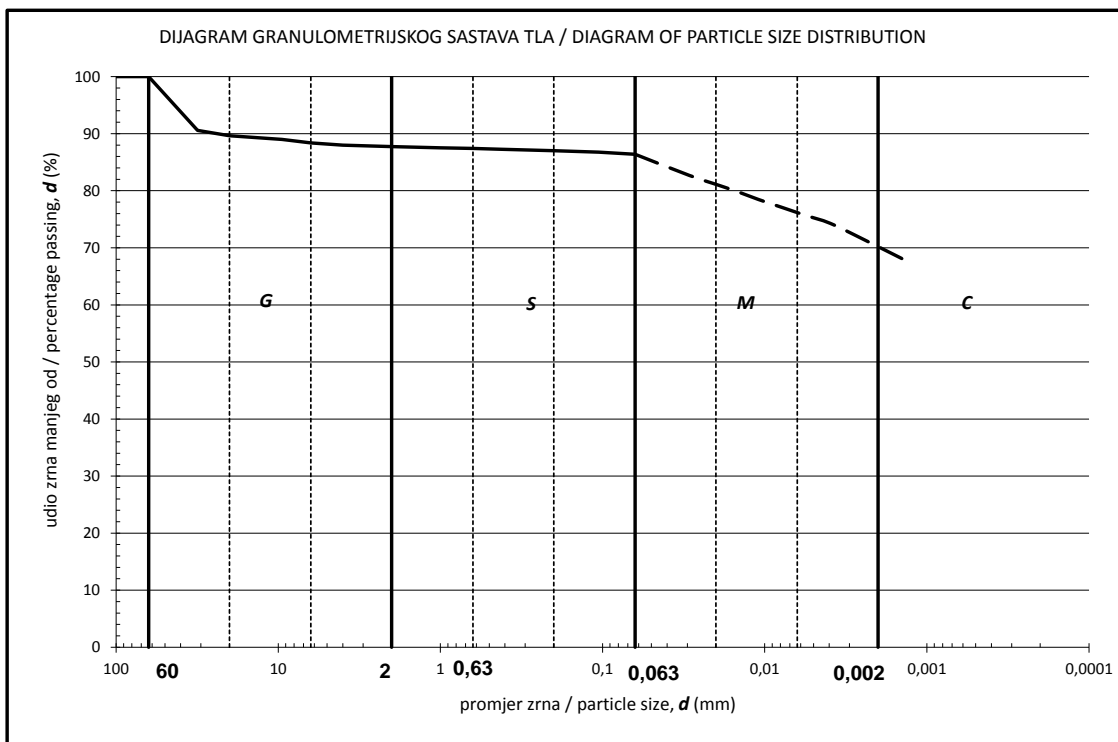
Raspon vrijednosti zijeva (mm): 1 do 9

Srednja vrijednost zijeva (mm): 4.3

**Prilog 3. REZULTATI ISPITIVANJA MATERIJALA ISPUNE**

### GRANULOMETRIJSKA ANALIZA / PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

Naručitelj / Ordered by:	Ivana Dobrilović Našička 1, Zagreb	Oznaka uzorka / Sample designation:	<b>U-1</b>
Naziv projekta / Project title:	Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima	Dubina uzorka / Sample depth (m):	-
Oznaka projekta / Project designation:	PR-00-19	Opis uzorka / Sample description:	POREMEĆENI UZORAK
Laboratorijski broj uzorka / Laboratory number:	U-00/000-19-GR	Metoda ispitivanja / Testing method:	HRN EN ISO 17892 - 4:2016 METODA 5.5.
Datum početka i završetka testa / Date of commencement and completion of the test:	18.02.2019/20.02.2019	Uređaj / Apparatus:	VAG001, PMJ001



Analiza / Analysis		(%)
<b>Kamen / Cobbles</b>	d > 63 mm	<b>0</b>
<b>G</b>	<b>ukupno / total</b>	<b>12,3</b>
	(63mm-20mm)	10,4
	(20mm-6,3mm)	1,3
	(6,3mm-2mm)	0,6
<b>S</b>	<b>ukupno / total</b>	<b>1,3</b>
	(2mm-0,63mm)	0,3
	(0,63mm-0,2mm)	0,4
	(0,2mm-0,063mm)	0,6
<b>M</b>	<b>ukupno / total</b>	<b>16,2</b>
<b>C</b>	<b>ukupno / total</b>	<b>70,2</b>

(%)	D(mm)
10	
30	
60	

Cc	
Cu	
D <sub>max</sub> (mm)	41,0

Priprema uzorka / Sample preparation:	

Gustoća čvrstih čestica / Specific density of soil solids: $\rho_s$ ( $g/cm^3$ ):	2,65
	ispitana / determined
	pretpostavljena / assumed

Masa uzorka / Mass of sample $m$ (g):	<b>3189,86</b>	Oblik i tvrdoća zrna / Shape and hardness of particle	Uglato i čvrsto
---------------------------------------	----------------	---	-----------------

Napomena / Comment:	

Ispitao / Operator:	Kontrolirao i odobrio / Checked and approved by:	Datum izvještaja / Date of report :
Aleksandar JOVIĆ, dipl.ing.rud.	Aleksandar JOVIĆ, dipl.ing.rud.	25.2.2019



**ODREĐIVANJE SADRŽAJA KARBONATA U TLU / DETERMINATION OF CARBONATE CONTENT OF SOIL**

Naručitelj / Ordered by:	Ivana Dobrilović Našička 1, Zagreb	Temperatura prostorije / Room temperature (°C):	20
Naziv projekta / Project title:	Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima	Tlak zraka u prostoriji / Room air pressure (mm Hg):	772
Oznaka projekta / Project designation:	PR-00-19	Uređaj / Apparatus:	KAL001, VAG004
Datum ispitivanja / Test date:	20.2.2019	Metoda ispitivanja / Testing method:	HRN.U.B1.026:1968

Oznaka uzorka / Sample designation	Dubina uzorka / Sample depth (m)	Laboratorijski broj uzorka / Laboratory number:	Suha masa neto / Mass of dry soil net (g)	Volumen / Volume V (ml)	Koeficijent / Coefficient n	CaCO <sub>3</sub> (%)	CaCO <sub>3</sub> -Srednja vrijednost / CaCO <sub>3</sub> -Average value (%)
U-1	-	U-00/000-19-KA	0,505	30,00	0,3761	22,34	20,9
			0,804	44,00	0,3761	20,58	
			0,622	33,60	0,3761	20,32	
			0,687	37,40	0,3761	20,47	

Napomena / Comment:

Ispitao / Operator:	Kontrolirao i odobrio / Checked and approved by:	Datum izvještaja / Date of report:
Aleksandar JOVIĆ, dipl.ing.rud.	Aleksandar JOVIĆ, dipl.ing.rud.	25.2.2019

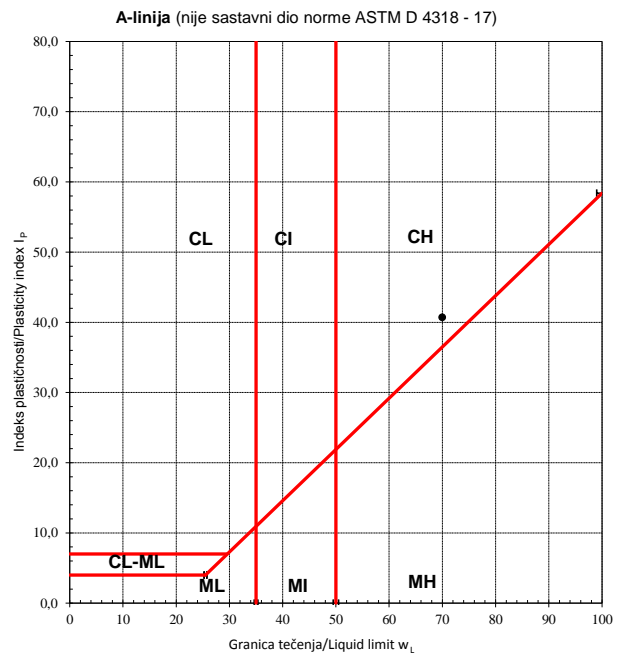
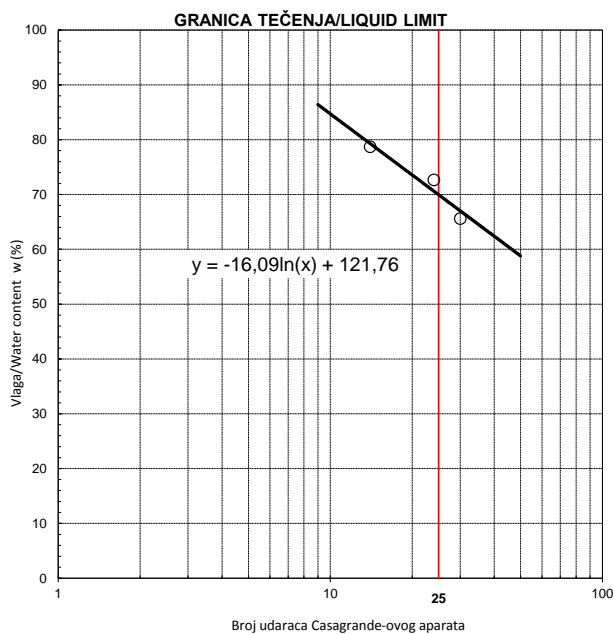
 <b>geotehnički studio</b>	GEOTEHNIČKI STUDIO d.o.o. za projektiranje, građenje, nadzor i istraživanje, HR-10090 Zagreb, N. Pavića 11; tel.: +385-1-3879-141; fax: +385-1-3879-073 e-mail: geotehnicki-studio@zg.htnet.hr; <a href="http://www.geotehnicki-studio.hr">www.geotehnicki-studio.hr</a> OIB: 65389569788; žiro račun: 2360000-1101316892	
	GEOTEHNIČKI STUDIO d.o.o.- Laboratorij za ispitivanje tla i stijena, N. Pavića 26, 10090 Zagreb LABORATORIJSKI ISPITNI IZVJEŠTAJ / LABORATORY TEST REPORT	

### GRANICE KONZISTENCIJE/CONSISTENCY LIMITS

Naručitelj / Ordered by:	Ivana Dobrilović Našička 1, Zagreb	Oznaka uzorka / Sample designation:	U-1
Naziv projekta / Project title:	Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima	Dubina uzorka / Sample depth(m):	-
Oznaka projekta / Project designation:	PR-00-19	Opis uzorka / Sample description:	POREMEĆENI UZORAK
Laboratorijski broj uzorka / Laboratory number:	U-00/001-19-AT	Metoda ispitivanja / Testing method:	ASTM D 4318 - 17 METODA A
Datum početka i završetka testa / Date of commencement and completion of the test:	20.02.2019/21.02.2019	Uređaj / Apparatus:	VAG001, CAS002

Granica tečenja / Liquid limit (Casagrande aparat)			
Pokus br. / Test no.	1	2	3
Broj udaraca / No. of bumps:	30	24	14
Posuda br. / Container no.	GTC001	GTC002	GTC003
Vlažna masa bruto / Mass of wet soil, (g)	37,04	31,86	37,44
Suha masa bruto / Mass of dry soil, (g)	32,60	27,90	32,86
Tara / Mass of container, (g)	25,83	22,45	27,04
Suha masa neto / Mass of dry soil, (g)	6,77	5,45	5,82
Gubitak mase / Mass of moisture, (g)	4,44	3,96	4,58
<b>VLAŽNOST / (%) MOISTURE CONTENT</b>	<b>65,58</b>	<b>72,66</b>	<b>78,69</b>

Granica plastičnosti / Plastic limit		
Pokus br. / Test no.	1	2
Posuda br. / Container no.	PRO001	PRO002
Vlažna masa bruto / Mass of wet soil, (g)	74,36	68,54
Suha masa bruto / Mass of dry soil, (g)	73,12	67,12
Tara / Mass of container, (g)	68,90	62,25
Suha masa neto / Mass of dry soil, (g)	4,22	4,87
Gubitak mase / Mass of moisture, (g)	1,24	1,42
<b>VLAŽNOST / (%) MOISTURE CONTENT</b>	<b>29,38</b>	<b>29,16</b>



Granica tečenja / Liquid limit, $w_L$ (%)	<b>70</b>
Granica plastičnosti / Plastic limit, $w_p$ (%)	<b>29</b>
Prirodna vlažnost / Water content, $w_o$ (%)	<b>4,0</b>
Indeks plastičnosti / Plasticity index, $I_p$ (%)	<b>41</b>
Indeks konzistencije / Consistency index, $I_c$	<b>1,62</b>

Priprema uzorka / Sample preparation	
Promjer sita / Sieve diameter (mm):	
Sušenje na zraku / Air dried at:	
Sušenje u termo komori / Over dried at (°C):	
Ostatak na situ / Proportion retained on sieve (%):	

Napomena / Comment:

Ispitao / Operator:	Kontrolirao i odobrio / Checked and approved by:	Datum izvještaja / Date of report :
Aleksandar JOVIĆ, dipl.ing.rud.	Aleksandar JOVIĆ, dipl.ing.rud.	25.2.2019

Jasmina Martinčević Lazar  
dipl.ing.geol.

## IZVJEŠTAJ O MINERALOŠKOJ ANALIZI METODOM RENTGENSKE DIFRAKCIJE (XRD)

**Zadatak:** Određivanje mineralnog sastava uzorka karbonatne ispune s područja Kanfanara za potrebe izrade doktorske disertacije

**Nositelj zadatka:** Ivana Dobrilović, dipl. ing. rud.

**Ispitana svojstva:** Mineralni sastav cjelovitog uzorka i frakcije manje od 2  $\mu\text{m}$

**Ispitivanja izvela:** Jasmina Martinčević Lazar, dipl. ing. geol.

**Datum izvještaja:** 24.8.2020.

Broj: \_\_\_\_\_/20

HRVATSKI GEOLOŠKI  
INSTITUT

**Ravnatelj**

---

dr.sc. Slobodan Miko,  
dipl.ing.geol.

HRVATSKI GEOLOŠKI  
INSTITUT

**Zavod za geologiju  
Predstojnica**

---

dr.sc. Koraljka Bakrač,  
dipl.ing.geol.

Zagreb, 2020.



# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>3</b>
<b>2. METODE</b> .....	<b>4</b>
2.1. KVALITATIVNA ANALIZA NEORIJENTIRANIH UZORAKA: CJELOKUPNI UZORAK I UZORAK FRAKCIJE MANJE OD 2 $\mu$ m.....	4
2.2. KVALITATIVNA ANALIZA ORIJENTIRANIH UZORAKA FRAKCIJE MANJE OD 2 $\mu$ m .....	4
2.3. SEMIKVANTITATIVNA ANALIZA CJELOKUPNOG UZORKA I UZORKA FRAKCIJE MANJE OD 2 $\mu$ m.....	5
<b>3. REZULTATI</b> .....	<b>6</b>
3.1. CJELOKUPNI UZORAK .....	6
3.2. FRAKCIJA MANJA OD 2 $\mu$ m.....	7
<b>4. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>10</b>
<b>5. REFERENCE</b> .....	<b>11</b>

## 1. UVOD

Na jednom uzorku karbonatne ispune (sitnozrnasti sediment koji ispunjava pukotine u karbonatnim stijenama) izvršena je *kvalitativna* i (*semi*)*kvantitativna* mineraloška analiza primjenom metode rendgenske difrakcije na prahu pomoću rendgenskog difraktometra marke *PANalytical X'Pert Powder*. Izvor zračenja je bakrena cijev koja odašilje  $\text{CuK}\alpha$  zračenje valne duljine  $\lambda=1,54 \text{ \AA}$ . Difraktometar je opremljen vertikalnim goniometrom  $\theta$ - $\theta$  geometrije, nosačem za uzorke, optičkim modulom za kontrolu ulaznog i difraktiranog zračenja te PIXcelovim detektorom. Rendgenskim difraktometrom se upravlja preko programa „X'Pert Quantify“ dok su difrakcijske slike analizirane pomoću programskog paketa *X'Pert HighScore Plus* (2016) na koji je vezana baza podataka svih poznatih mineralnih vrsta (*PDF-4/Minerals*, 2020). Generiranje rendgenskih zraka događa se pri naponu od 45 kV i jakosti struje od 40 mA.



**Slika 1** Rendgenski difraktometar Hrvatskog geološkog instituta s vertikalnim  $\theta - \theta$  goniometrom, keramičkom rendgenskom Cu-cijevi, PiXcel-ovim detektorom i odgovarajućim nosačima za uzorke (na slici je vidljiv nosač za orijentirane uzorke). Prilikom snimanja uzorak miruje, dok rendgenska cijev i detektor rotiraju oko uzorka.

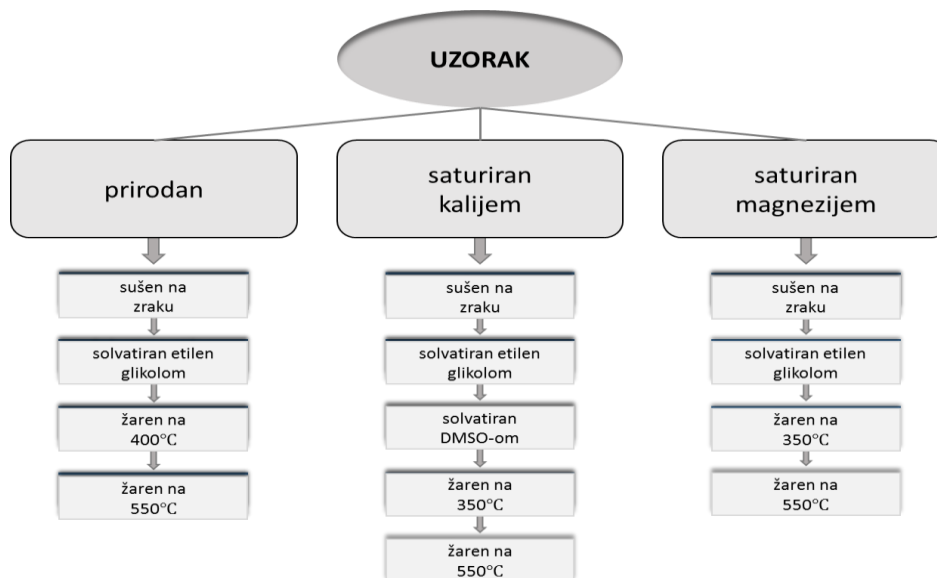
## 2. METODE

### 2.1. KVALITATIVNA ANALIZA NEORIJENTIRANIH UZORAKA: CJELOKUPNI UZORAK I UZORAK FRAKCIJE MANJE OD 2 $\mu$ m

Prije snimanja na rendgenskom difraktometru, uzorak koji je zaprimljen na analizu usitnjen je i homogeniziran u ahatnom tarioniku do frakcije praha. Frakcija manja od 2  $\mu$ m izdvojena je iz uzorka centrifugiranjem. Vrijeme i brzina centrifugiranja određeni su pomoću programa *Centrifuge* koji potrebne varijable računa na temelju Stokesovog zakona i poznatih parametara instrumenta. Nakon centrifugiranja, glinovita frakcija, koja zaostaje u suspenziji uzorka, se uz pomoć kapaljke izdvoji u keramičku zdjelicu i ostavlja preko noći u sušioniku na 50°C kako bi se osušila. Tako pripremljeni cjeloviti uzorak i uzorak frakcije manje od 2  $\mu$ m pakirani su na nosač za uzorke te su snimani na rendgenskom difraktometru u području od 4 – 66°2 $\theta$ . Pri tome je veličina koraka iznosila 0.02°2 $\theta$  u vremenu od 4 sekunde. Za reguliranje intenziteta rendgenskog zračenja korišteni su 0.04 rad Sollerovi slitovi i divergentna pukotina od 1/4° te primarna i sekundarna pukotina za sprječavanje raspršenja od 1/2°.

### 2.2. KVALITATIVNA ANALIZA ORIJENTIRANIH UZORAKA FRAKCIJE MANJE OD 2 $\mu$ m

Ovom vrstom analize dobiveni su podaci o vrstama minerala glina koje uzorak sadrži kao i podatak o tome koji sve ostali minerali čine frakciju manju od 2  $\mu$ m. Frakcija manja od 2  $\mu$ m, potrebna za izradu orijentiranog uzorka, izdvojena je iz suspenzije netopivog ostatka centrifugiranjem te su od nje načinjeni orijentirani preparati. Netopivi ostatak uzorka dobiven je otapanjem kalcita otopinom natrijevog acetata (NaOAc) i octene kiseline puferirane do stalne vrijednosti pH = 5 dodavanjem klorovodične kiseline (36,5 %) (Jackson, 1979). Nakon otapanja karbonata, zbog promjene pH vrijednosti tla, glinovita frakcija se lakše izdvoji u suspenziju. Vrijeme i brzina centrifugiranja određeni su pomoću programa *Centrifuge*. Nakon centrifugiranja, glinovita frakcija zaostala je u suspenziji uzorka te se uz pomoć kapaljke nanosila na stakalca i ostavila da se osuši na zraku. Pri sušenju minerali glina postižu preferiranu orijentaciju koja je okomita na kristalografsku os C. Tako pripremljeni uzorci snimljeni su u području od 4 - 30°2 $\theta$  pri čemu je veličina koraka iznosila 0.002°2 $\theta$  u vremenu od 4 sekunde. Postupak utvrđivanja mineralnog sastava frakcije manje od 2  $\mu$ m uključuje snimanje uzorka nakon više različitih tretmana kako bi se sa sigurnošću moglo utvrditi koje vrste minerala glina (bubrive i nebubrive) su prisutne u uzorcima. Hodogram pripreme orijentiranih uzoraka prije svakog snimanja grafički je prikazan na slici 2.



**Slika 2** Postupci provedeni nad uzorcima prije svakog snimanja

### 2.3. SEMIKVANTITATIVNA ANALIZA CJELOKUPNOG UZORKA I UZORKA FRAKCIJE MANJE OD 2 $\mu\text{m}$

Semikvantitativna mineraloška analiza cjelokupnog uzorka provedena je metodom prema Rietveldu, odnosno postupkom utočnjavanja standardnih profila minerala koji su identificirani u uzorku s profilom uzorka dobivenim nakon snimanja. Dobiveni rezultati dodatno su provjereni metodom koju je razvio Schultz (Schultz, 1964). Interpretacija difrakcijskih slika kao i samo utočnjavanje rađeno je u programu X'Pert HighScore Plus (2016) na koju je vezana baza svih poznatih minerala zajedno s podacima o njihovim strukturno-kemijskim i kristalografskim značajkama koji su potrebni za semikvantitativnu analizu (PDF-4/Minerals, 2020). Rezultati semikvantitativne analize prikazani su u tablici 1 s mogućnošću varijacije od 2-3% od dobivenog rezultata.

**Tablica 1** Rezultati semikvantitativne analize uzorka; vrijednosti navedene u tablici označavaju postotni udjel pojedinog minerala u uzorku.

UZORAK	kvarc	kalcit	gibbsit	hematit	getit	kaolinit	klorit
cjelokupni uzorak	12	10	19	3	1	44	11
frakcija < 2 $\mu\text{m}$	-	-	25	14	2	40	20

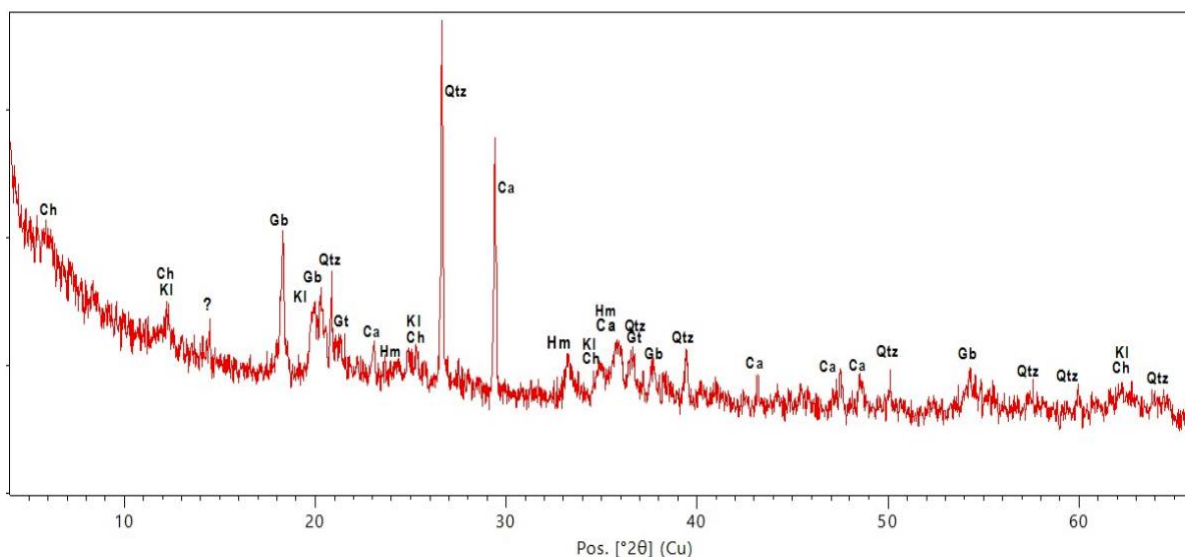
### 3. REZULTATI

U nastavku su prikazani rezultati svih analiza koje su provedene nad uzorcima. U tablicama su prikazani osnovni rendgenografski podaci na temelju kojih su identificirane mineralne vrste u uzorcima. Uz tablice priloženi su rendgenogrami kvalitativne analize cjelokupnog uzorka snimljeni u području od 4 - 66 °2θ te rendgenogrami neorijentiranog i orijentiranog uzorka frakcije < 2 μm snimljeni u području od 4 - 30 °2θ. Na svakom rendgenogramu simbolima je označena mineralna vrsta koju pojedini difrakcijski maksimum predstavlja.

#### 3.1. CJELOKUPNI UZORAK

**Tablica 2** Rendgenografski podaci dobiveni snimanjem neorijentiranog cjelovitog uzorka

Pos. [°2θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	vrsta minerala
6.1155	14.44053	5.36	klorit
12.2452	7.22229	8.41	kaolinit, klorit
14.4663	6.11800	11.69	??
18.2604	4.85447	36.20	gibbsit
19.8877	4.46077	16.83	kaolinit, klorit
20.3014	4.37078	18.23	gibbsit, kaolinit, klorit
20.5352	4.32155	9.75	gibbsit
20.8399	4.25905	24.56	kvarc
21.3528	4.15789	9.95	getit
23.0329	3.85825	8.80	kalcit
24.1868	3.67674	3.74	hematit
24.6506	3.60860	5.03	kaolinit, klorit
26.6274	3.34502	100.00	kvarc
29.3974	3.03582	76.70	kalcit
33.2619	2.69141	8.27	hematit
35.0131	2.56071	7.87	kaolinit, klorit
35.7612	2.50883	15.22	hematit, kalcit
36.5603	2.45581	11.04	kvarc, getit
37.6725	2.38583	7.69	gibbsit, kaolinit, klorit
38.3256	2.34666	6.32	kaolinit
39.3930	2.28550	13.35	kvarc
40.1602	2.24359	3.78	kvarc, getit
41.0234	2.19835	2.67	hematit
42.4185	2.12922	7.81	kvarc
43.1560	2.09453	20.50	kalcit
44.1683	2.04884	2.00	kalcit, kaolinit, klorit
45.5629	1.98932	3.80	kvarc, kaolinit
47.4872	1.91310	13.30	kalcit
48.5084	1.87518	11.43	kalcit
50.0753	1.82012	7.16	kvarc
54.3062	1.68788	6.97	gibbsit
57.3756	1.60467	4.75	kvarc
59.9480	1.54181	6.51	kvarc
62.2435	1.49035	4.78	kaolinit, klorit
64.0594	1.45241	2.63	kvarc, kaolinit

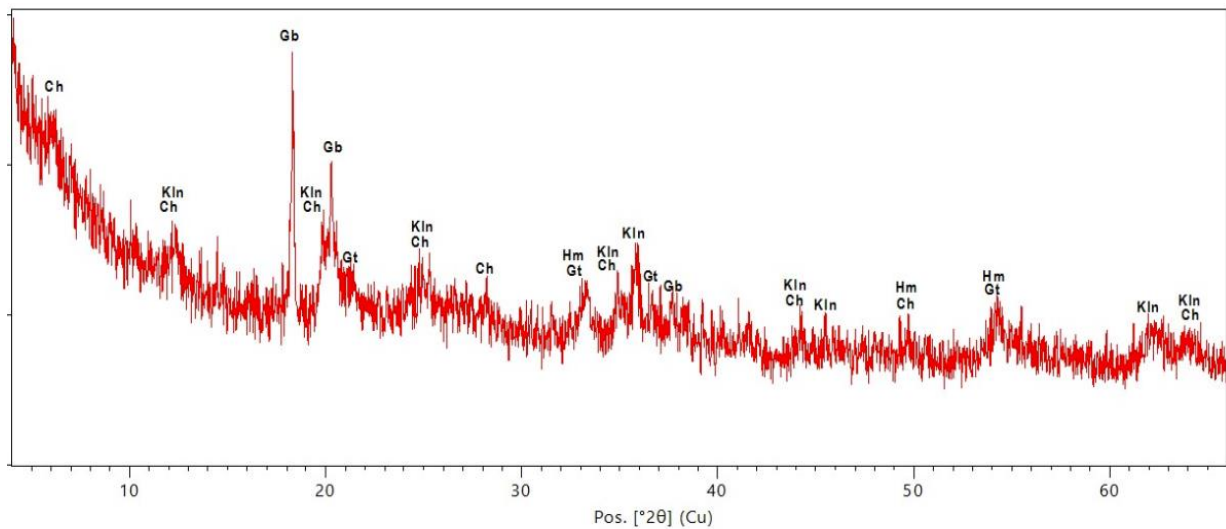


**Slika 3** Difrakcijska slika dobivena snimanjem cjelokupnog uzorka. *Ca*-kalcit, *Ch* – klorit, *Gb* – gibbsit, *Gt* – getit, *Hm* – hematit, *Kl* – kaolinit, *Qtz* – kvarc, ? – nepoznati mineral

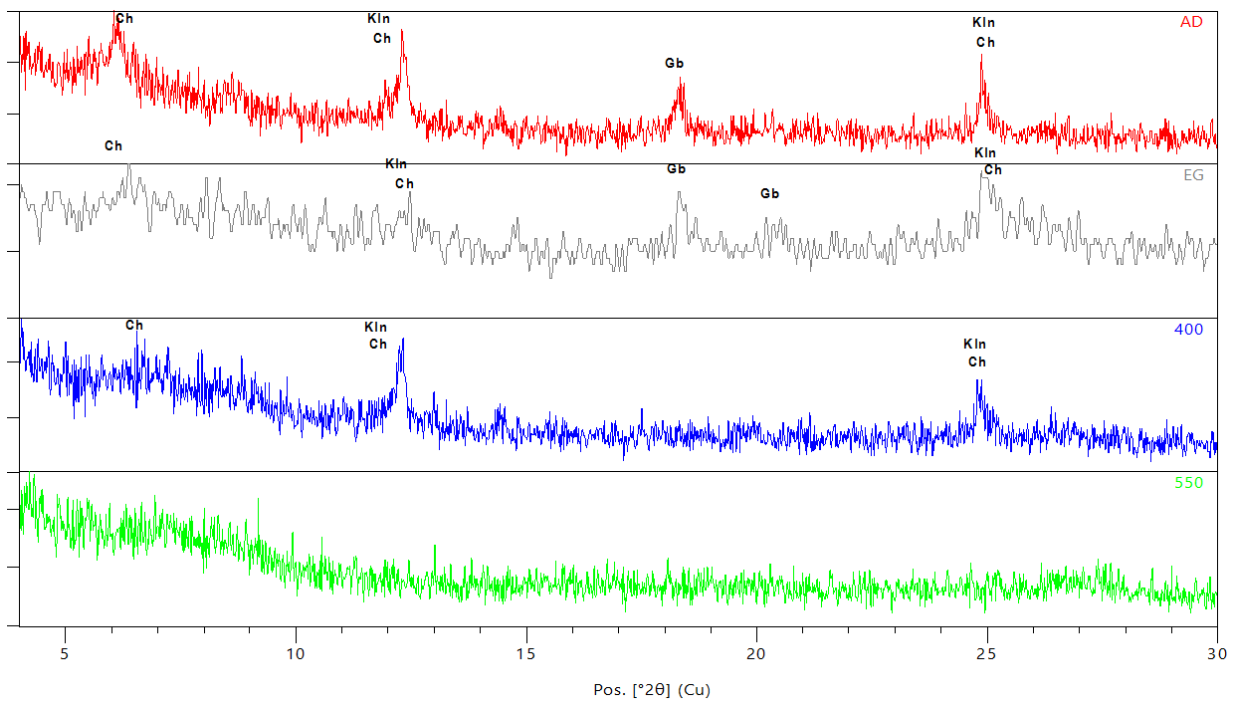
### 3.2. FRAKCIJA MANJA OD 2 $\mu$ m

**Tablica 3** Rendgenografski podaci dobiveni snimanjem neorijentiranog uzorka frakcije manje od 2  $\mu$ m

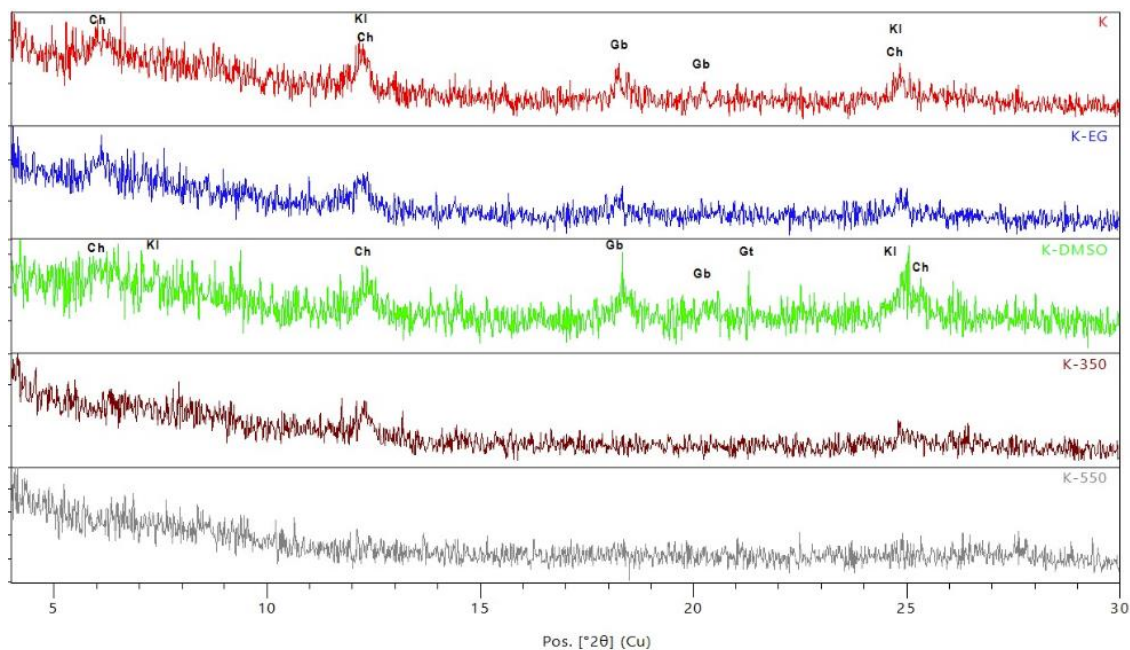
Pos. [°2 $\theta$ ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	vrsta minerala
6.1355	14.39353	16.55	klorit
12.3207	7.18414	22.60	kaolinit, klorit
18.3104	4.84534	100.00	gibbsit
19.8830	4.46181	33.27	kaolinit, klorit
20.2746	4.38014	66.20	gibbsit
20.5117	4.32645	28.32	gibbsit
21.2727	4.17336	17.75	getit
25.0060	3.56107	21.42	kaolinit
25.2765	3.52065	23.72	klorit
28.2401	3.15756	20.47	klorit
31.5490	2.83353	13.85	klorit
33.2238	2.69664	23.82	hematit, getit
34.9682	2.56601	20.92	kaolinit, klorit
35.8712	2.50347	36.38	kaolinit
36.6447	2.45035	21.01	gibbsit, getit
37.6373	2.38798	22.28	gibbsit, kaolinit, klorit
38.3440	2.34557	19.81	kaolinit
39.2074	2.29779	17.40	kaolinit, klorit, getit
40.2045	2.24307	11.66	gibbsit, getit
41.0904	2.19492	14.36	hematit, getit, klorit
44.2675	2.04618	19.02	kaolinit, klorit
45.4913	1.99229	18.24	kaolinit
48.0060	1.89363	12.06	getit, kaolinit, klorit
49.7230	1.83219	19.49	hematit, klorit
50.6201	1.80180	12.54	gibbsite, getit, klorit
53.2120	1.71998	13.48	getit, klorit
54.3055	1.68930	23.64	hematit, getit
56.3973	1.63016	18.90	hematit
62.4051	1.48688	19.27	kaolinit
64.1588	1.45040	15.55	kaolinit, klorit



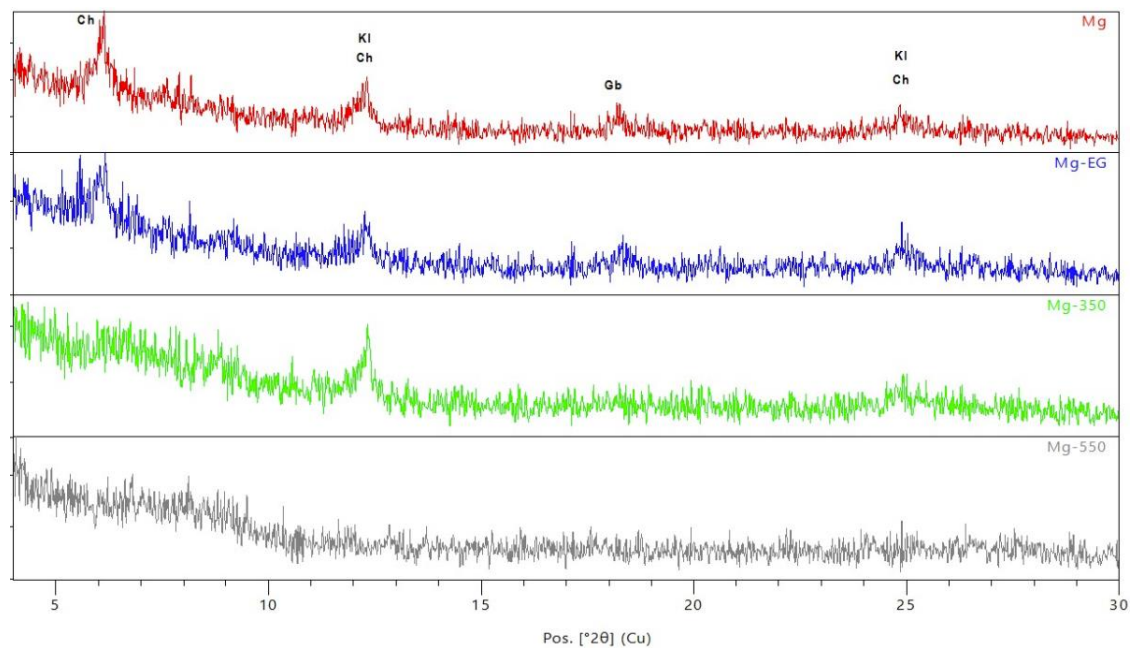
**Slika 4** Difrakcijska slika neorijentiranog uzorka frakcije manje od 2  $\mu\text{m}$ . *Ch* – klorit, *Gb* – gibbsit, *Gt* – getit, *Hm* – hematit, *Kln* – kaolinit



**Slika 5** Difrakcijska slika orijentiranog uzorka frakcije manje od 2  $\mu\text{m}$  nakon tretmana sušenja na zraku (*AD*), saturacije etilen glikolom (*EG*), žarenja na 400°C i žarenja na 550°C. *Ch* – klorit, *Gb* – gibbsit, *Kln* - kaolinit



**Slika 6** Difrakcijska slika orijentiranog i kalijem saturiranog uzorka frakcije manje od 2  $\mu\text{m}$  nakon tretmana sušenja na zraku (*K*), naparivanja etilen glikolom (*K-EG*), solvatacije s DMSO (*K-DMSO*), žarenja na 350°C (*K-350*) i žarenja na 550°C (*K-550*). *Ch* – klorit, *Gb* – gibbsit, *Kln* - klorit



**Slika 7** Difrakcijska slika orijentiranog magnezijem saturiranog uzorka frakcije manje od 2  $\mu\text{m}$  nakon tretmana sušenja na zraku (*Mg*), naparivanja etilen glikolom (*Mg-EG*), žarenja na 350°C (*Mg-350*) i žarenja na 550°C (*Mg-550*). *Ch* – klorit, *Gb* – gibbsit, *Kl* – kaolinit



#### 4. ZAKLJUČAK

Mineraloškom analizom utvrđeno je kako se u najvećoj mjeri (44 %) uzorak sastoji od kaolinita, minerala glina s karakterističnim bazalnim refleksom na  $d_{001} = 7.2 \text{ \AA}$  i na  $d_{001} \sim 12 \text{ \AA}$  nakon solvatacije s DMSO kalijem saturiranih orijentiranih uzoraka. Osim kaolinita, ovaj bazalni refleks zajedno s vrlo jakim refleksom na  $d_{001} = 14.4 \text{ \AA}$  upućuje i na prisutnost klorita ( $d_{002} = 7.2 \text{ \AA}$ ). Refleks na  $14.4 \text{ \AA}$  je vrlo stabilan nakon svih tretmana saturacija i solvatacija, tj. nema pomaka na  $17 \text{ \AA}$  ili  $18 \text{ \AA}$ , što ne upućuje na prisutnost smektita i vermikulita čiji bazalni refleks  $d_{001}$  se također nalazi na  $14.5 \text{ \AA}$ . Nakon žarenja na  $350^\circ\text{C}$  i  $400^\circ\text{C}$  intenzitet bazalnog refleksa klorita se znatno smanjuje, dok nakon žarenja na  $550^\circ\text{C}$  u potpunosti nestaje što upućuje na to da se radi o kloritu s vrlo visokim udjelom željeza u strukturi. Uz kaolinit, kao najzastupljeniju mineralnu vrstu, uzorak tla sadrži znatnu količinu aluminijskih i željezovitih hidroksida i oksihidroksida koji su tipični u rezidualnim tlima na karbonatnoj podlozi te su ujedno vrlo jaki pigmenti i boje tlo u crveno. Najzastupljeniji među navedenim mineralima je gibbsit –  $\text{Al}(\text{OH})_3$  s 20 % udjela i vrlo izraženim refleksima na  $4.38 \text{ \AA}$  i  $4.32 \text{ \AA}$ . Hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) i getit ( $\text{FeOOH}$ ) čine zajedno svega 3 % cjelokupnog uzorka. Hematit ima vrlo izražen refleks na  $3.67 \text{ \AA}$  i  $2.69 \text{ \AA}$ , a getit na  $4.15 - 4.18 \text{ \AA}$ . Od ostalih minerala u uzorku tla su još prisutni kvarc s 12 % udjela i najjačim refleksom na  $3.34 \text{ \AA}$  i  $4.25 \text{ \AA}$  te kalcit s 10 % udjela i vrlo jakim refleksima na  $3.03 \text{ \AA}$  i  $3.85 \text{ \AA}$ .

Analizom neorijentiranog uzorka frakcije manje od  $2 \text{ \mu m}$  pokazalo se kako i u toj frakciji od minerala glina dominiraju kaolinit i klorit koji zajedno čine oko 60% udjela uzorka. Uz njih je vrlo zastupljen i gibbsit s približno 25 % udjela te hematit s oko 14 % udjela. Getit je također prisutan u glinovitoj frakciji, ali tek s 2 % udjela, a kalcit i kvarc u potpunosti izostaju što znači da su oni sastavni dio samo frakcije veće od  $2 \text{ \mu m}$ .

## 5. REFERENCE

**High Score Plus (2016)**; PANalytical B.V.. Almeo, The Netherlands.

**Jackson, M.L. (1979)**: Soil chemical analysis – advanced course, Soil Science Dept., University of Wisconsin, Madison, 250 str.

**PDF-4/Minerals (2020)**; International Centre for Diffraction Data. SN:MIND 180125-6368.

**Schultz, L. G. (1964)**; Quantitative interpretation of mineralogical composition from X-ray and chemical data for the Pierre Shale., U. S. Geological Survey Professional Paper 391-C, 31.

Analizirala i izradila izvješće:

  
\_\_\_\_\_



geotehnički  
studio

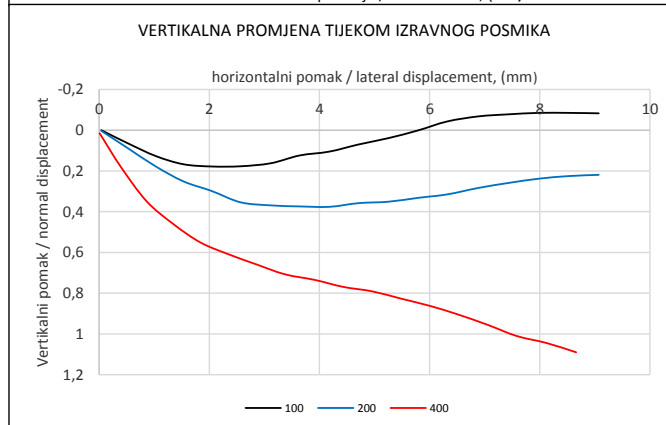
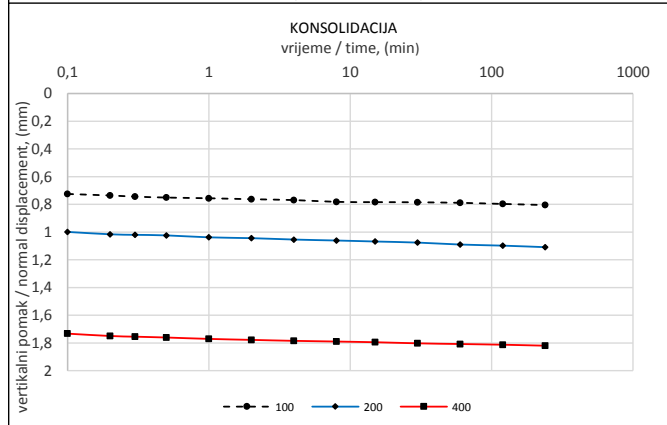
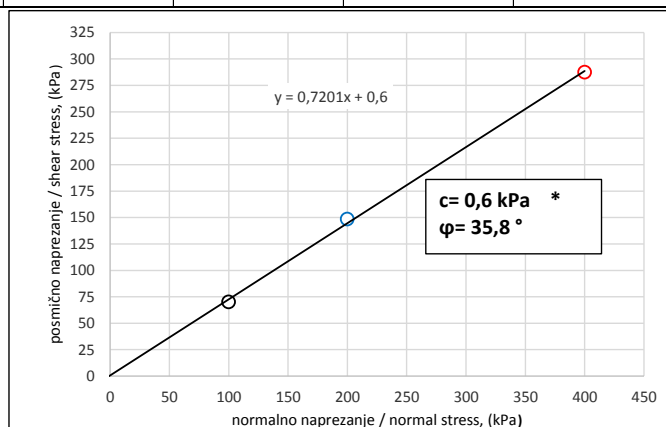
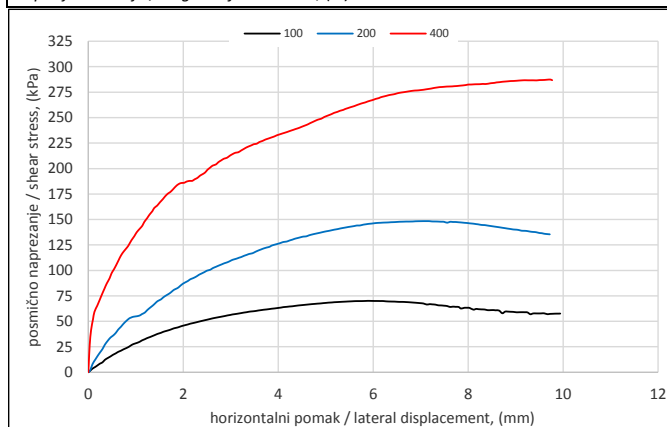
GEOTEHNIČKI STUDIO d.o.o. za projektiranje, građenje, nadzor i istraživanje, HR-10090  
Zagreb, N. Pavića 11; tel.: +385-1-3879-141; fax: +385-1-3879-073  
e-mail: geotehnicki-studio@zg.htnet.hr; www.geotehnicki-studio.hr  
OIB: 65389569788; žiro račun: 2360000-1101316892  
GEOTEHNIČKI STUDIO d.o.o.- Laboratorij za ispitivanje tla i stijena, N. Pavića 26, 10090 Zagreb  
LABORATORIJSKI ISPITNI IZVJEŠTAJ / LABORATORY TEST REPORT



**ISPITIVANJE IZRAVNIM POSMIKOM U KONSOLIDIRANIM I DRENIRANIM UVJETIMA / DIRECT SHEAR TEST OF SOILS UNDER CONSOLIDATED DRAINED CONDITIONS**

Naručitelj / Ordered by:	Ivana Dobrilović Našička 1, Zagreb	Oznaka uzorka / Sample designation:	U-1
Naziv projekta / Project title:	Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima	Dubina uzorka / Sample depth (m):	-
Oznaka projekta / Project designation:	PR-00-20	Tip uzorka / Sample description:	LABORATORIJSKI PRIPREMLJEN UZORAK
Laboratorijski broj uzorka / Laboratory number:	U-00/001-20-DS	Tip uređaja za direktni posmik / Type of shear device	Autoshear, Wykeham & Farrance
Datum početka i završetka testa / Date of commencement and completion of the test:		Metoda ispitivanja / Testing method:	ASTM D 3080 / 3080M - 11

Opis i klasifikacija uzorka / Classification and sample description:	-					Gustoća čvrstih čestica / Density of soil solids, (g/cm <sup>3</sup> )
Granica tečenja / Liquid limits, (%)	-	Šljunak / Gravel, (%)	Pijesak / Sand, (%)	Prah / Silt, (%)	Glina / Clay, (%)	
Granica plastičnosti / Plastic limits, (%)	-	-	-	-	-	
Dimenzije uzorka	Početna visina / Initial thickness, (mm)	20,00	Širina / Width, (mm)	60,00	Promjer / Diameter, (mm)	
Normalno opterećenje / Nominal stress, (kPa)		100	200	400		
Suha masa uzorka / Dry mass of specimen, (g)		95,72	98,83	98,06		
Početna vlažnost uzorka / Initial water content, (%)		0,0	0,0	0,0		
Vlažnost na kraju ispitivanja / Final water content, (%)		0,0	0,0	0,0		
Početni koeficijent pora / Initial void ratio						
Vertikalni pomak na kraju konsolidacije / Final normal displacement, (mm)		0,805	1,109	1,820		
Vrijeme trajanja konsolidacije / Duration of consolidation, (min)		240	240	240		
Maksimalno posmično naprezanje / Maximum shear stress, (kPa)		70,1	148,4	287,4		
Horizontalni pomak pri slomu / Lateral displacement at failure, (mm)		5,90	7,06	9,73		
Vertikalni pomak pri slomu / Normal displacement at failure, (mm)		-0,006	0,280	1,210		
Brzina smicanja / Rate of displacement, (mm/min)		0,010	0,010	0,010		
Početna gustoća uzorka / Initial wet density of specimen, (g/cm <sup>3</sup> )		1,33	1,37	1,36		
Početna suha gustoća uzorka / Initial dry density of specimen, (g/cm <sup>3</sup> )		1,33	1,37	1,36		
Stupanj saturacije / Degree of saturation, (%)						



Napomena / Comment: Određivanje parametara čvrstoće  $c$  i  $\varphi$  nije sastavni dio norme ASTM D 3080 / 3080M - 11 i nije upodručju akreditacije \*

Ispitao / Operator:	Kontrolirao i odobrio / Checked and approved:	Datum izvještaja / Date of report :
Aleksandar JOVIĆ, dipl.ing.rud.	Aleksandar JOVIĆ, dipl.ing.rud.	11.11.2020

**Ispitni izvještaj određivanja čvrstoće tla  
 izravnim smicanjem prema  
 ASTM D 3080/D3080M-11**

Investitor:

Ivana Dobrilovi

Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitne uzorke. Ispitni izvještaj ne smije se preslikavati djelomično ili u cijelosti bez pisanog odobrenja voditelja laboratorija. Ispitivanja su provedena na dostavljenim uzorcima, laboratorij ne provodi uzorkovanje.

Obrazac: **OL-5.4-06\_01**

Predmet: NA-500-20

Lokacija:

Objekt:

Oznaka bušotine/jame/stacionaže: B-3

Dubina: 0,00-0,00

Oznaka ispitivanja: S-500-20-03-04-1-06

Oznaka seta: S-DS-01

Datum ispitivanja: 19.11.2020.

Vrsta uzorka: poremećen

Opis materijala: Smeđe boje

Wp: n/a

Wl: n/a

Simbol klasifikacije:

G: n/a

S: n/a

M: n/a

C: n/a

Napomena:

točka	$\sigma_v$ (kPa)	w (%) poč.stanje/ konač.stanje	$\rho/\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) poč.stanje	$\rho/\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) konač.stanje	početna visina / širina (mm)	uzorak potopljen/ ako DA $\sigma_v$ (kPa)
1	100	43,7 / 27,6			22,3 / 60,0	DA/100
2	200	43,7 / 26,6			22,5 / 60,1	DA/200
3	400	43,7 / 27,3			22,5 / 60,0	DA/400

točka	$t_{50}$	brzina smicanja (mm/min)	$\sigma_v$ (kPa)	$\tau_1$ (kPa)	horiz. def. pri slomu (mm)	vert. def. pri slomu (mm)
1	0,029	0,01	100	57,3	4,27	2,47
2	0,017	0,01	200	117,9	6,02	3,07
3	0,033	0,01	400	209,6	5,24	2,89

Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitne uzorke. Ispitni izvještaj ne smije se preslikavati djelomično ili u cijelosti bez pisanog odobrenja voditelja laboratorija. Ispitivanja su provedena na dostavljenim uzorcima, laboratorij ne provodi uzorkovanje.

Predmet: NA-500-20

Lokacija:

Objekt:

Oznaka bušotine/jame/stacionaže: B-3

Dubina: 0,00-0,00

Oznaka ispitivanja: S-500-20-03-04-1-06

Oznaka seta: S-DS-01

Datum ispitivanja: 19.11.2020.

Vrsta uzorka: poremećen

Opis materijala: Smeđe boje

Wp: n/a

Wl: n/a

Simbol klasifikacije:

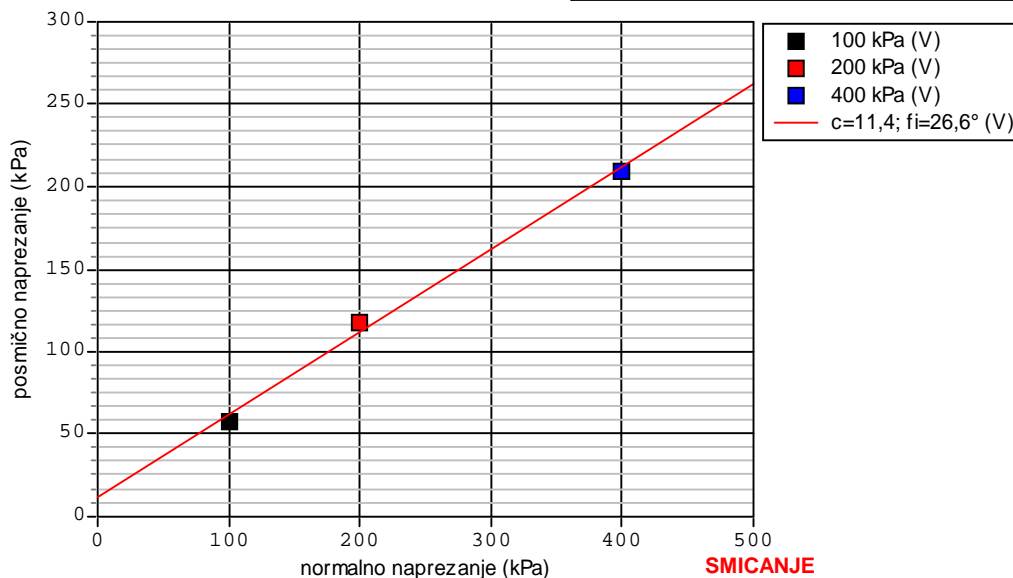
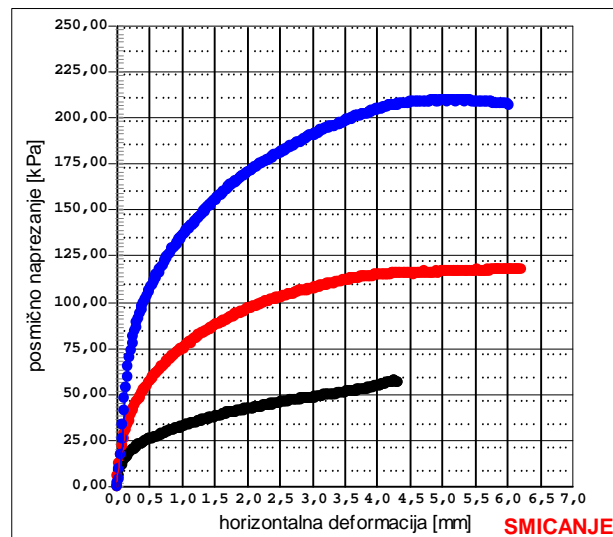
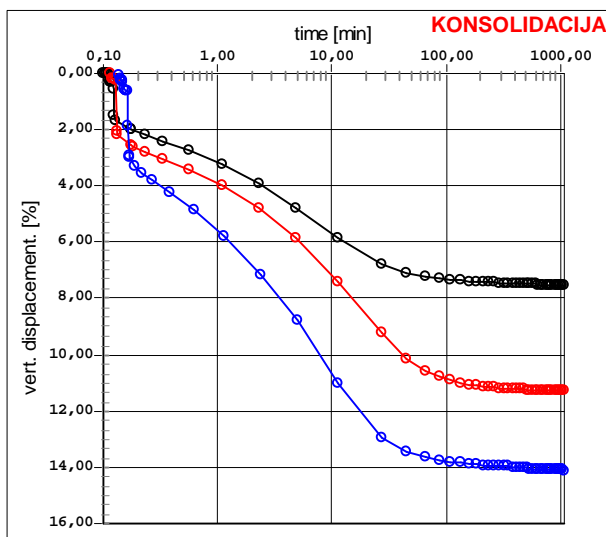
G: n/a

S: n/a

M: n/a

C: n/a

Napomena:



Ispitni izvještaj izradio: voditelj laboratorija Branimir Veličković, dipl.ing.rud.

Datum izrade izvještaja: 19.11.2020.





geotehnički  
studio

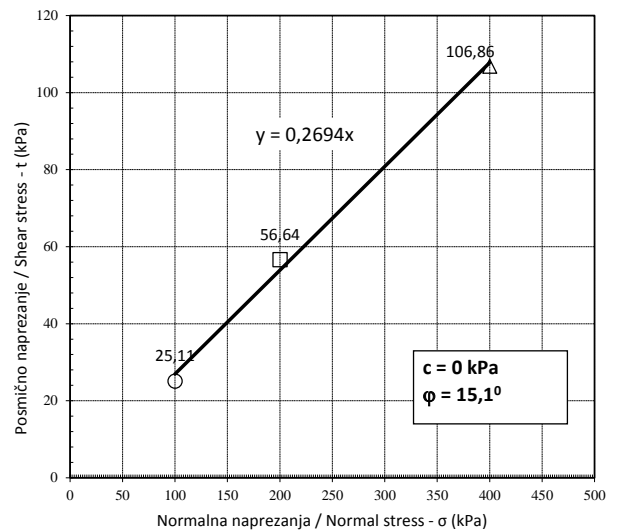
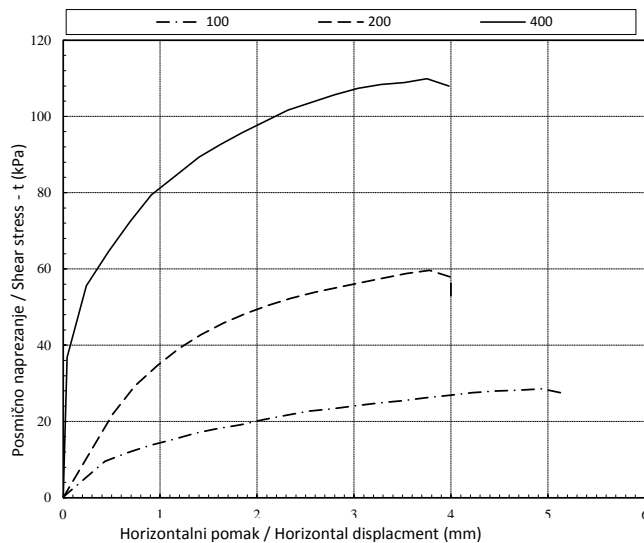
GEOTEHNIČKI STUDIO d.o.o. za projektiranje, građenje, nadzor i istraživanje, HR-10090 Zagreb, N. Pavića 11; tel.: +385-1-3879-141; fax: +385-1-3879-073  
e-mail: geotehnicki-studio@zg.htnet.hr; [www.geotehnicki-studio.hr](http://www.geotehnicki-studio.hr)  
OIB: 65389569788; žiro račun: 2360000-1101316892

GEOTEHNIČKI STUDIO d.o.o.- Laboratorij za ispitivanje tla i stijena, N. Pavića 26, 10090 Zagreb  
LABORATORIJSKI ISPITNI IZVJEŠTAJ / LABORATORY TEST REPORT



### DIREKTNO SMICANJE / DIRECT SHEAR TEST

Naručitelj / Ordered by:	Ivana Dobrilović Našička 1, Zagreb	Oznaka uzorka / Sample designation:	<b>U-1</b>
Naziv projekta / Project title:	Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima	Dubina uzorka / Sample depth (m):	-
Oznaka projekta / Project designation:	PR-00-19	Opis uzorka / Sample description:	Laboratorijski pripremljen uzorak
Laboratorijski broj uzorka / Laboratory number:	U-00/001-19-KT	Dimenzije uzorka / Specimen size (mm.):	60 x 60 x 20
Datum početka i završetka testa / Date of commencement and completion of the test:	20.02.2019./25.02.2019.	Metoda ispitivanja / Testing method:	ASTM D 3080 / 3080M - 11



### REZULTATI POKUSA / TEST RESULTS

Normalno naprezanje / Normal stress $\sigma$ (kPa):	100	200	400	Orijentacija uzorka / Sample orientation:	
Brzina smicanja / Rate of displacement (mm/min):	0,003	0,003	0,003		
Maks. posmično naprezanje / Max. shear stress $t$ (kPa):	25,11	56,64	106,86		
Horizontalni pomak / Horizontal displacement (mm):	4,94	3,78	3,75	Uvjeti ispitivanja / Test requirement:	uzorak je pripremljen i ispitan u stanju vlažnosti na granici tečenja
Zapreminska težina / Unit weight: $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	15,97	13,43	14,01		
Zapreminska težina suha / Dry unit weight: $\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	10,86	9,41	10,02		
Vlažna masa uzorka / mass of wet sample (g):	117,21	98,58	102,81	Uređaj / Apparatus:	DPO001
Suha masa uzorka / mass of dry sample (g):	79,72	69,04	73,51		

Napomena / Comment:

Ispitao / Operator: Aleksandar JOVIĆ, dipl.ing.rud.	Kontrolirao i odobrio / Checked and approved: Aleksandar JOVIĆ, dipl.ing.rud.	Datum izvještaja / Date of report: 26.02.2019.
--	--	--

**Prilog 4. REZULTATI ISPITIVANJA KUTA TRENJA S UGRAĐENOM ISPUNOM**



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU baznog kuta trenja

(strana 1/1)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 29. 09. 2020.

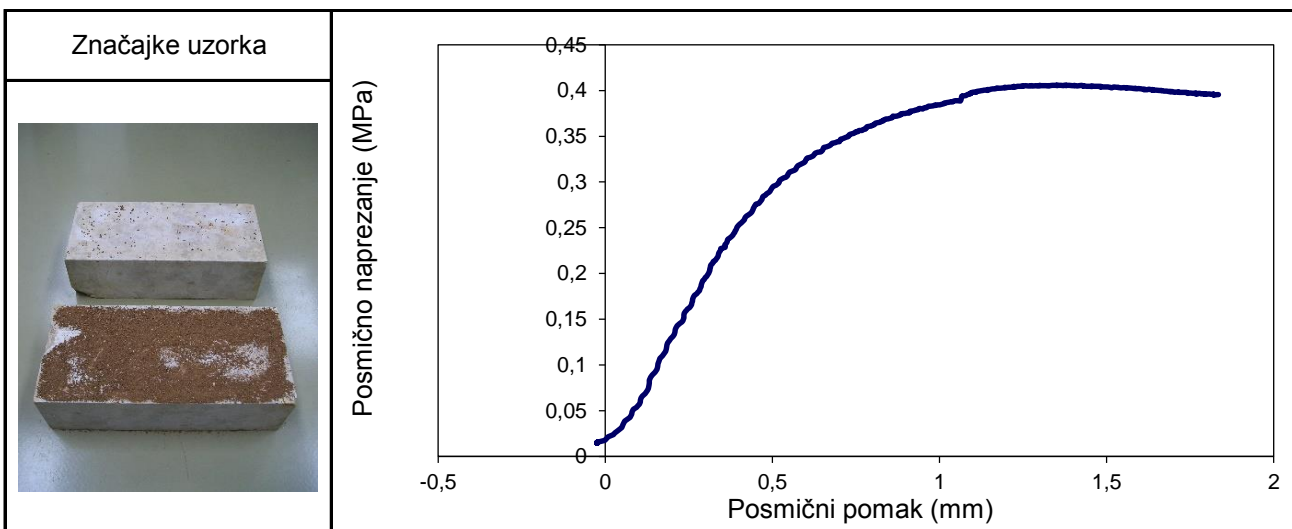
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s ispiljenom plohom koja sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna <2 mm u suhom stanju debljine 3,3 mm

Lab. broj: 19-013-007 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,2	195,7	2626		



Normalno naprezanje $\sigma_n$	Posmična čvrstoća $\tau$	Bazni kut trenja $\varphi_b$
<b>0,742</b> MPa	<b>0,406</b> MPa	<b>28,7</b> °

Brzina smicanja 0,40 mm/min

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 30. 09. 2020.

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditelj odjela:
Dr. sc. Petar Hrženjak	19-013-007DSR-BFA-2-1 30. 09. 2020.	Dr. sc. Petar Hrženjak





## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU baznog kuta trenja

(strana 1/1)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 29. 09. 2020.

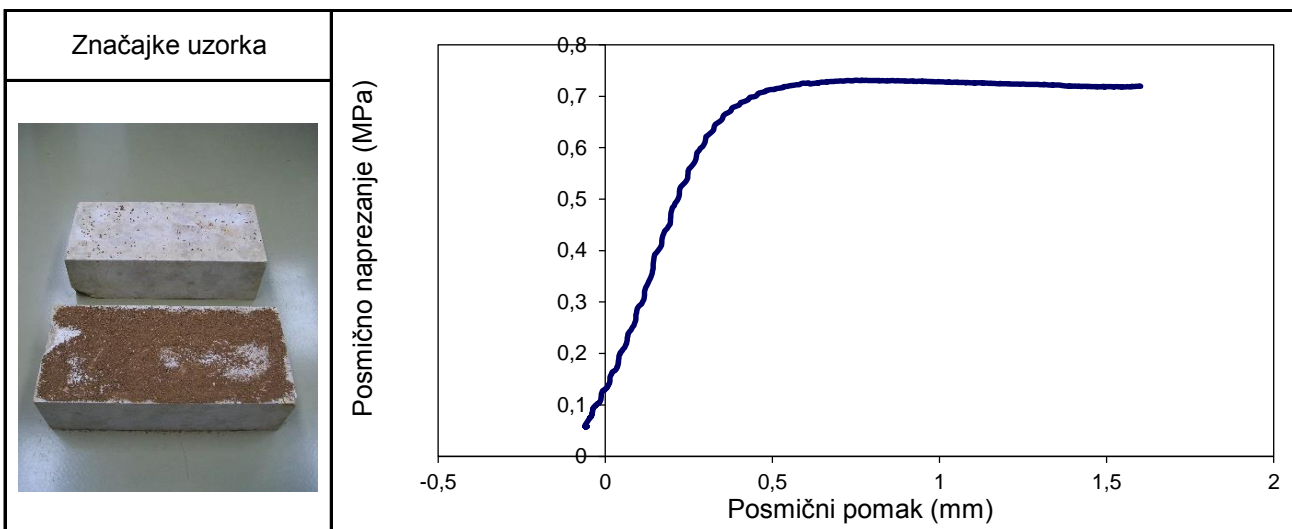
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s ispiljenom plohom koja sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna <2 mm u suhom stanju debljine 3,3 mm

Lab. broj: 19-013-007 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,2	195,7	2626		



Normalno naprezanje $\sigma_n$	Posmična čvrstoća $\tau$	Bazni kut trenja $\varphi_b$
<b>1,497</b> MPa	<b>0,731</b> MPa	<b>26,0</b> °

Brzina smicanja 0,40 mm/min

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 30. 09. 2020.

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditelj odjela:
Dr. sc. Petar Hrženjak	19-013-007DSR-BFA-2-2 30. 09. 2020.	Dr. sc. Petar Hrženjak



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU baznog kuta trenja

(strana 1/1)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 29. 09. 2020.

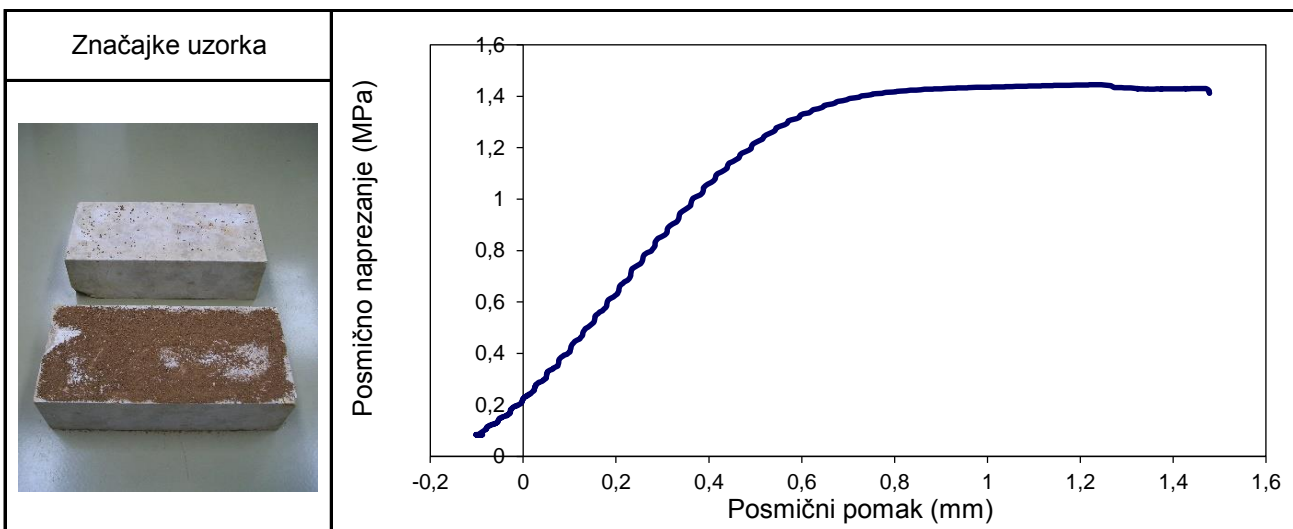
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s ispiljenom plohom koja sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna <2 mm u suhom stanju debljine 3,3 mm

Lab. broj: 19-013-007 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,2	195,7	2626		



Normalno naprezanje $\sigma_n$	Posmična čvrstoća $\tau$	Bazni kut trenja $\varphi_b$
<b>2,996</b> MPa	<b>1,445</b> MPa	<b>25,8</b> °

Brzina smicanja 0,55 mm/min

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 30. 09. 2020.

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditelj odjela:
Dr. sc. Petar Hrženjak	19-013-007DSR-BFA-2-3 30. 09. 2020.	Dr. sc. Petar Hrženjak



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU baznog kuta trenja

(strana 1/1)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 30. 09. 2020.

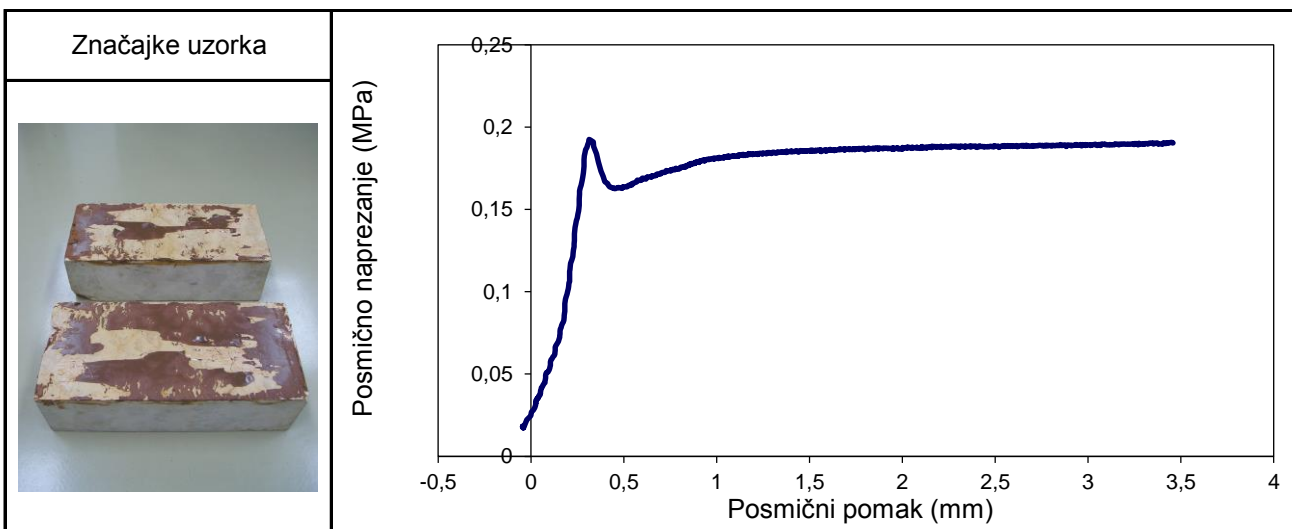
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s isplijenom plohom koja sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) laboratorijski pripremljene na vlažnost granice tečenja debljine 2,3 mm

Lab. broj: 19-013-007 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,2	195,7	2626		



Normalno naprezanje $\sigma_n$	Posmična čvrstoća $\tau$	Bazni kut trenja $\varphi_b$
<b>0,741</b> MPa	<b>0,193</b> MPa	<b>14,6</b> °

Brzina smicanja 0,44 mm/min

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 1. 10. 2020.

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditelj odjela:
Dr. sc. Petar Hrženjak	19-013-007DSR-BFA-3-1 1. 10. 2020.	Dr. sc. Petar Hrženjak



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU baznog kuta trenja

(strana 1/1)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 30. 09. 2020.

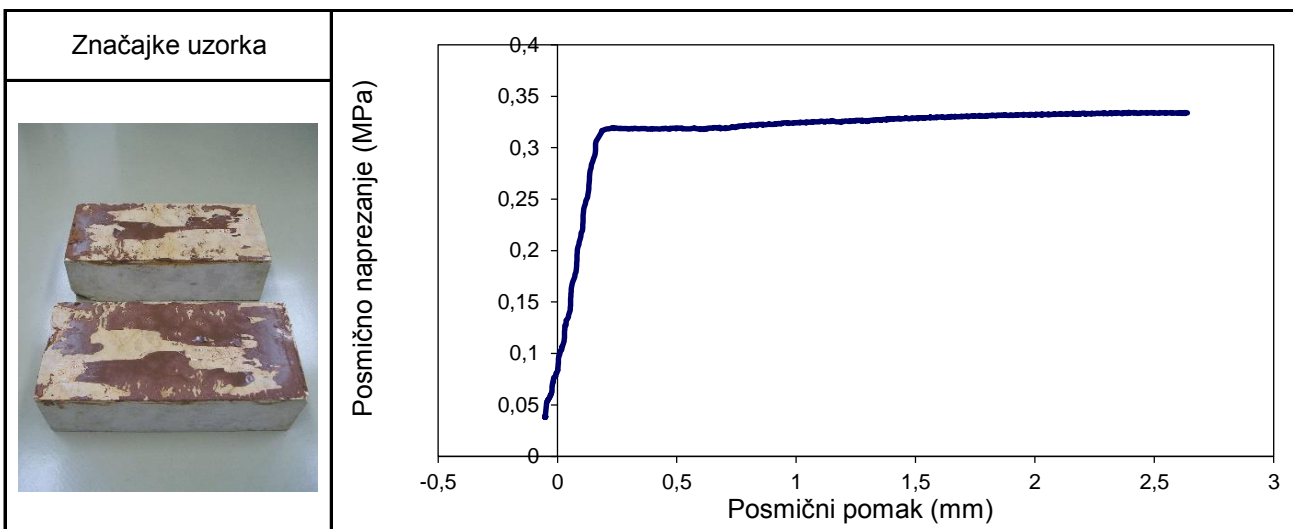
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s ispiljenom plohom koja sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) laboratorijski pripremljene na vlažnost granice tečenja debljine 2,3 mm

Lab. broj: 19-013-007 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,2	195,7	2626		



Normalno naprezanje $\sigma_n$	Posmična čvrstoća $\tau$	Bazni kut trenja $\varphi_b$
<b>1,491</b> MPa	<b>0,335</b> MPa	<b>12,6</b> °

Brzina smicanja 0,39 mm/min

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 1. 10. 2020.

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditelj odjela:
Dr. sc. Petar Hrženjak	19-013-007DSR-BFA-3-2 1. 10. 2020.	Dr. sc. Petar Hrženjak



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU baznog kuta trenja

(strana 1/1)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 30. 09. 2020.

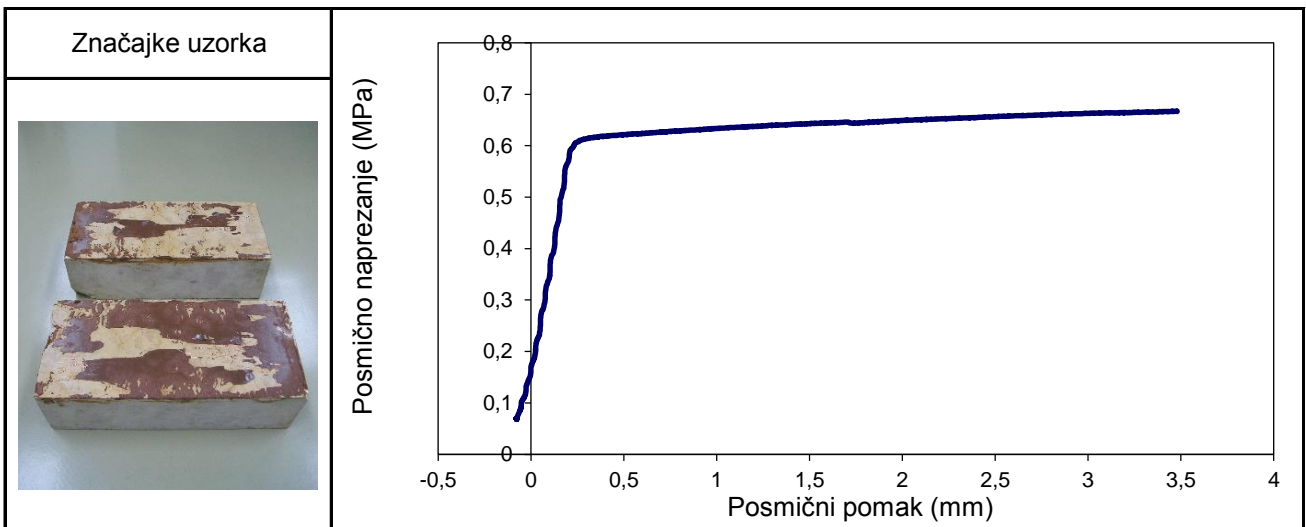
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s ispiljenom plohom koja sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) laboratorijski pripremljene na vlažnost granice tečenja debljine 2,3 mm

Lab. broj: 19-013-007 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,2	195,7	2626		



Normalno naprezanje $\sigma_n$	Posmična čvrstoća $\tau$	Bazni kut trenja $\varphi_b$
<b>2,992</b> MPa	<b>0,668</b> MPa	<b>12,6</b> °

Brzina smicanja 0,48 mm/min

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 1. 10. 2020.

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditelj odjela:
Dr. sc. Petar Hrženjak	19-013-007DSR-BFA-3-3 1. 10. 2020.	Dr. sc. Petar Hrženjak



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU baznog kuta trenja

(strana 1/1)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 1. 10. 2020.

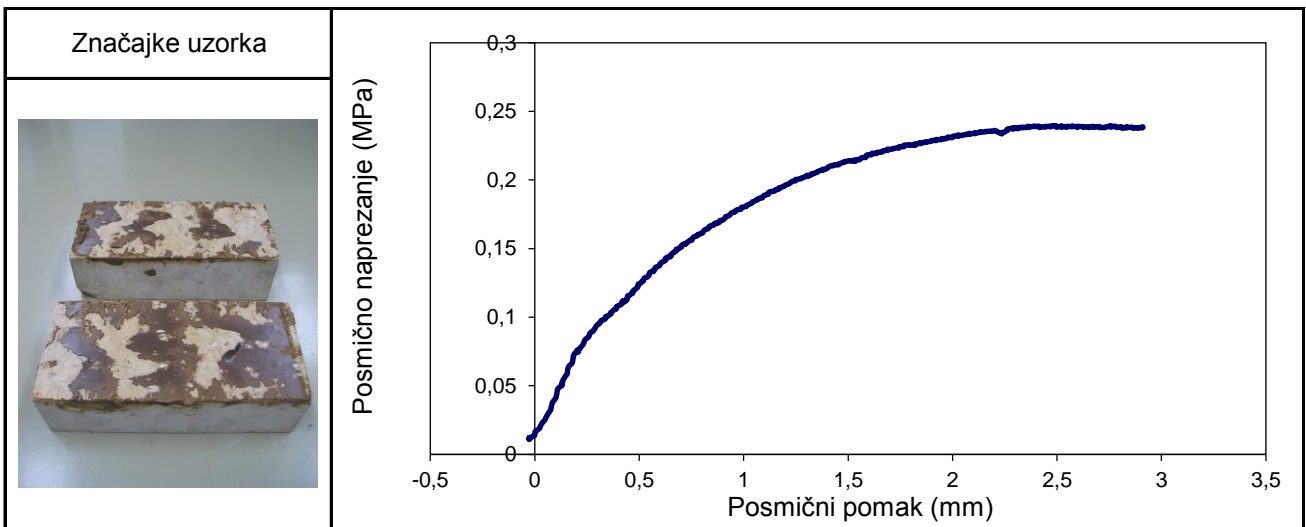
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s ispiljenom plohom koja sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) i kršja laboratorijski pripremljenog na stanje vlažnosti od 45% debljine 3 mm

Lab. broj: 19-013-007 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,2	195,7	2626		



Normalno naprezanje $\sigma_n$	Posmična čvrstoća $\tau$	Bazni kut trenja $\varphi_b$
<b>0,742</b> MPa	<b>0,240</b> MPa	<b>17,9</b> °

Brzina smicanja 0,49 mm/min

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 2. 10. 2020.

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditelj odjela:
Dr. sc. Petar Hrženjak	19-013-007DSR-BFA-4-1 2. 10. 2020.	Dr. sc. Petar Hrženjak



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU baznog kuta trenja

(strana 1/1)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 1. 10. 2020.

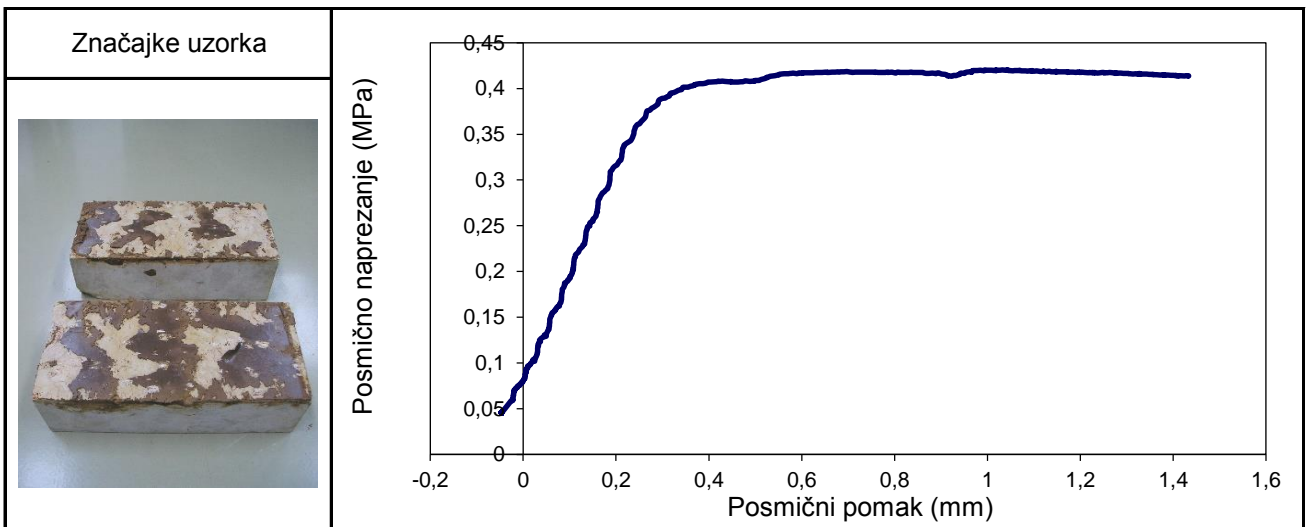
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s ispiljenom plohom koja sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) i kršja laboratorijski pripremljenog na stanje vlažnosti od 45% debljine 3 mm

Lab. broj: 19-013-007 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,2	195,7	2626		



Normalno naprezanje $\sigma_n$	Posmična čvrstoća $\tau$	Bazni kut trenja $\varphi_b$
<b>1,492</b> MPa	<b>0,420</b> MPa	<b>15,7</b> °

Brzina smicanja 0,37 mm/min

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 2. 10. 2020.

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditelj odjela:
Dr. sc. Petar Hrženjak	19-013-007DSR-BFA-4-2 2. 10. 2020.	Dr. sc. Petar Hrženjak



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU baznog kuta trenja

(strana 1/1)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 1. 10. 2020.

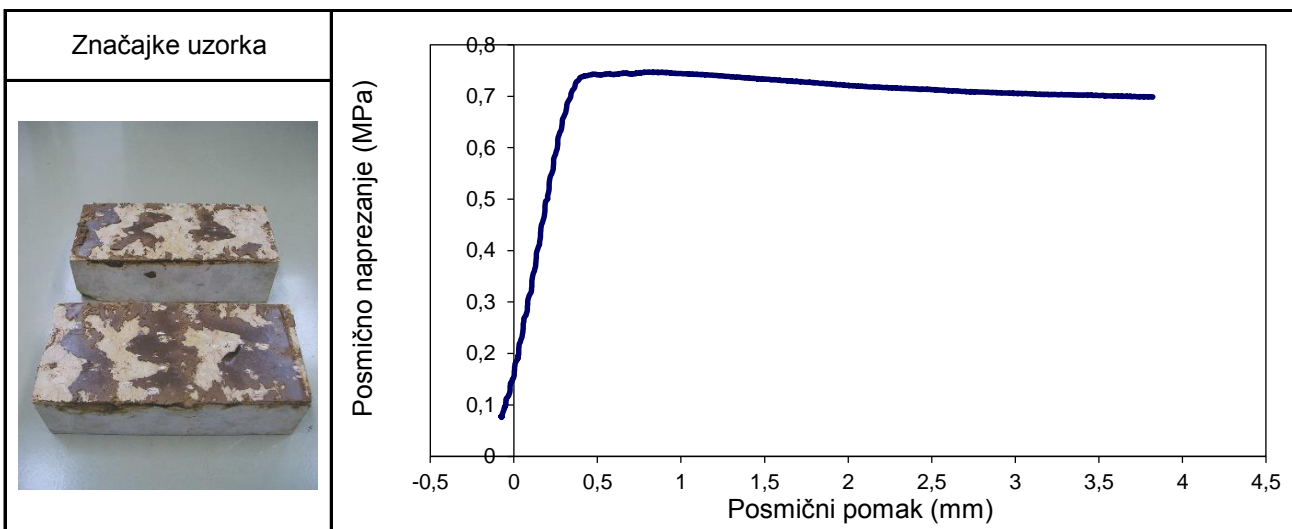
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s ispiljenom plohom koja sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) i kršja laboratorijski pripremljenog na stanje vlažnosti od 45% debljine 3 mm

Lab. broj: 19-013-007 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,2	195,7	2626		



Normalno naprezanje $\sigma_n$	Posmična čvrstoća $\tau$	Bazni kut trenja $\varphi_b$
<b>2,992</b> MPa	<b>0,747</b> MPa	<b>14,0</b> °

Brzina smicanja 0,47 mm/min

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 2. 10. 2020.

Odgovorna osoba:	Oznaka i datum izvještaja:	Voditelj odjela:
Dr. sc. Petar Hrženjak	19-013-007DSR-BFA-4-3 2. 10. 2020.	Dr. sc. Petar Hrženjak



**Prilog 5. REZULTATI ISPITIVANJA POSMIČNE ČVRSTOĆE DISKONTINUITETA  
S ISPUNOM I BEZ ISPUNE**



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 1. 10. 2020.

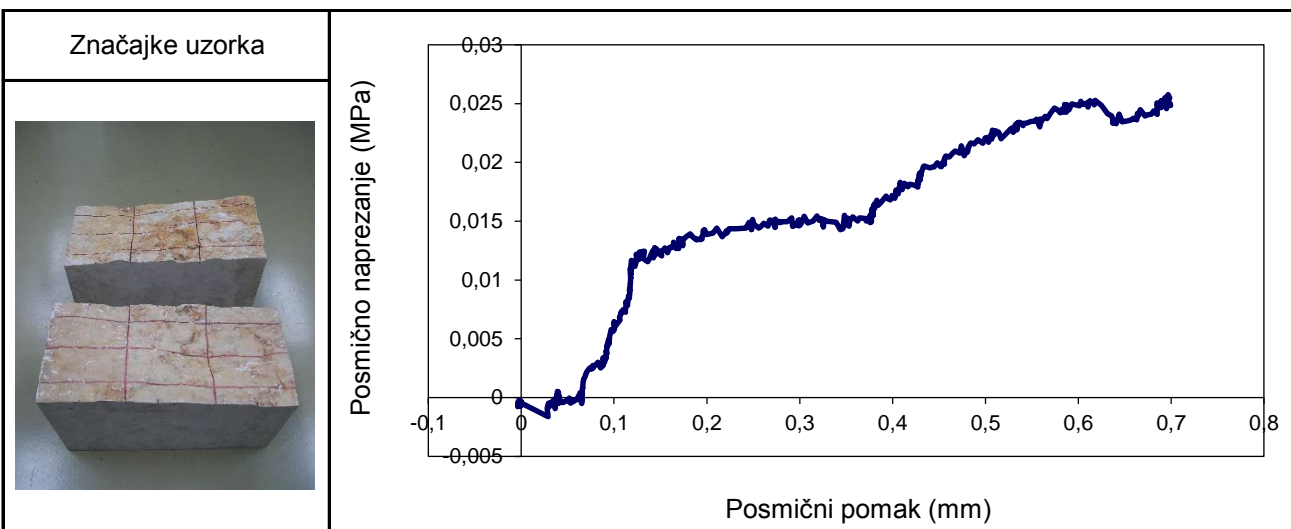
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom bez ispune

Lab. broj: 19-013-001 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,0	392,1	2563		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,017</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,026</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>56,0</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 0,697 mm Brzina smicanja: 0,18 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-001DSR-CNL-1-0 2. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



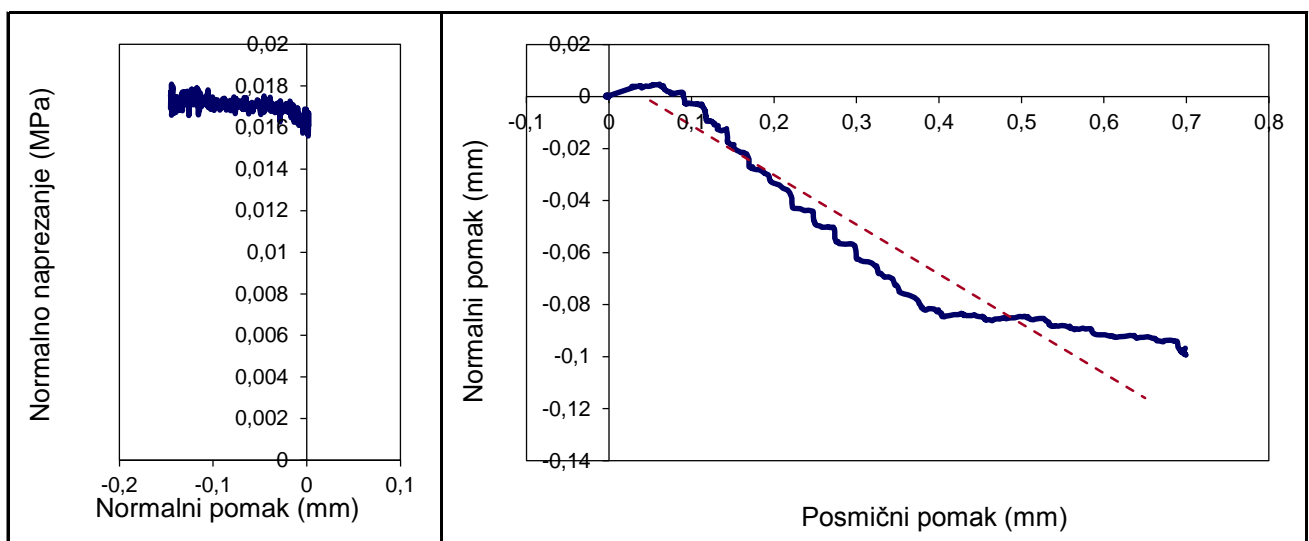
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-001 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,0	Visina $h$ (mm) 392,1	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2563		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,021</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,600</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,036</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,114</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,600</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>10,8</b> °

Zijev diskontinuiteta: 2,6 mm Amplituda hrapavosti: 13,3 mm

Debljina ispune: mm Tlačna čvrstoća JCS: 89,7 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 2. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-001DSR-CNL-1-0 2. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 7. 12. 2020.

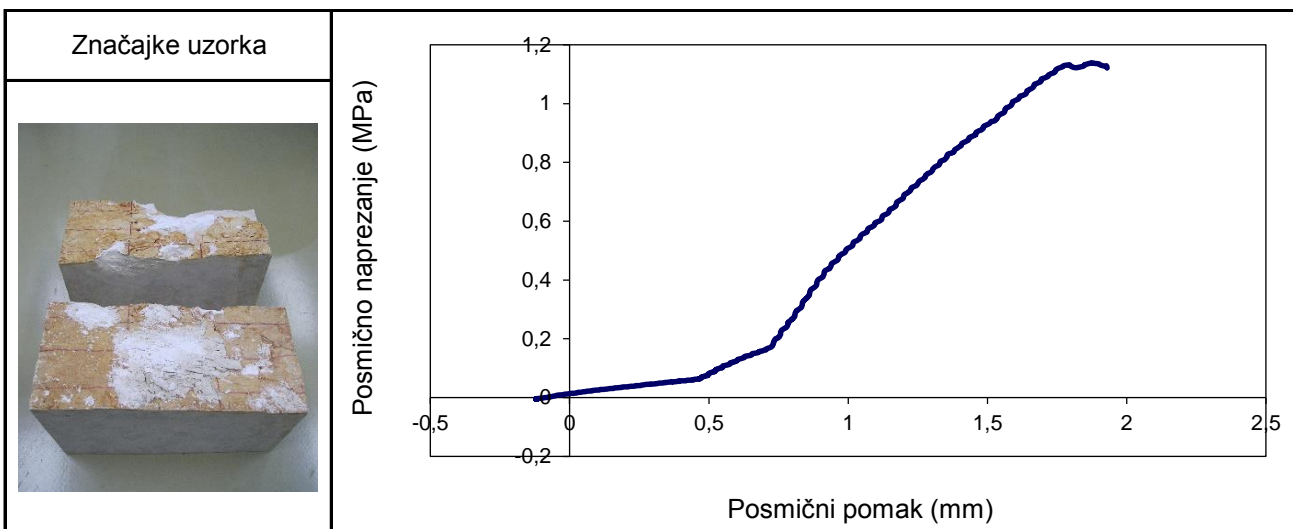
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom bez ispune

Lab. broj: 19-013-001 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,0	392,1	2563		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,819</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>1,138</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>54,3</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 1,879 mm Brzina smicanja: 0,26 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-001DSR-CNL-1-1 16. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



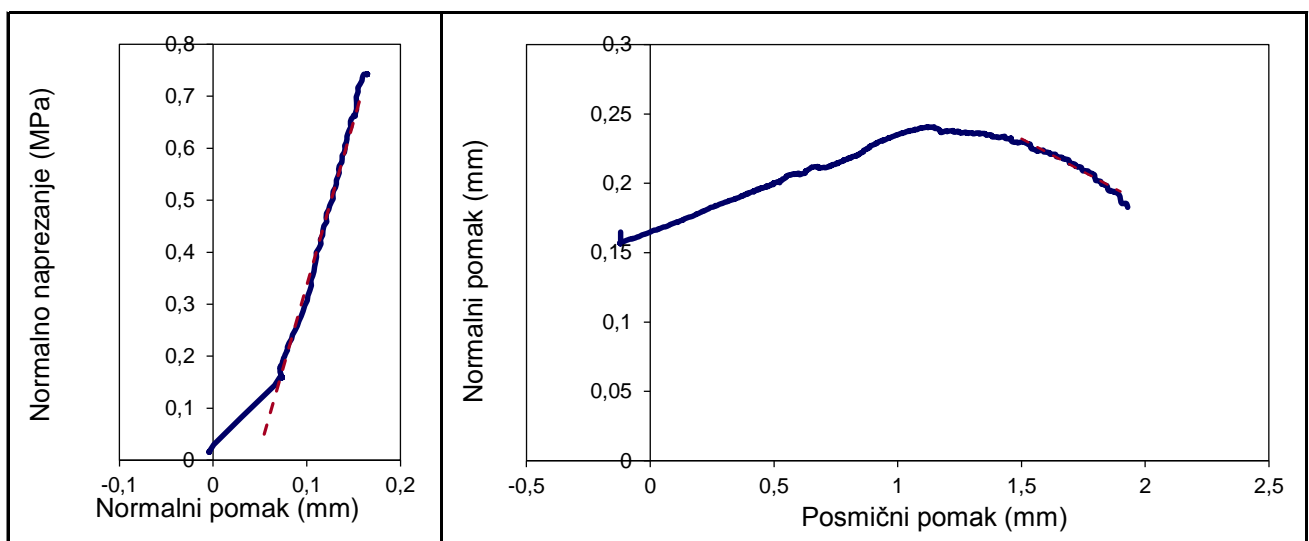
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-001 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,0	Visina $h$ (mm) 392,1	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2563		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>0,650</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,103</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>6,298</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>1,442</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,850</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,779</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,038</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,400</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>5,4</b> °

Zijev diskontinuiteta: 2,6 mm Amplituda hrapavosti: 13,3 mm

Debljina ispune: mm Tlačna čvrstoća JCS: 89,7 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 5%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 8. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-001DSR-CNL-1-1 16. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 7. 12. 2020.

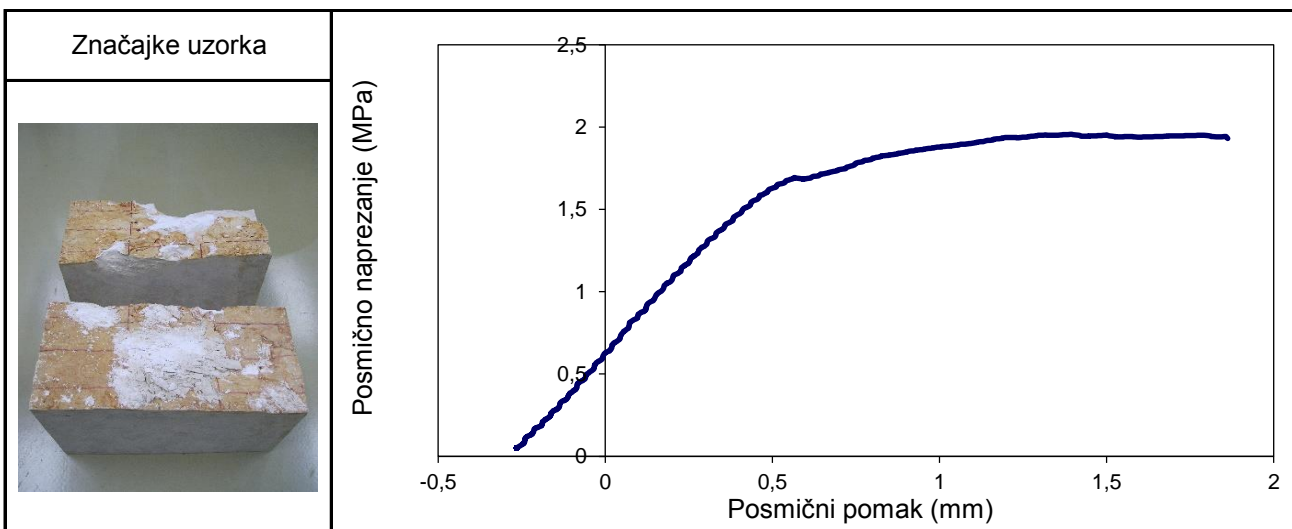
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom bez ispune

Lab. broj: 19-013-001 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,0	392,1	2563		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>1,634</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>1,957</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>50,1</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 1,396 mm Brzina smicanja: 0,29 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-001DSR-CNL-1-2 16. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



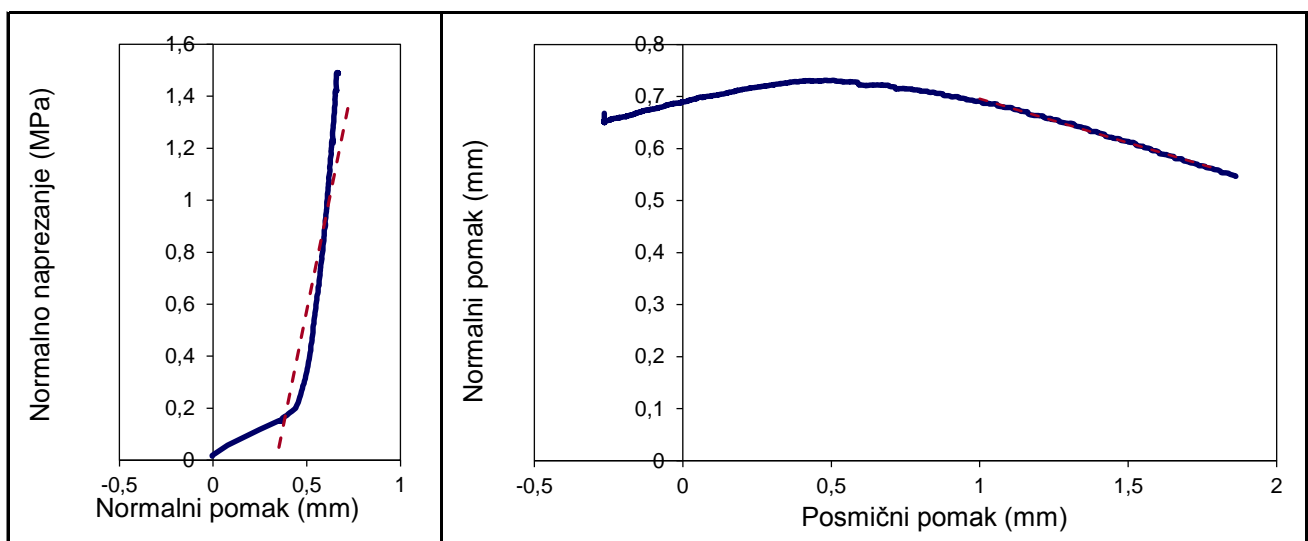
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-001 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,0	Visina $h$ (mm) 392,1	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2563		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>1,350</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,380</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>3,552</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>1,182</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,050</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>1,126</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,136</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,800</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>9,6</b> °

Zijev diskontinuiteta: 2,6 mm Amplituda hrapavosti: 13,3 mm

Debljina ispune: mm Tlačna čvrstoća JCS: 89,7 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 10%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 8. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-001DSR-CNL-1-2 16. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 7. 12. 2020.

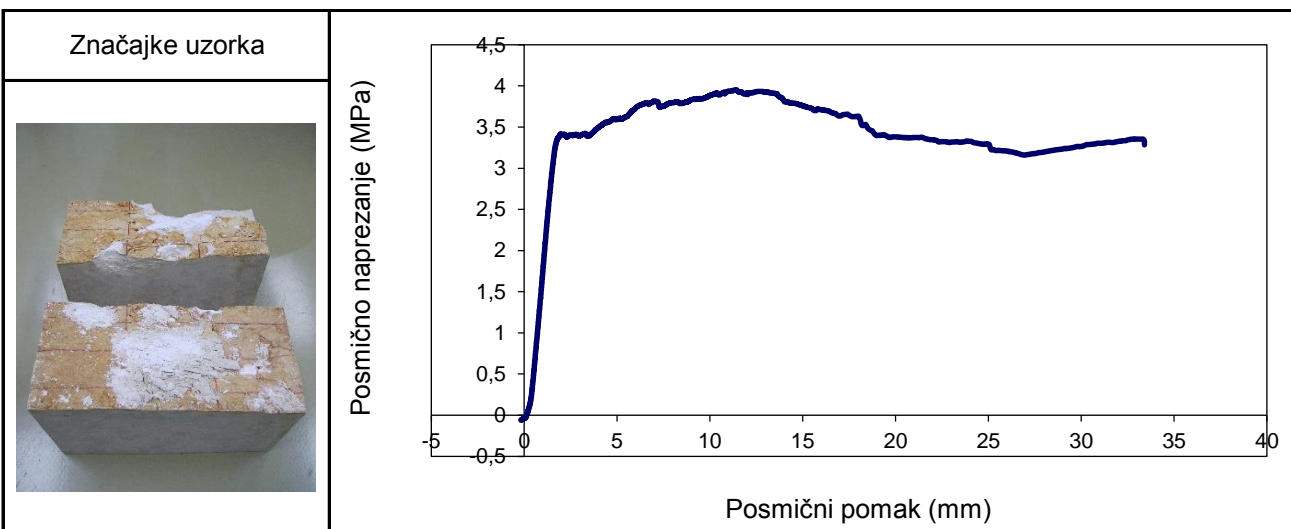
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom bez ispune

Lab. broj: 19-013-001 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,0	392,1	2563		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>3,288</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>3,952</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>50,2</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 11,432 mm Brzina smicanja: 0,33 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-001DSR-CNL-1-3 16. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--





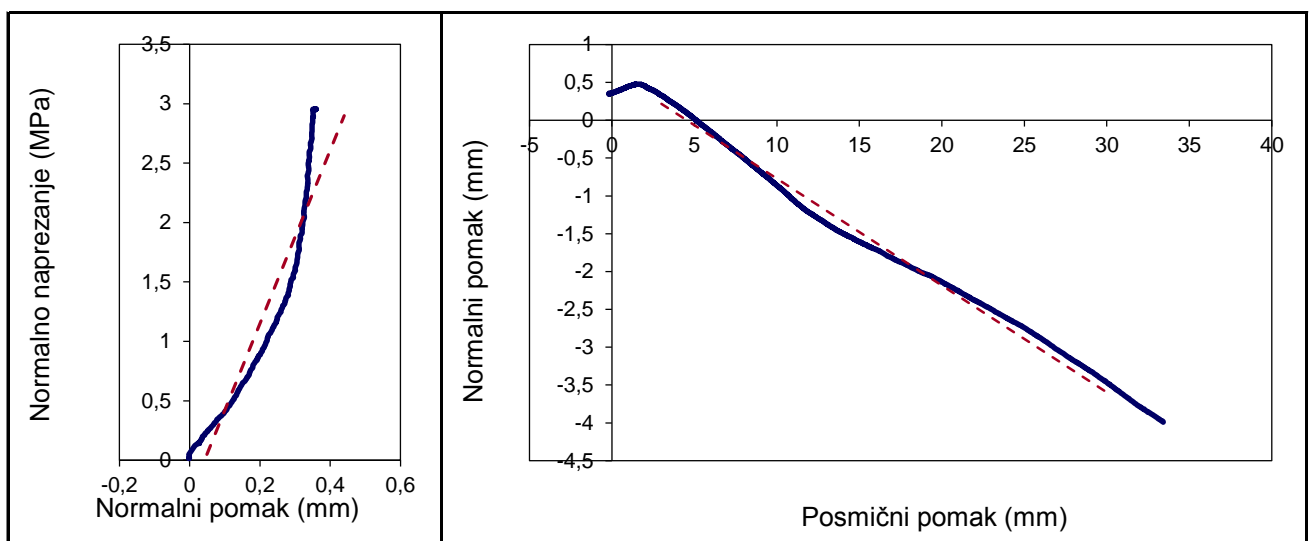
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-001 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,0	Visina $h$ (mm) 392,1	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2563		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>2,850</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,392</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>7,275</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>4,004</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>4,150</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,965</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-3,814</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>27,000</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>8,0</b> °

Zijev diskontinuiteta: 2,6 mm Amplituda hrapavosti: 13,3 mm

Debljina ispune: mm Tlačna čvrstoća JCS: 89,7 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 40%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 8. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-001DSR-CNL-1-3 16. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 1. 10. 2020.

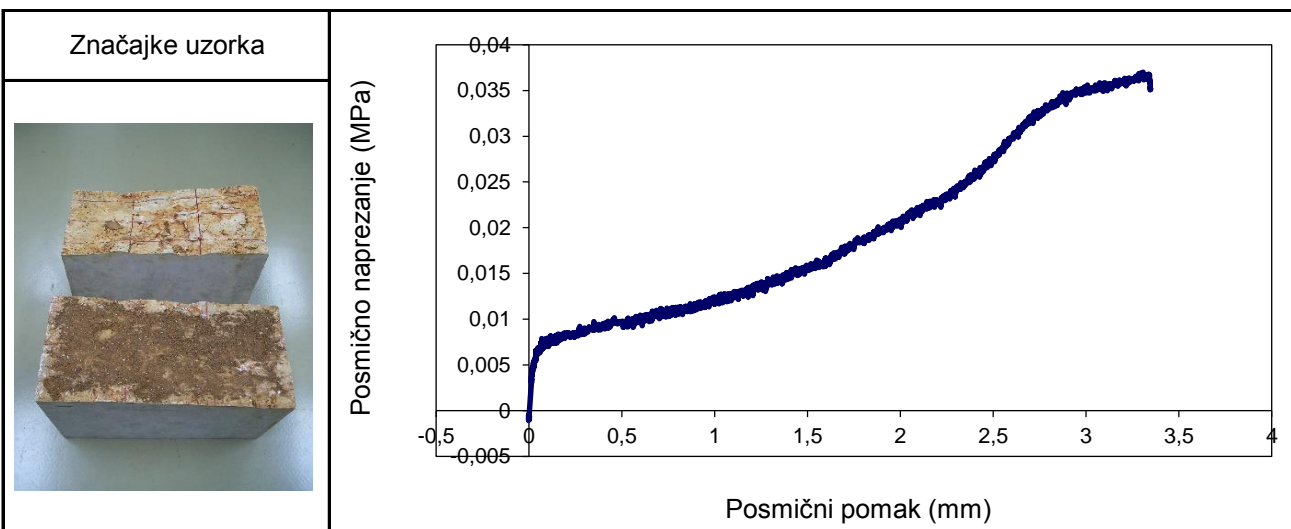
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna < 2 mm u suhom stanju

Lab. broj: 19-013-001 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,0	392,1	2563		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,017</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,037</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>64,8</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 3,308 mm Brzina smicanja: 0,19 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-001DSR-CNL-2-0 2. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



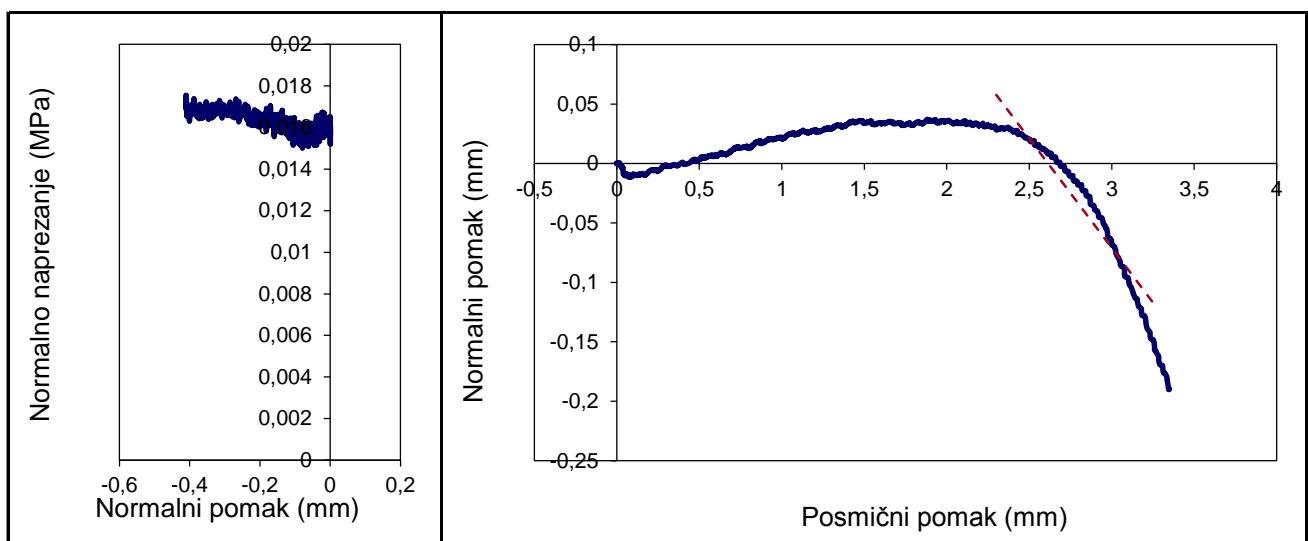
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-001 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,0	Visina $h$ (mm) 392,1	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2563		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,030</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>3,200</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,009</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,175</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,950</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>10,4</b> °

Zijev diskontinuiteta: 3,2 mm Amplituda hrapavosti: 13,3 mm

Debljina ispune: 3,2 mm Tlačna čvrstoća JCS: 89,7 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 2. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-001DSR-CNL-2-0 2. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 1. 10. 2020.

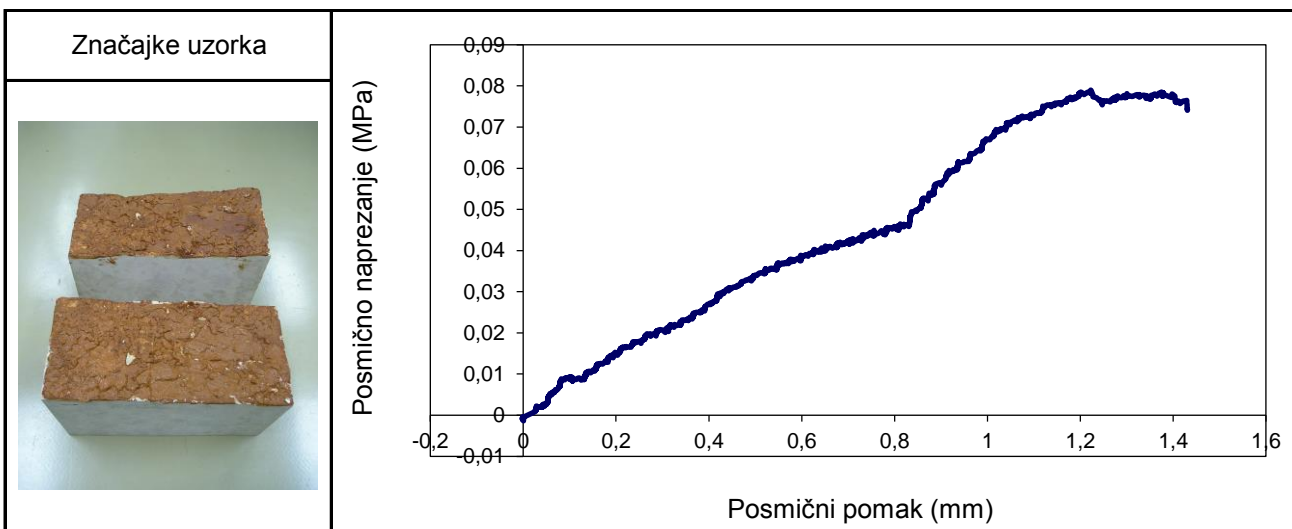
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) laboratorijski pripremljene na vlažnost granice tečenja ( $w_l=70\%$ )

Lab. broj: 19-013-001 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,0	392,1	2563		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,021</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,079</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>75,2</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 1,223 mm Brzina smicanja: 0,15 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-001DSR-CNL-3-0 2. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



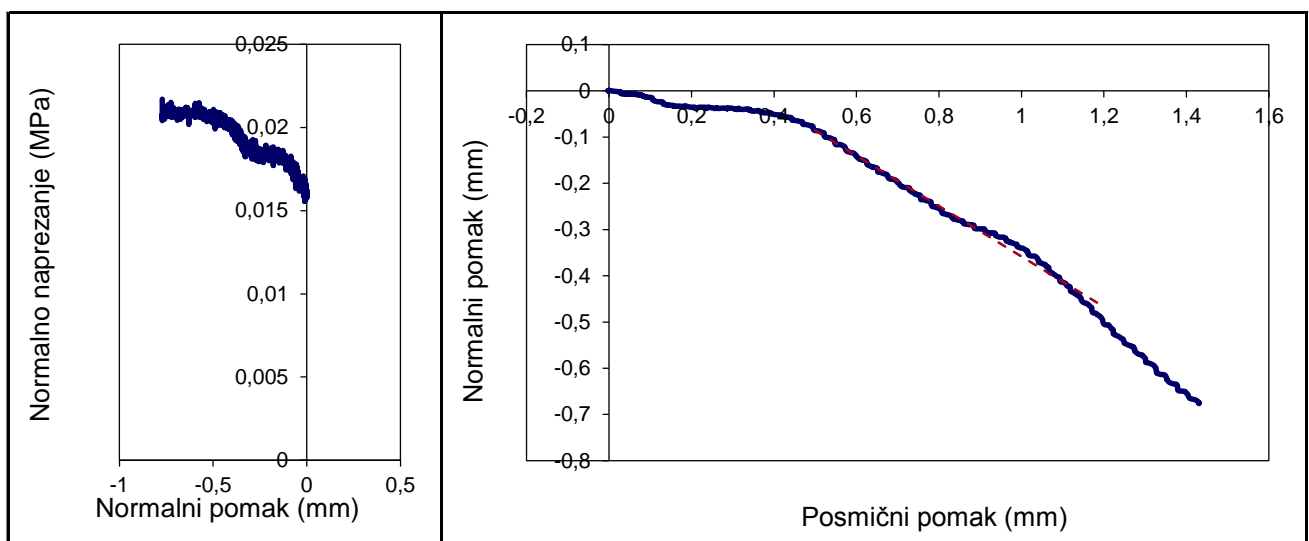
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-001 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,0	Visina $h$ (mm) 392,1	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2563		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,072</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,150</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,063</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,382</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,700</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>28,6</b> °

Zijev diskontinuiteta: 2,6 mm Amplituda hrapavosti: 13,3 mm

Debljina ispune: 2,4 mm Tlačna čvrstoća JCS: 89,7 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 2. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-001DSR-CNL-3-0 2. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 1. 10. 2020.

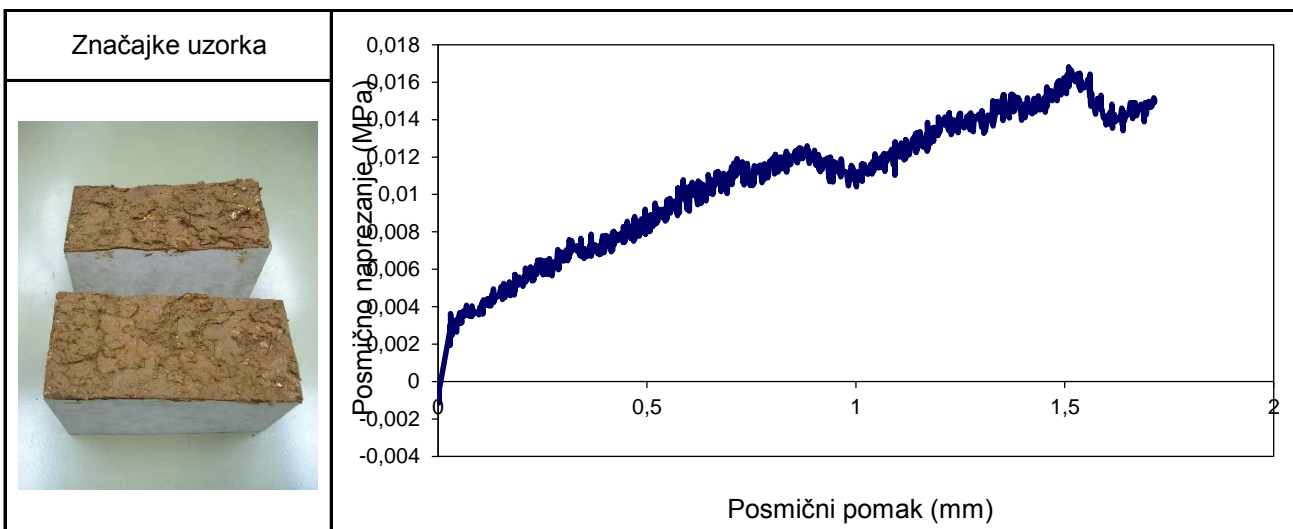
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) i kršja laboratorijski pripremljenog na stanje vlažnosti od 45%

Lab. broj: 19-013-001 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,0	392,1	2563		



Normalno naprežanje $\sigma_n$ <b>0,016</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,017</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>46,3</b> °
Normalno naprežanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 1,509 mm Brzina smicanja: 0,16 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-001DSR-CNL-4-0 2. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



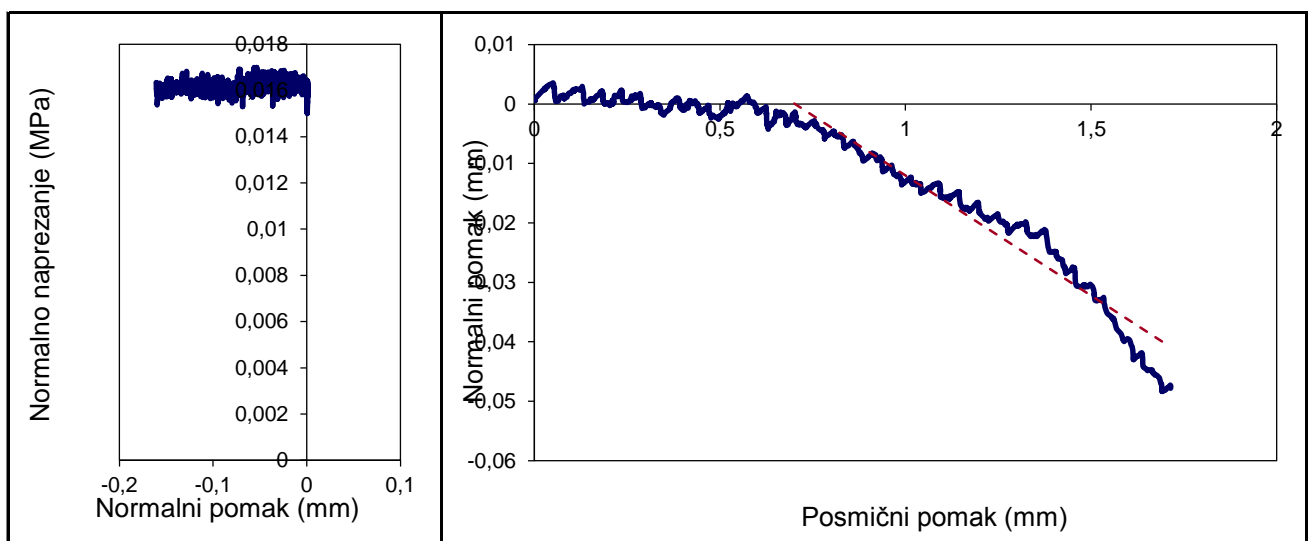
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-001 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,0	Visina $h$ (mm) 392,1	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2563		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,011</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,400</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,008</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,040</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,000</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>2,3</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,1 mm Amplituda hrapavosti: 13,3 mm

Debljina ispune: 4,1 mm Tlačna čvrstoća JCS: 89,7 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 2. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-001DSR-CNL-4-0 2. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 2. 10. 2020.

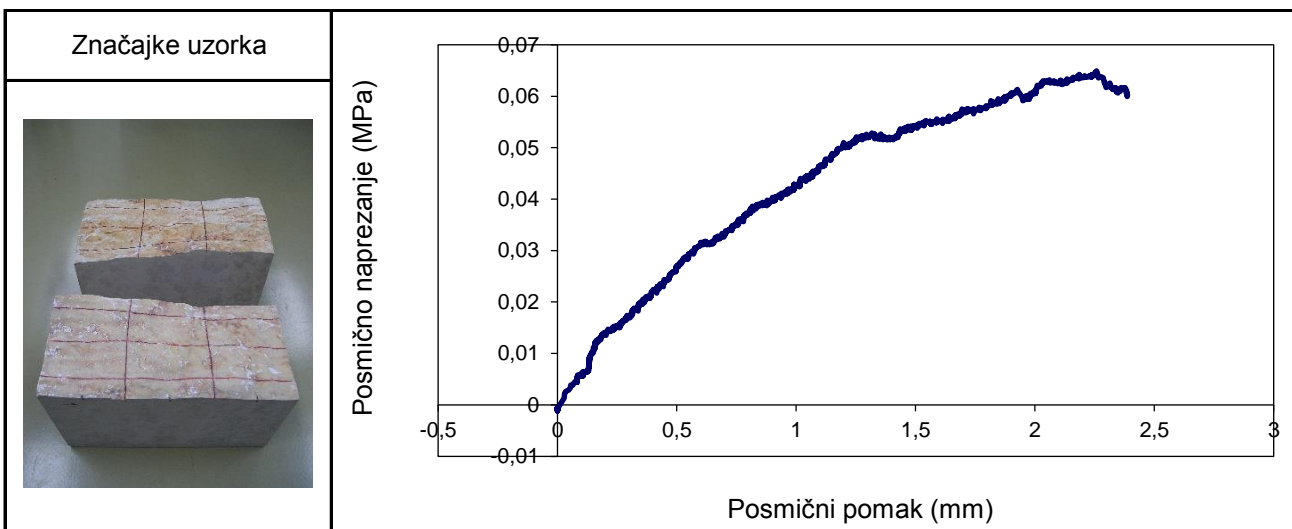
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i  
karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom bez ispune

Lab. broj: 19-013-002 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,5	383,5	2619		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,019</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,065</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>73,3</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 2,257 mm Brzina smicanja: 0,20 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-002DSR-CNL-1-0 5. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--





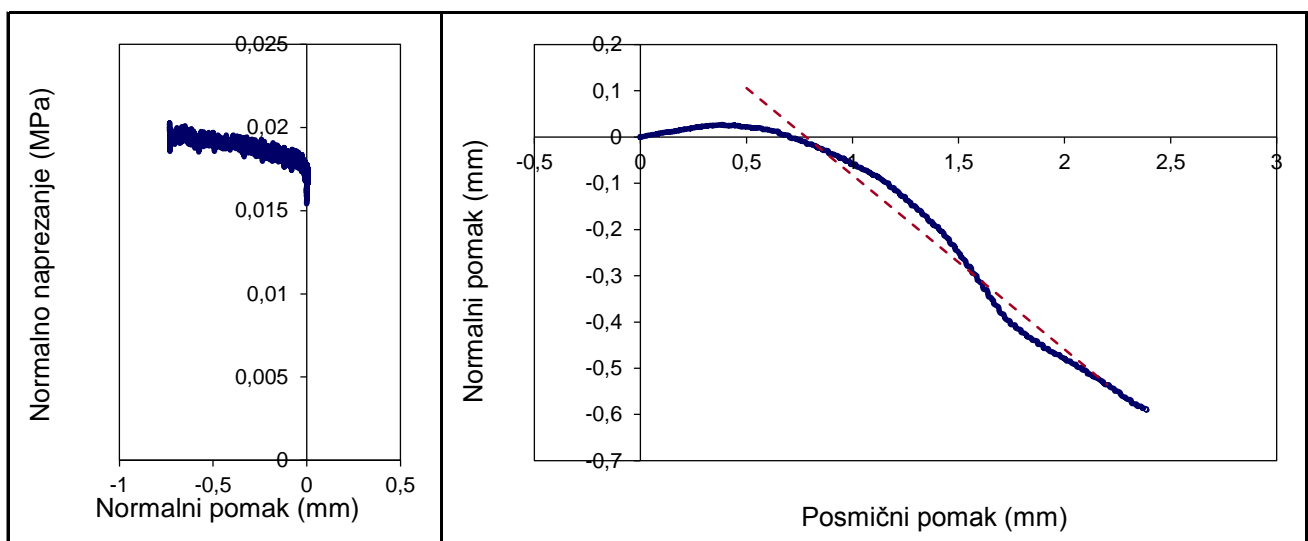
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-002 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,5	Visina $h$ (mm) 383,5	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2619		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,059</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,150</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,028</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,641</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,700</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>20,6</b> °

Zijev diskontinuiteta: 2,8 mm Amplituda hrapavosti: 10,5 mm

Debljina ispune: mm Tlačna čvrstoća JCS: 97,8 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 5. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-002DSR-CNL-1-0 5. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 2. 10. 2020.

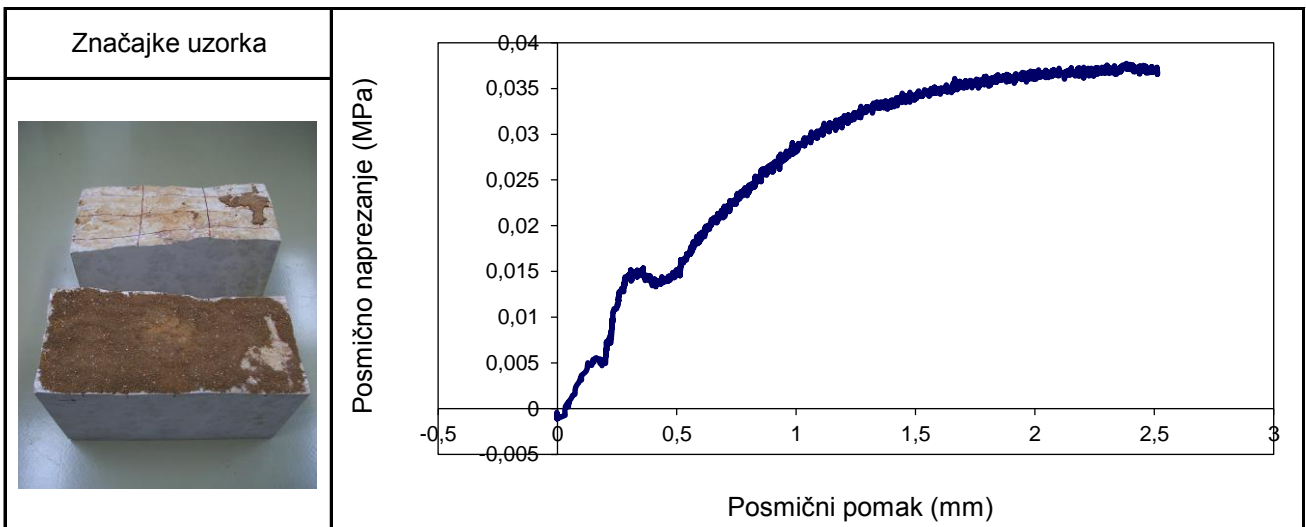
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna < 2 mm u suhom stanju

Lab. broj: 19-013-002 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,5	383,5	2619		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,018</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,038</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>64,7</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 2,384 mm Brzina smicanja: 0,17 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-002DSR-CNL-2-0 5. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



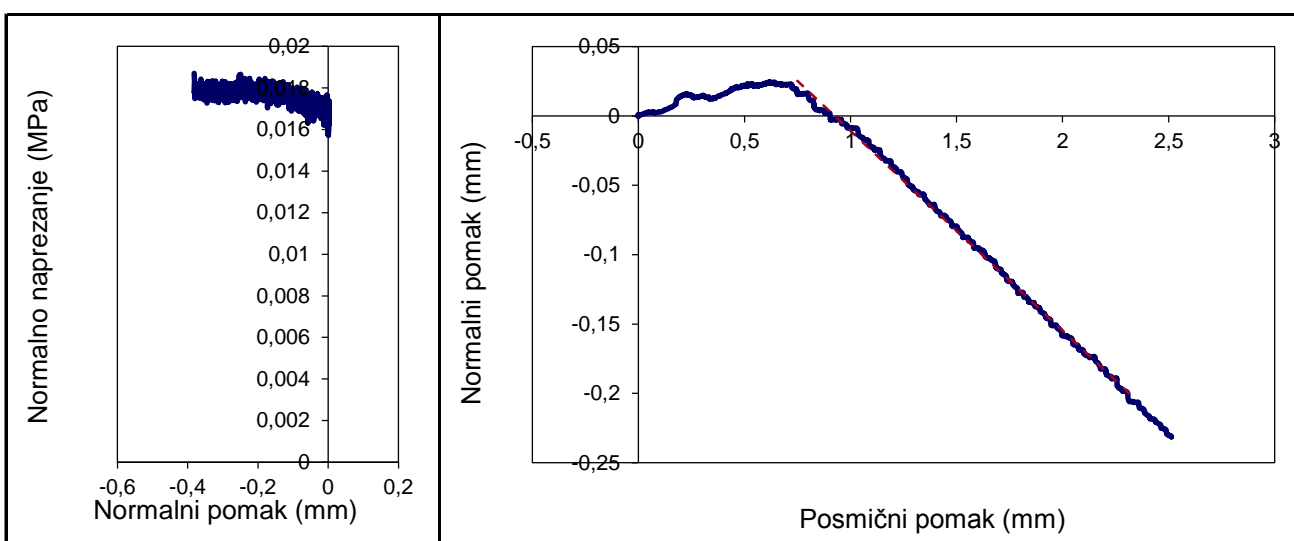
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-002 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,5	Visina $h$ (mm) 383,5	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2619		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,032</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,300</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,014</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,230</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,600</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>8,2</b> °

Zijev diskontinuiteta: 3,2 mm Amplituda hrapavosti: 10,5 mm

Debljina ispune: 3,2 mm Tlačna čvrstoća JCS: 97,8 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 5. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-002DSR-CNL-2-0 5. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 8. 12. 2020.

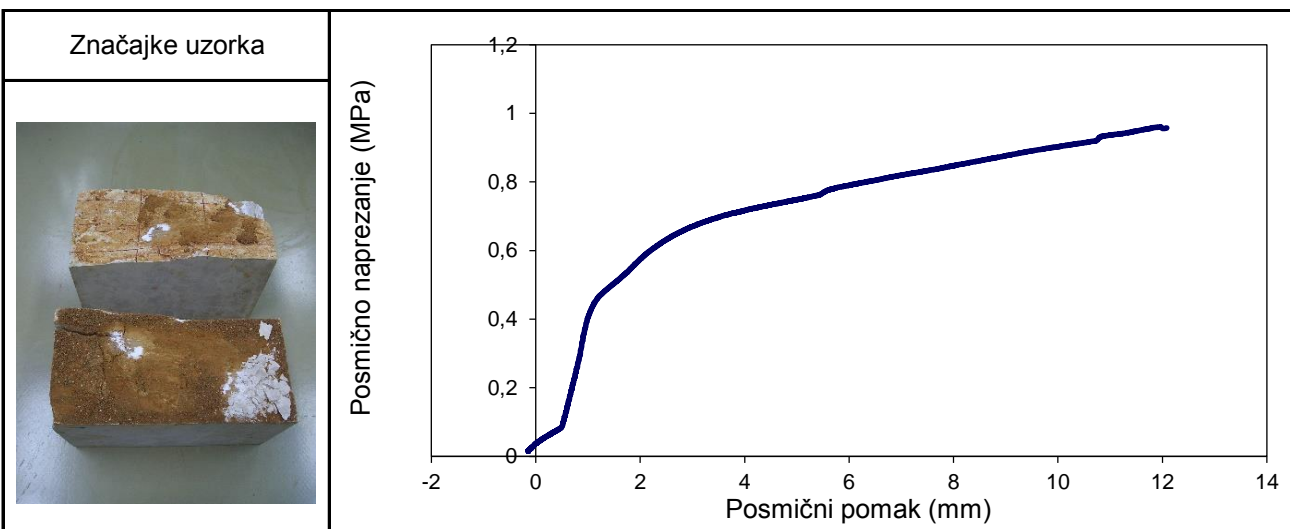
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna < 2 mm u suhom stanju

Lab. broj: 19-013-002 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,5	383,5	2619		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,813</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,961</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>49,8</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 11,974 mm Brzina smicanja: 0,34 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-002DSR-CNL-2-1 17. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



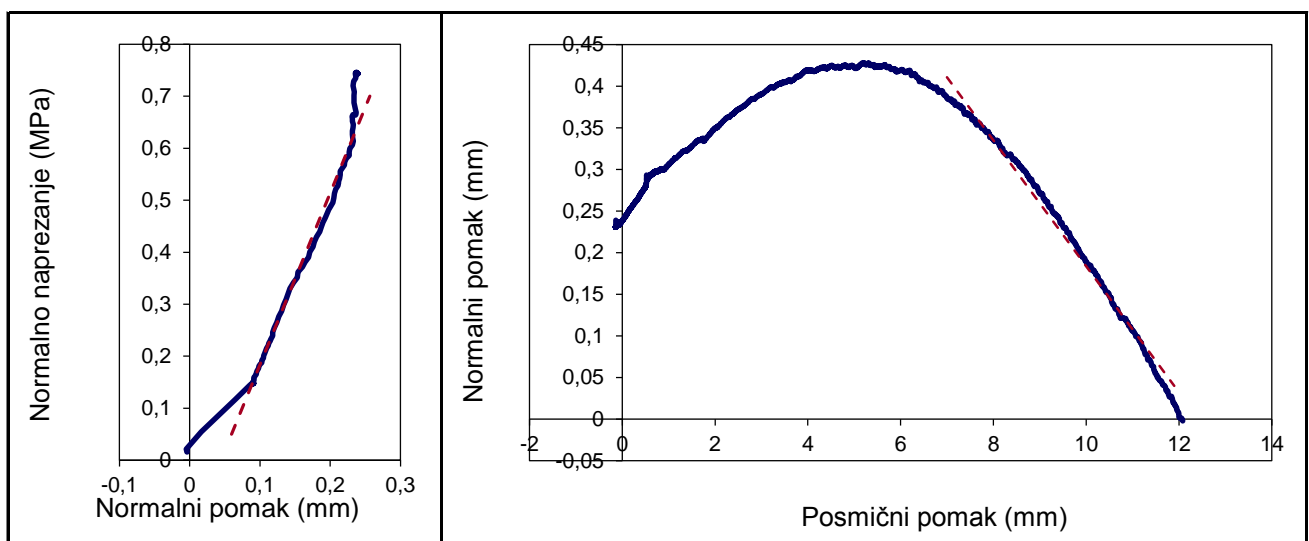
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-002 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,5	Visina $h$ (mm) 383,5	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2619		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>0,650</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,197</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>3,297</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,823</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>9,950</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,083</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,371</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>4,900</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>4,3</b> °

Zijev diskontinuiteta: 3,2 mm Amplituda hrapavosti: 10,5 mm

Debljina ispune: 3,2 mm Tlačna čvrstoća JCS: 97,8 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 5%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 9. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-002DSR-CNL-2-1 17. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 8. 12. 2020.

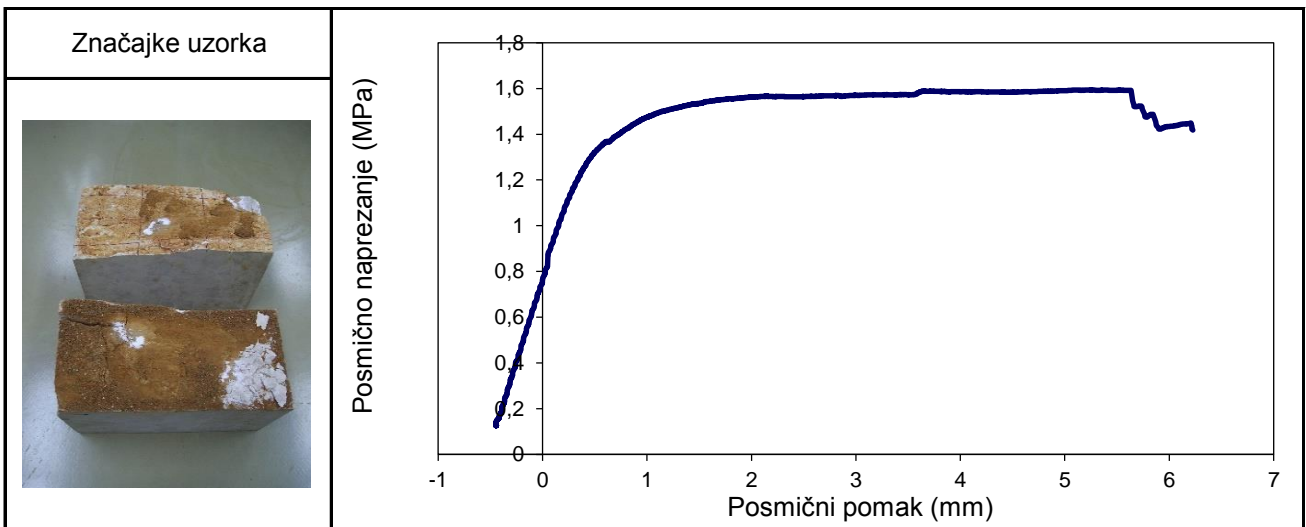
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna < 2 mm u suhom stanju

Lab. broj: 19-013-002 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,5	383,5	2619		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>1,605</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>1,594</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>44,8</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 5,266 mm Brzina smicanja: 0,33 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-002DSR-CNL-2-2 17. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



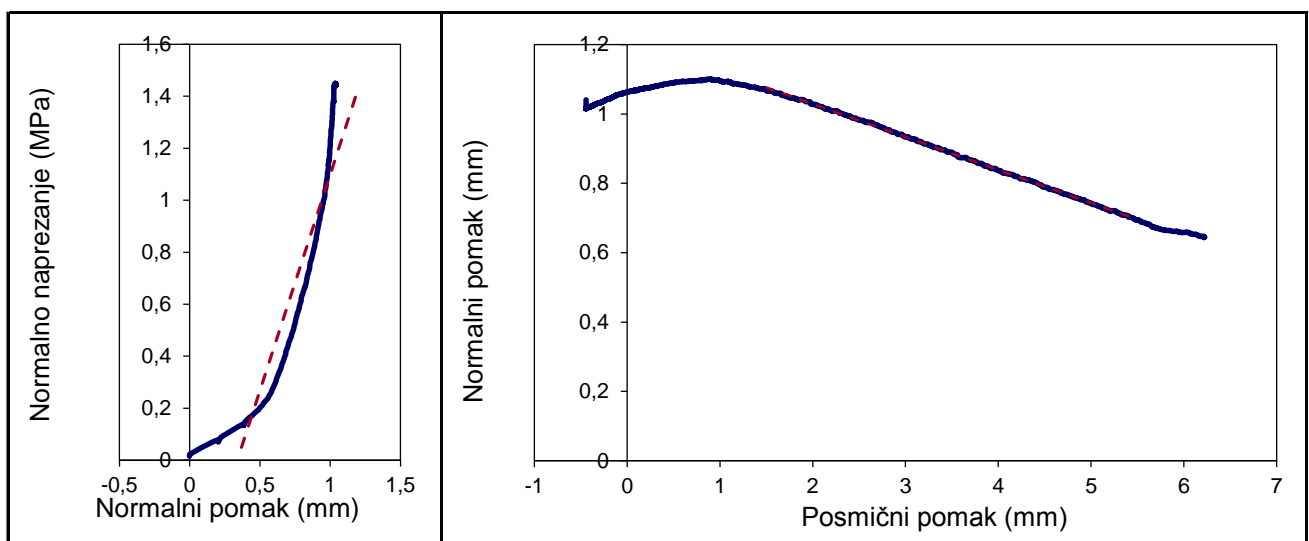
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-002 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,5	Visina $h$ (mm) 383,5	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2619		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>1,350</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,813</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>1,660</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,566</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,150</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,263</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,380</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>4,000</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>5,4</b> °

Zijev diskontinuiteta: 3,2 mm Amplituda hrapavosti: 10,5 mm

Debljina ispune: 3,2 mm Tlačna čvrstoća JCS: 97,8 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 10%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 9. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-002DSR-CNL-2-2 17. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 8. 12. 2020.

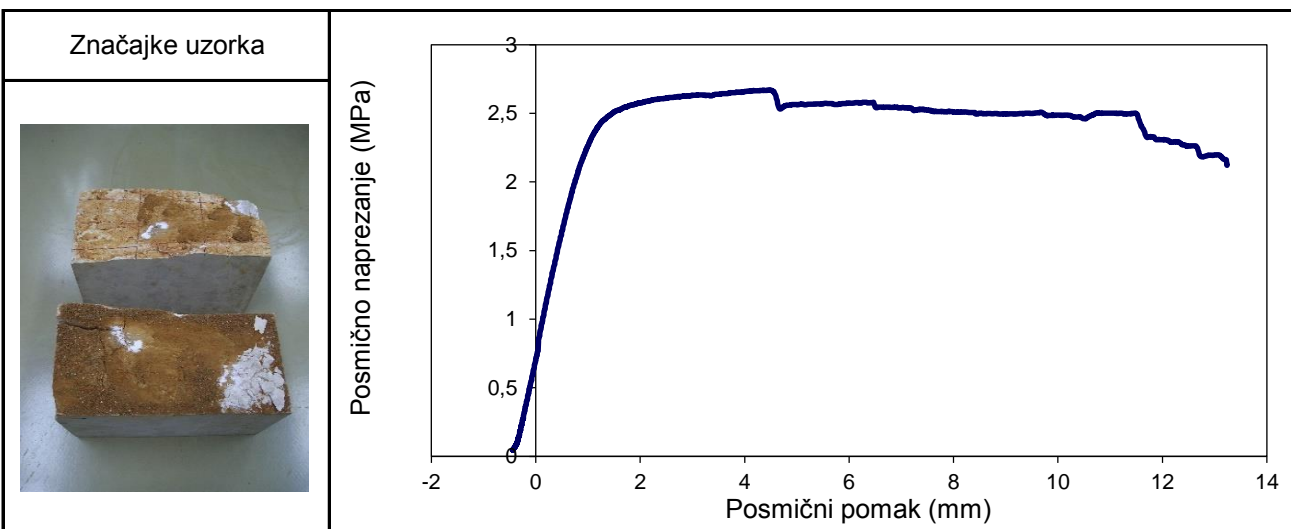
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna < 2 mm u suhom stanju

Lab. broj: 19-013-002 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,5	383,5	2619		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>3,174</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>2,671</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>40,1</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 4,468 mm Brzina smicanja: 0,39 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-002DSR-CNL-2-3 17. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--





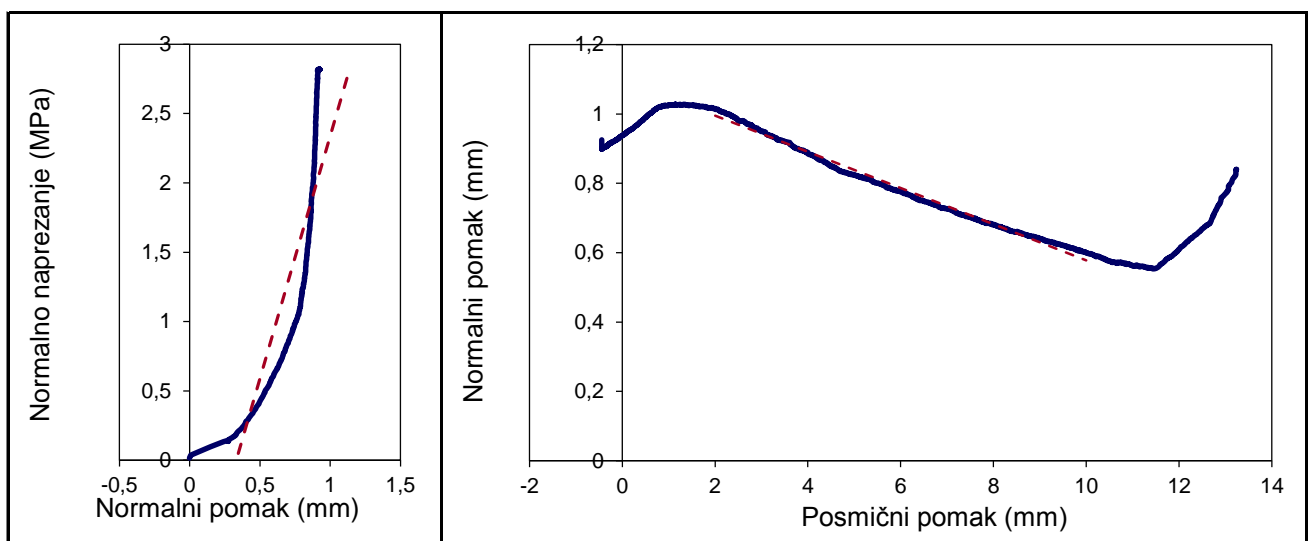
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-002 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,5	Visina $h$ (mm) 383,5	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2619		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>2,750</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,786</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>3,499</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>1,663</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>3,150</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,528</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,417</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>8,000</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>3,0</b> °

Zijev diskontinuiteta: 3,2 mm Amplituda hrapavosti: 10,5 mm

Debljina ispune: 3,2 mm Tlačna čvrstoća JCS: 97,8 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 15%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 9. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-002DSR-CNL-2-3 17. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 2. 10. 2020.

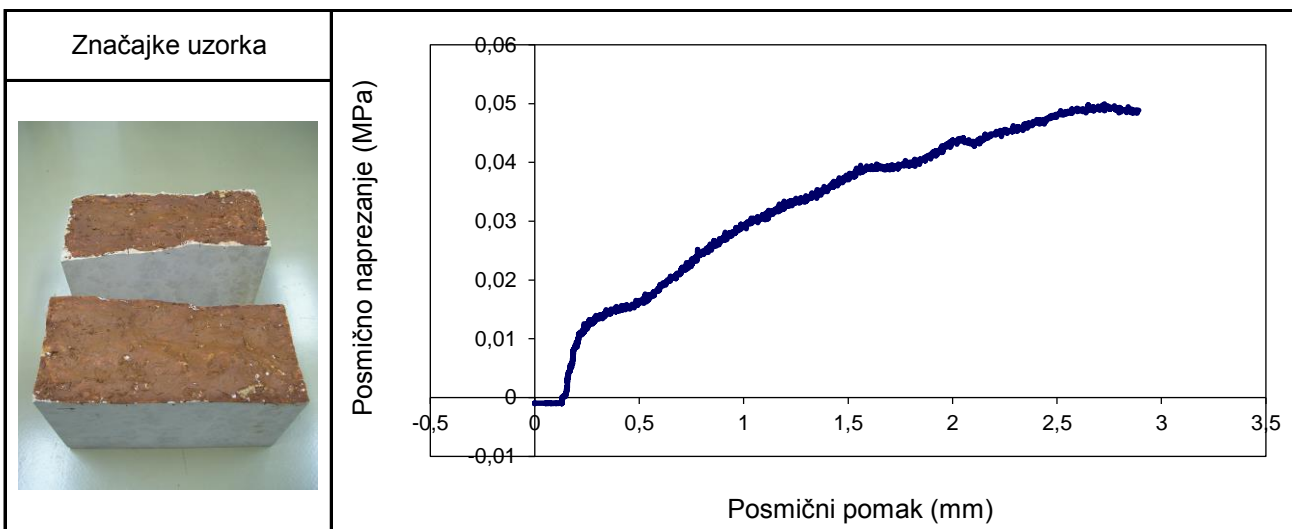
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) laboratorijski pripremljene na vlažnost granice tečenja ( $w_l=70\%$ )

Lab. broj: 19-013-002 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,5	383,5	2619		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,019</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,050</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>69,4</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 2,727 mm Brzina smicanja: 0,18 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-002DSR-CNL-3-0 5. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



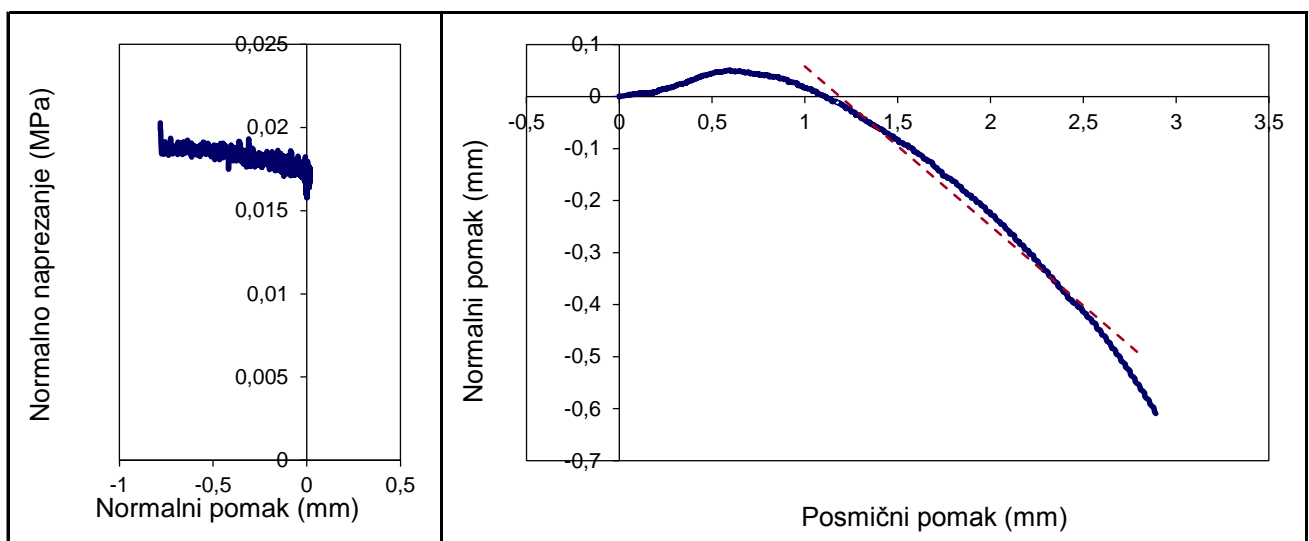
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-002 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,5	Visina $h$ (mm) 383,5	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2619		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,049</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,650</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,018</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,552</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,800</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>17,0</b> °

Zijev diskontinuiteta: 2,8 mm Amplituda hrapavosti: 10,5 mm

Debljina ispune: 2 mm Tlačna čvrstoća JCS: 97,8 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 5. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-002DSR-CNL-3-0 5. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 2. 10. 2020.

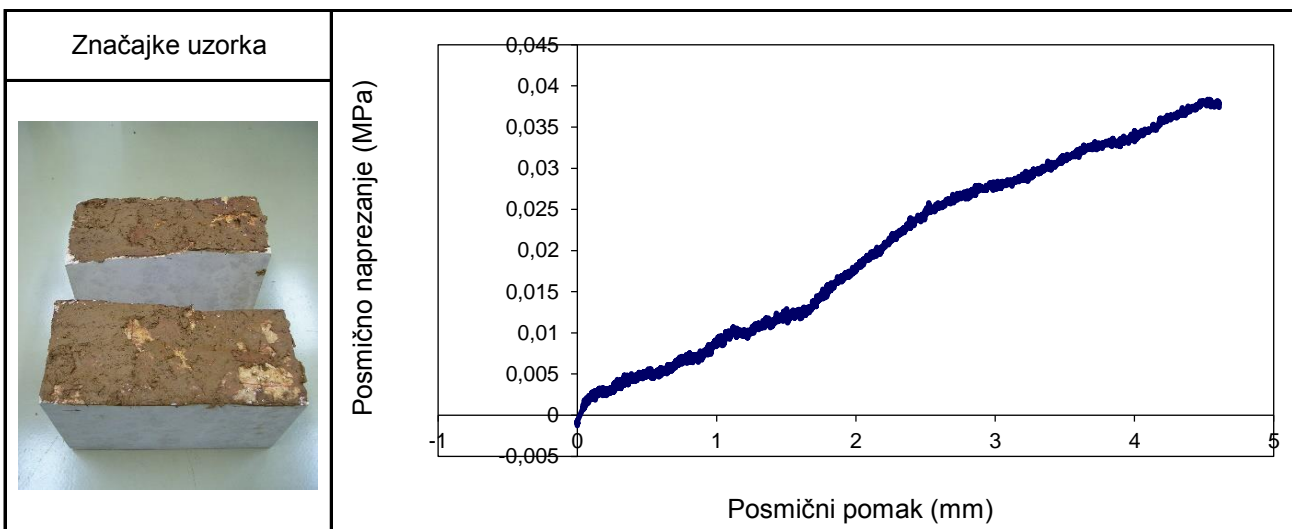
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) i kršja laboratorijski pripremljenog na stanje vlažnosti od 45%

Lab. broj: 19-013-002 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,5	383,5	2619		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,018</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,038</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>64,8</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 4,525 mm Brzina smicanja: 0,23 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-002DSR-CNL-4-0 5. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



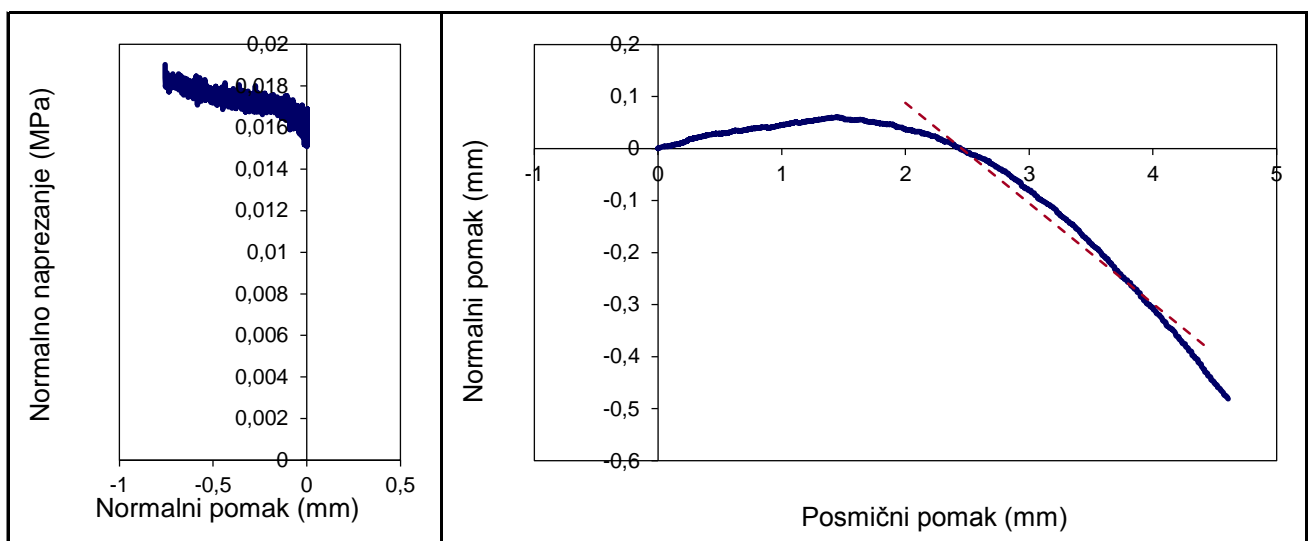
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-002 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,5	Visina $h$ (mm) 383,5	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2619		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,038</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>4,400</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,009</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,473</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,450</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>10,9</b> °

Zijev diskontinuiteta: 2,8 mm Amplituda hrapavosti: 10,5 mm

Debljina ispune: 2,5 mm Tlačna čvrstoća JCS: 97,8 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 5. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-002DSR-CNL-4-0 5. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.

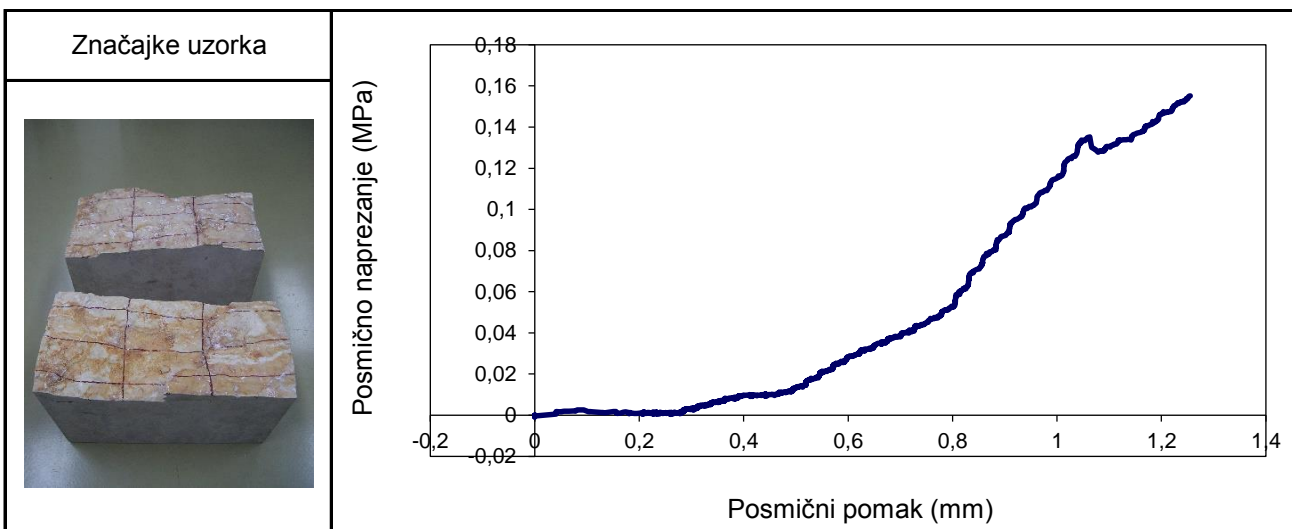
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom bez ispune

Lab. broj: 19-013-003 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,6	300,4	383,9	2603		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,021</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,155</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>82,4</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 1,255 mm Brzina smicanja: 0,10 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-003DSR-CNL-1-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



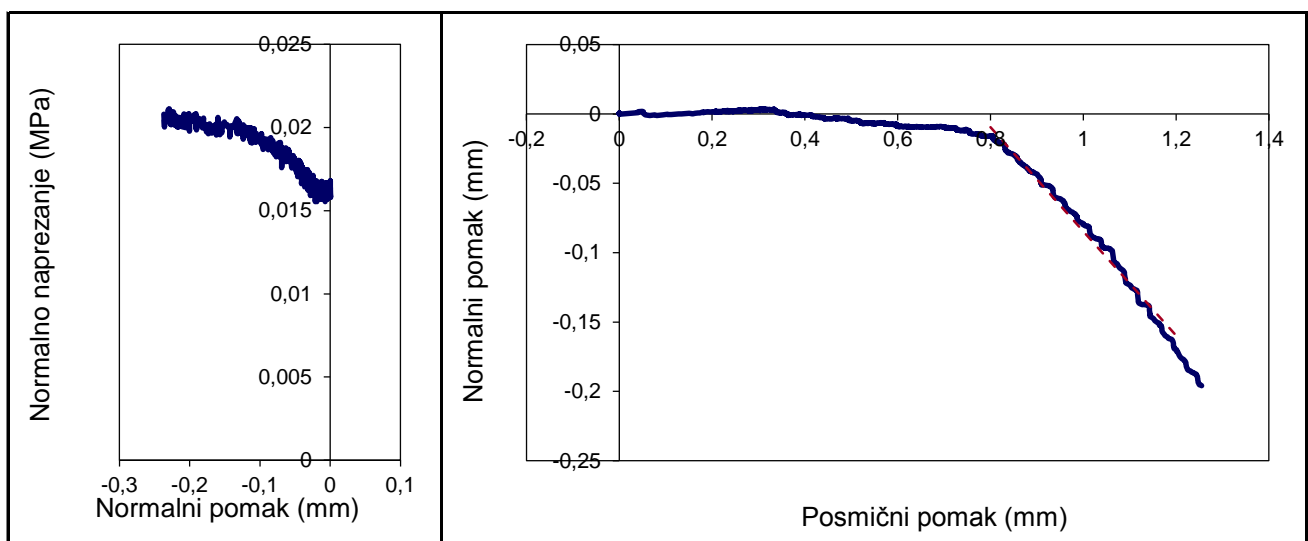
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog napreznja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-003 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,6	Duljina $l$ (mm) 300,4	Visina $h$ (mm) 383,9	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2603		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno napreznje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično napreznje $\Delta\tau_s$ <b>0,167</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,150</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,145</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,150</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,400</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>20,6</b> °

Zijev diskontinuiteta: 3,5 mm Amplituda hrapavosti: 29,6 mm

Debljina ispune: mm Tlačna čvrstoća JCS: 94,6 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 6. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-003DSR-CNL-1-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--

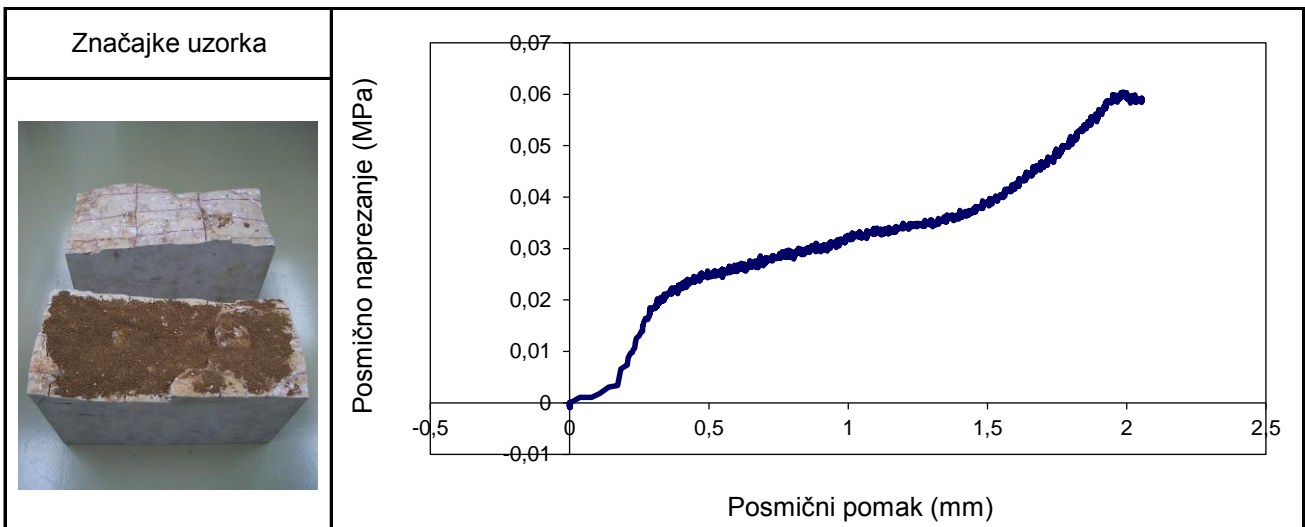


## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.  
Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb  
Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima  
Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -  
Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.  
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti  
Geogr. porijeklo: Kanfanar  
Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna < 2 mm u suhom stanju  
Lab. broj: 19-013-003 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,6	300,4	383,9	2603		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,018</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,060</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>73,7</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 1,987 mm Brzina smicanja: 0,14 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-003DSR-CNL-2-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--





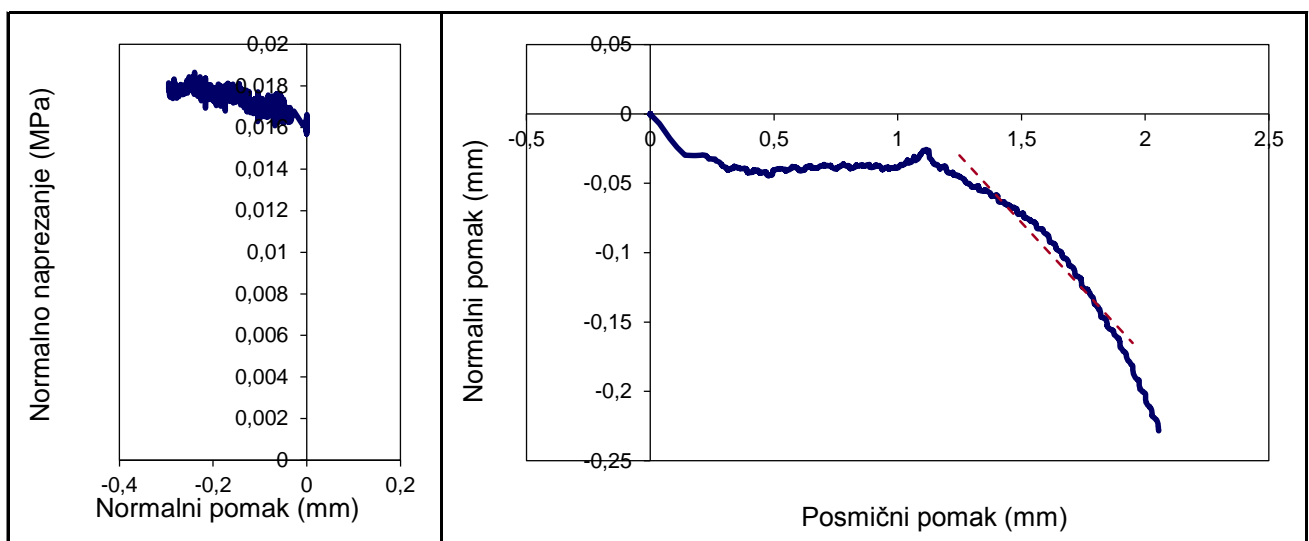
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-003 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,6	300,4	383,9	2603		



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,037</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,900</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,019</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,135</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,700</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>10,9</b> °

Zijev diskontinuiteta: 3,5 mm Amplituda hrapavosti: 29,6 mm

Debljina ispune: 3,4 mm Tlačna čvrstoća JCS: 94,6 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 6. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-003DSR-CNL-2-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.

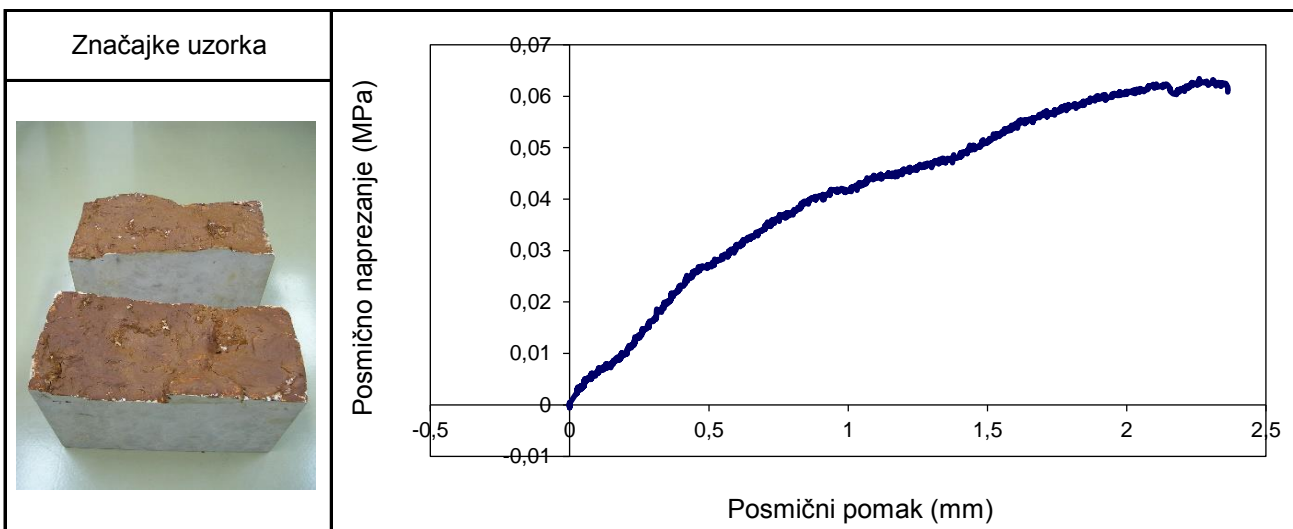
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) laboratorijski pripremljene na vlažnost granice tečenja ( $w_l=70\%$ )

Lab. broj: 19-013-003 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,6	300,4	383,9	2603		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,018</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,063</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>74,1</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 2,261 mm Brzina smicanja: 0,18 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-003DSR-CNL-3-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



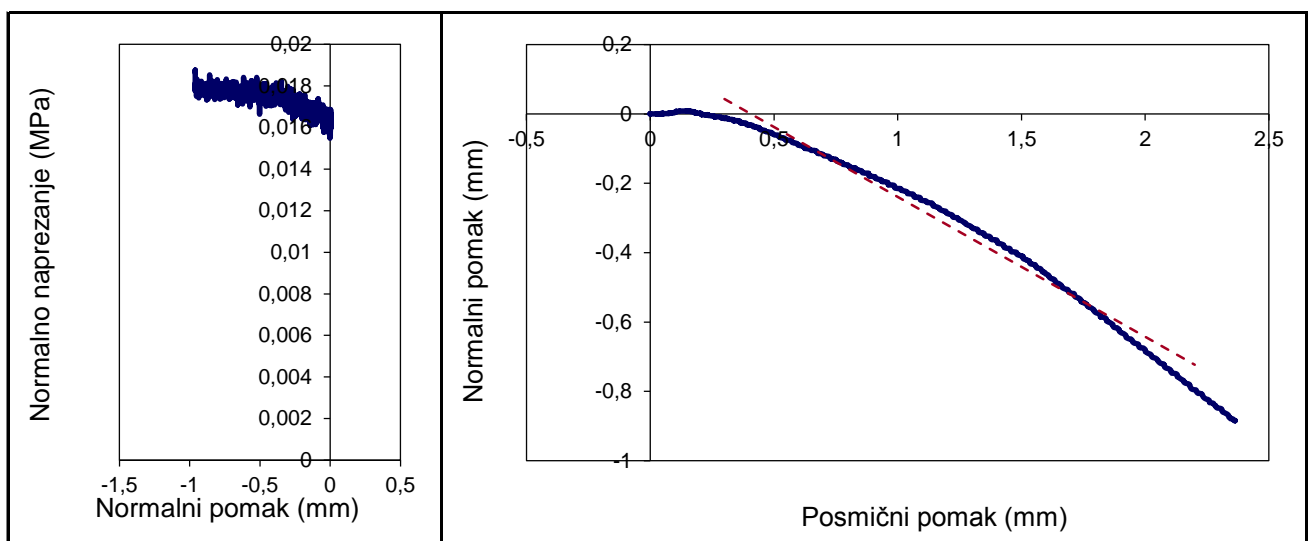
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-003 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,6	300,4	383,9	2603		



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,059</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,150</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,028</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,766</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,900</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>22,0</b> °

Zijev diskontinuiteta: 3,5 mm Amplituda hrapavosti: 29,6 mm

Debljina ispune: 2,5 mm Tlačna čvrstoća JCS: 94,6 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 6. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-003DSR-CNL-3-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.

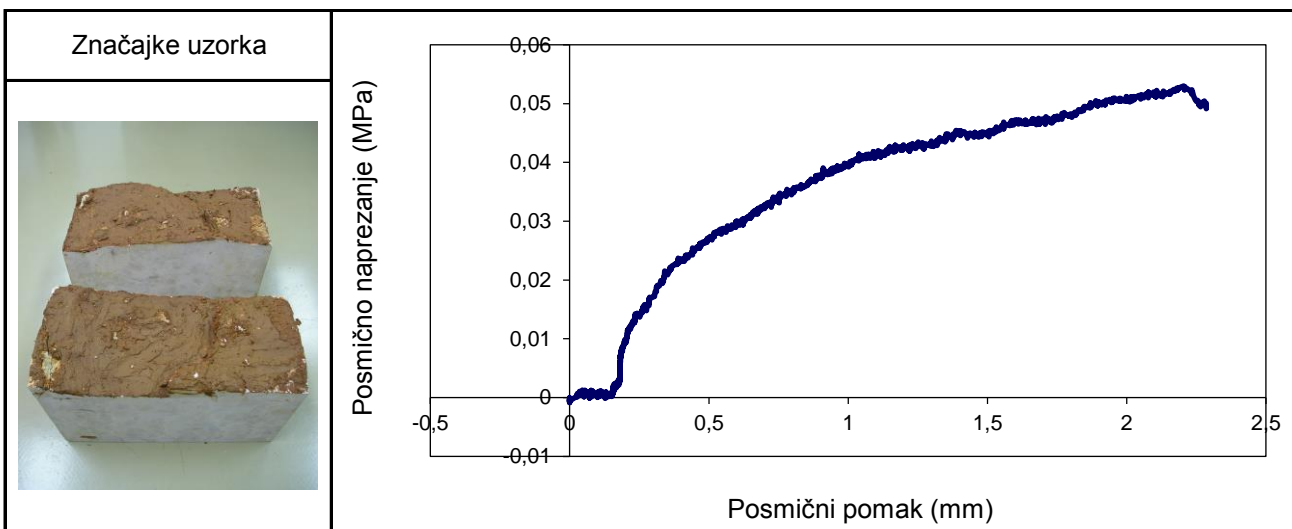
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) i kršja laboratorijski pripremljenog na stanje vlažnosti od 45%

Lab. broj: 19-013-003 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,6	300,4	383,9	2603		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,018</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,053</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>71,5</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 2,205 mm Brzina smicanja: 0,16 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-003DSR-CNL-4-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



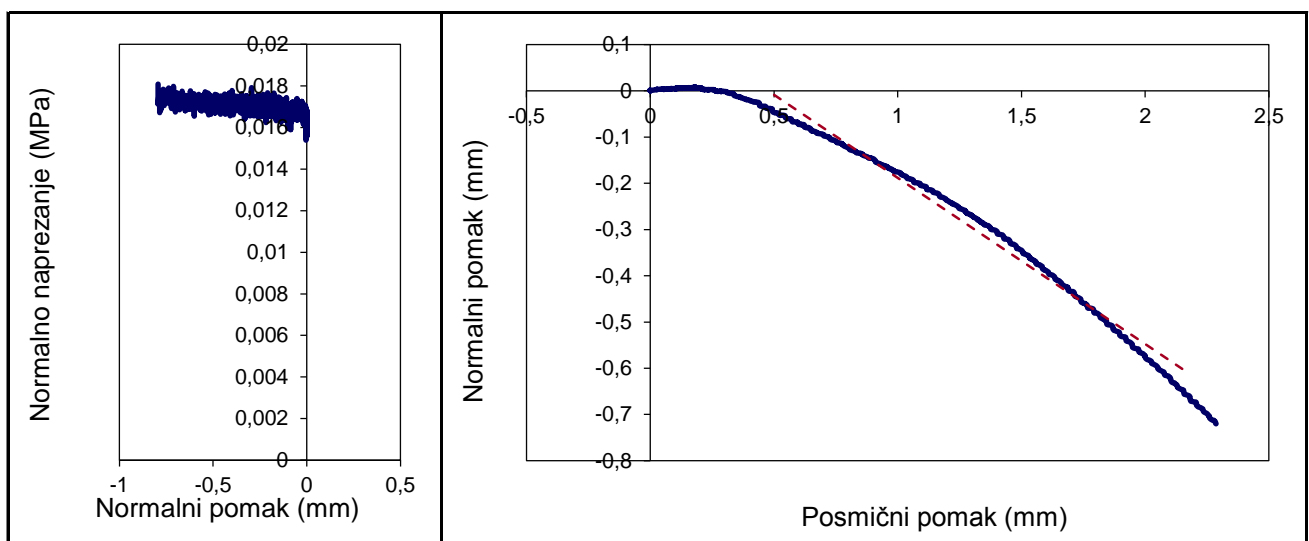
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-003 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,6	Duljina $l$ (mm) 300,4	Visina $h$ (mm) 383,9	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2603		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,055</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,100</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,026</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,593</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,650</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>19,8</b> °

Zijev diskontinuiteta: 3,5 mm Amplituda hrapavosti: 29,6 mm

Debljina ispune: 2,7 mm Tlačna čvrstoća JCS: 94,6 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 6. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-003DSR-CNL-4-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 8. 12. 2020.

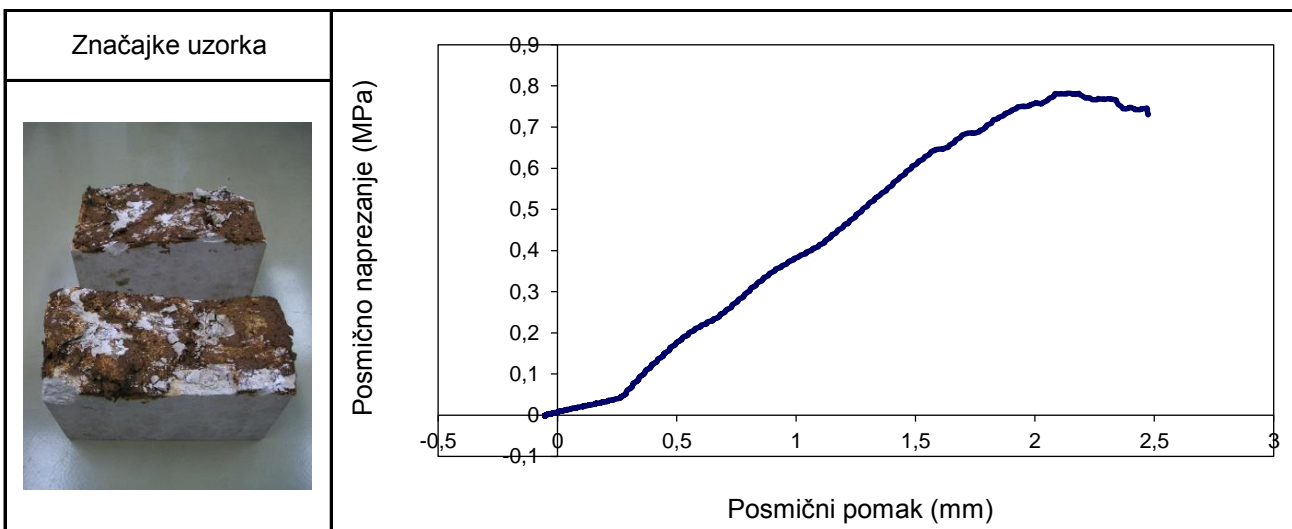
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) i kršja laboratorijski pripremljenog na stanje vlažnosti od 45%

Lab. broj: 19-013-003 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,6	300,4	383,9	2603		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,767</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,782</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>45,6</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 2,149 mm Brzina smicanja: 0,20 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-003DSR-CNL-4-1 17. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



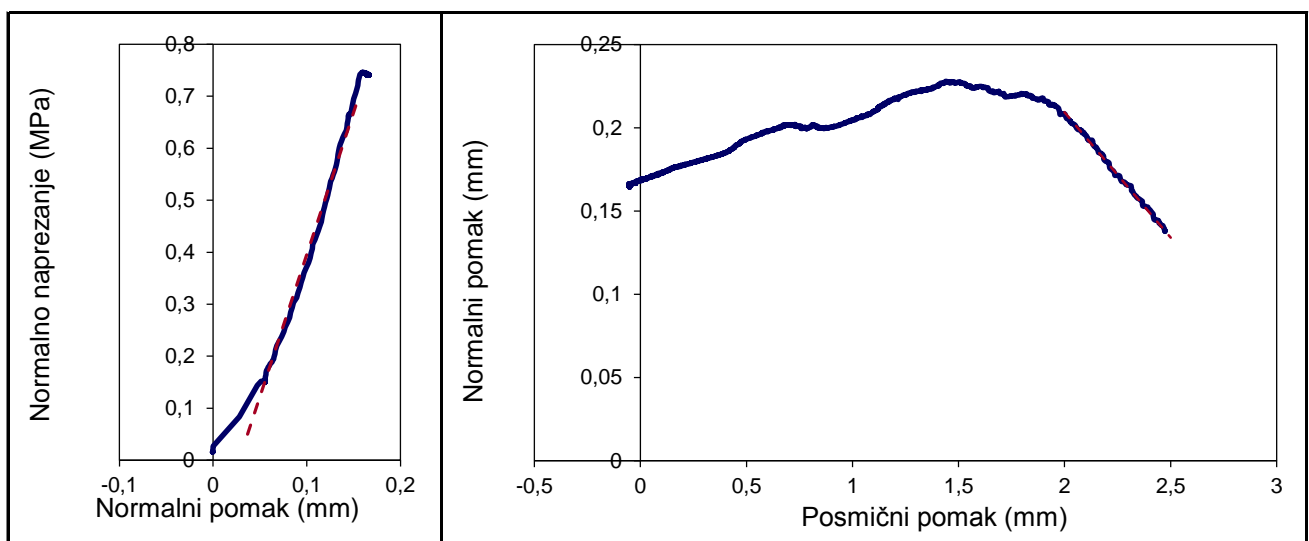
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-003 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,6	300,4	383,9	2603		



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>0,650</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,119</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>5,468</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,916</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,400</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,382</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,076</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,500</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>8,6</b> °

Zijev diskontinuiteta: 3,5 mm Amplituda hrapavosti: 29,6 mm

Debljina ispune: 2,8 mm Tlačna čvrstoća JCS: 94,6 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 5%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 10. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-003DSR-CNL-4-1 17. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 8. 12. 2020.

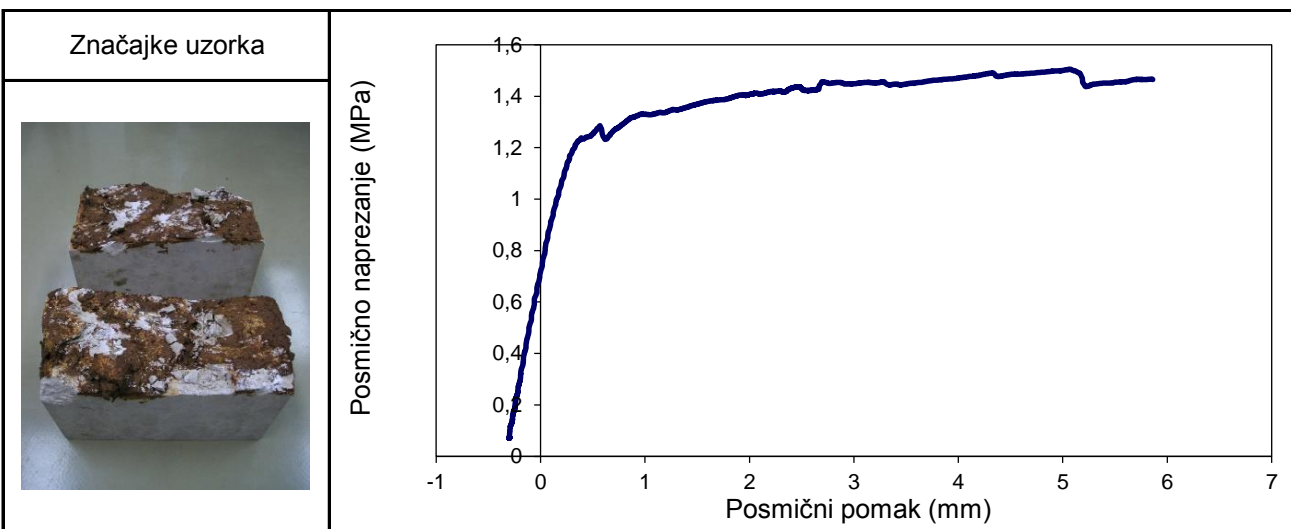
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) i kršja laboratorijski pripremljenog na stanje vlažnosti od 45%

Lab. broj: 19-013-003 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,6	300,4	383,9	2603		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>1,541</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>1,505</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>44,3</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 5,079 mm Brzina smicanja: 0,34 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-003DSR-CNL-4-2 17. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--





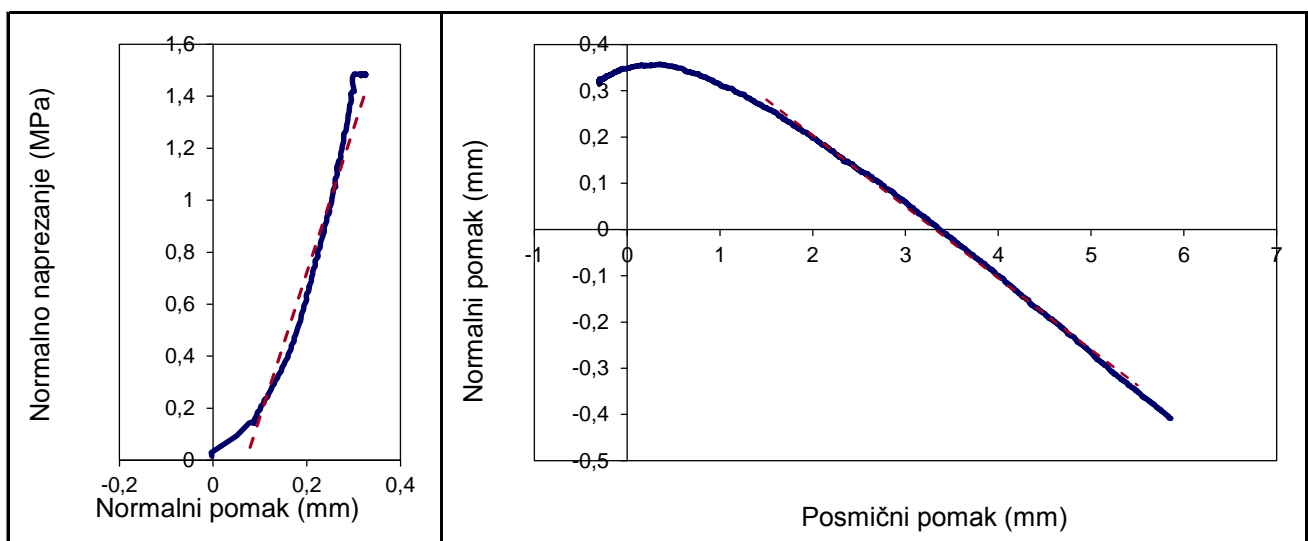
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-003 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,6	Duljina $l$ (mm) 300,4	Visina $h$ (mm) 383,9	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2603		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>1,350</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,243</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>5,554</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,445</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,700</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,261</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,618</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>4,000</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>8,8</b> °

Zijev diskontinuiteta: 3,5 mm Amplituda hrapavosti: 29,6 mm

Debljina ispune: 2,8 mm Tlačna čvrstoća JCS: 94,6 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 20%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 10. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-003DSR-CNL-4-2 17. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 8. 12. 2020.

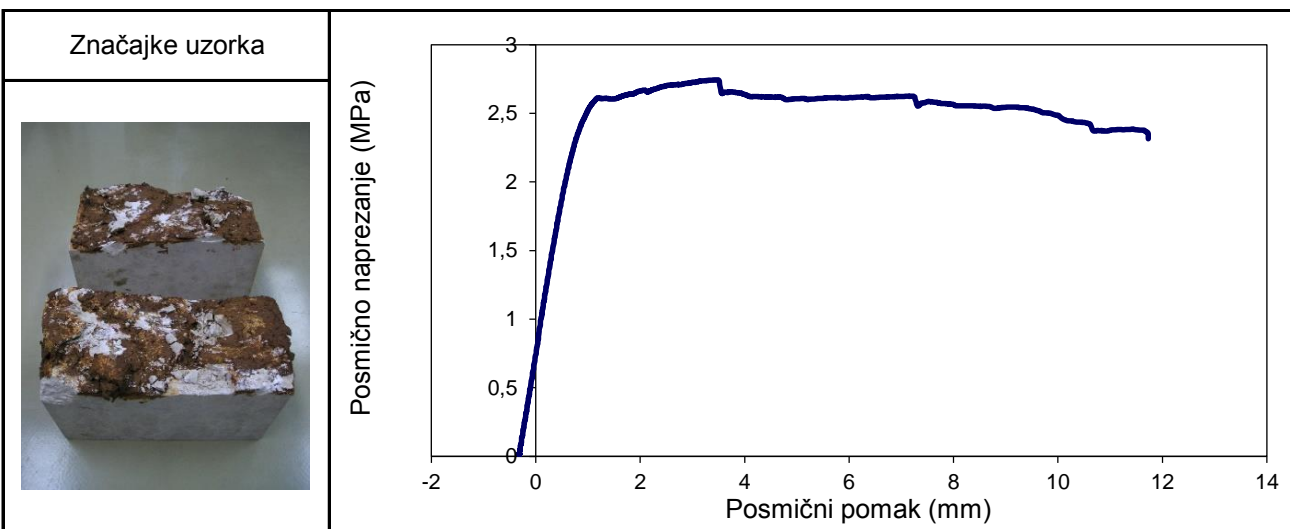
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) i kršja laboratorijski pripremljenog na stanje vlažnosti od 45%

Lab. broj: 19-013-003 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,6	300,4	383,9	2603		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>3,087</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>2,745</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>41,6</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 3,489 mm Brzina smicanja: 0,38 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-003DSR-CNL-4-3 17. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



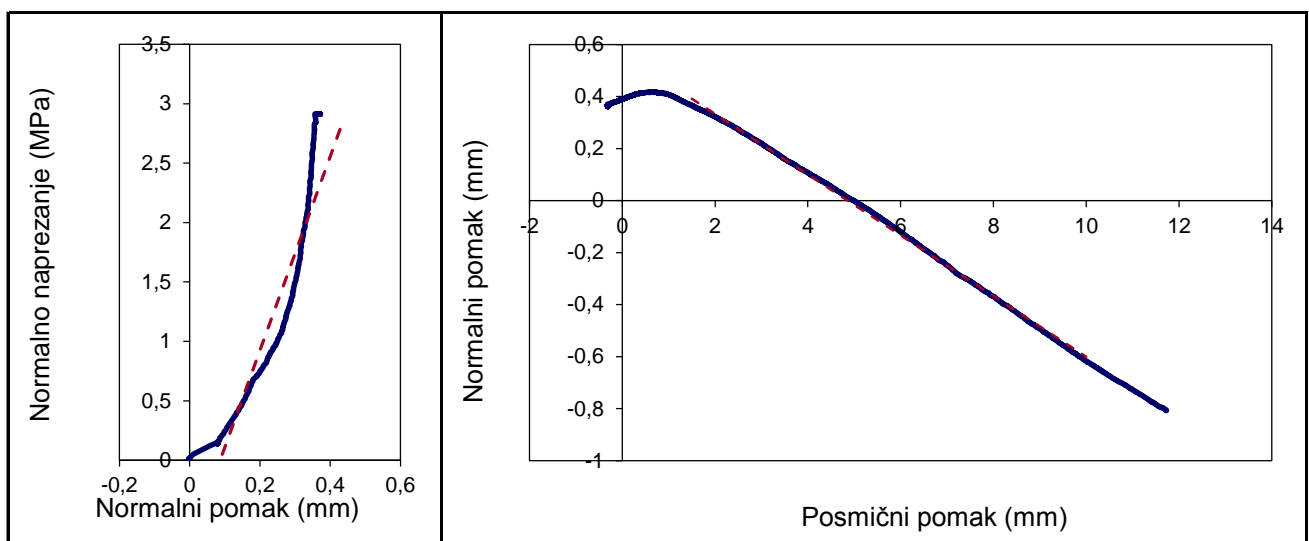
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-003 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,6	300,4	383,9	2603		



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>2,750</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,337</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>8,158</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>1,847</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,600</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,710</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,992</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>8,500</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>6,7</b> °

Zijev diskontinuiteta: 3,5 mm Amplituda hrapavosti: 29,6 mm

Debljina ispune: 2,8 mm Tlačna čvrstoća JCS: 94,6 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 40%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 10. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-003DSR-CNL-4-3 17. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.

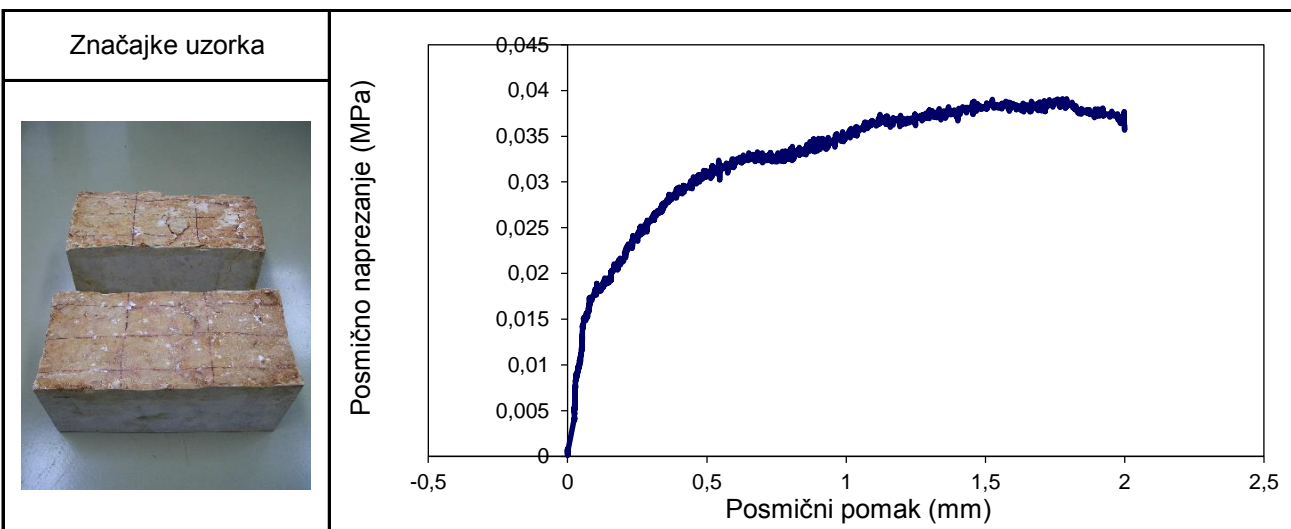
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom bez ispune

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,1	278,6	2610		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,021</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,039</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>62,3</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 1,792 mm Brzina smicanja: 0,19 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-1-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



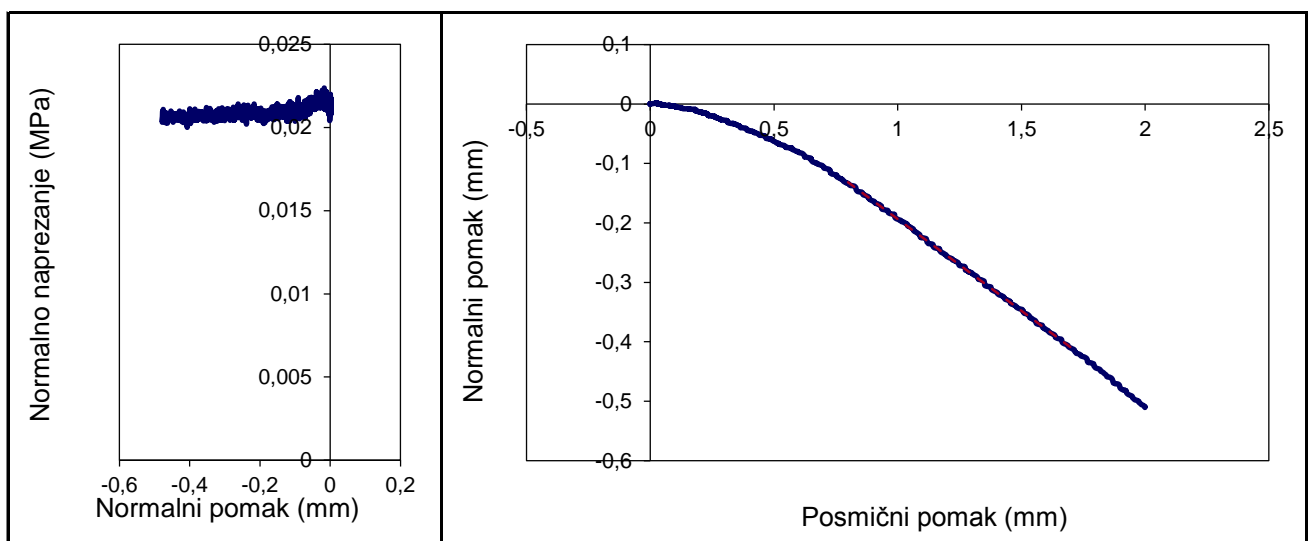
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,1	Visina $h$ (mm) 278,6	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2610		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,022</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,650</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,014</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,278</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,900</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>17,1</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,8 mm Amplituda hrapavosti: 12,3 mm

Debljina ispune: mm Tlačna čvrstoća JCS: 88,8 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 6. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-1-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 9. 12. 2020.

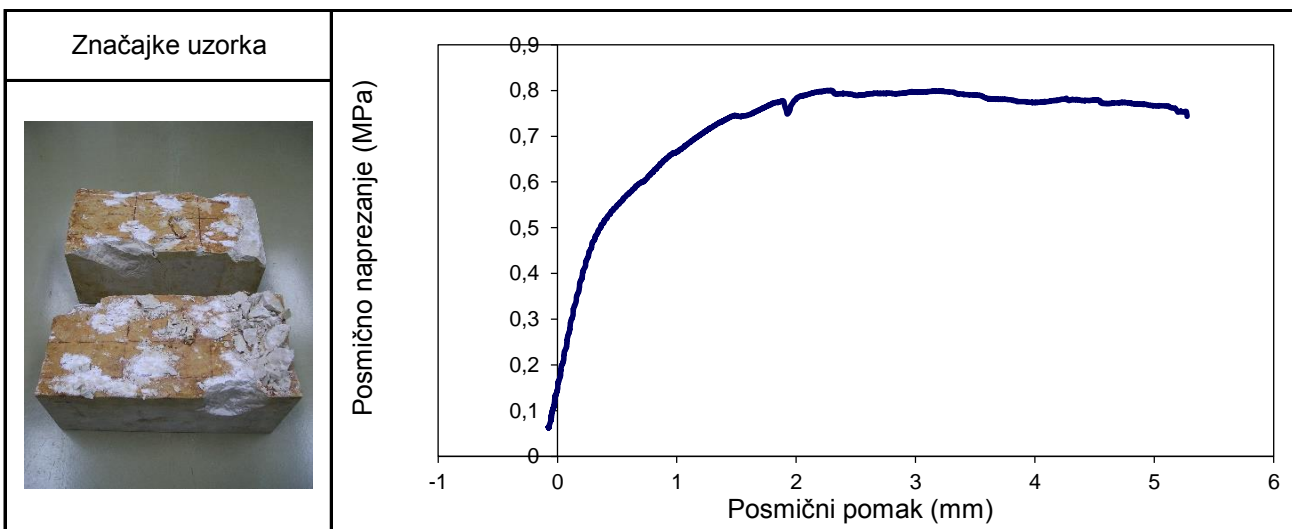
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i  
karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom bez ispune

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,1	278,6	2610		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,728</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,801</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>47,7</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 2,300 mm Brzina smicanja: 0,21 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-1-1 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



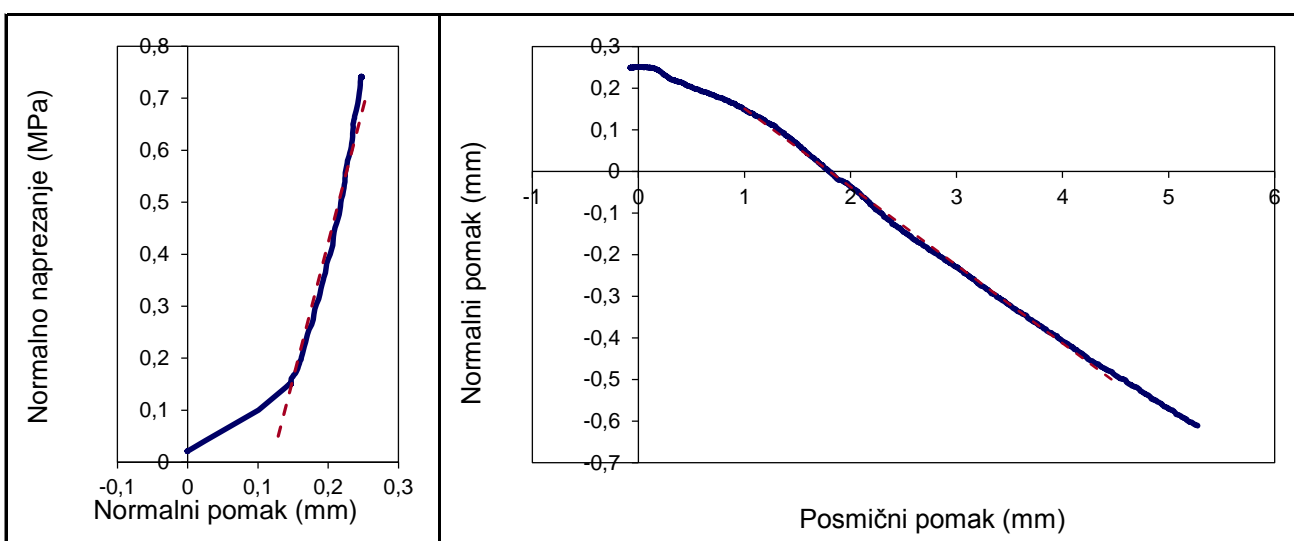
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,1	Visina $h$ (mm) 278,6	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2610		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>0,650</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,125</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>5,220</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,479</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,550</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,309</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,658</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>3,500</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>10,6</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,8 mm Amplituda hrapavosti: 12,3 mm

Debljina ispune: mm Tlačna čvrstoća JCS: 88,8 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 10%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 11. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-1-1 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 9. 12. 2020.

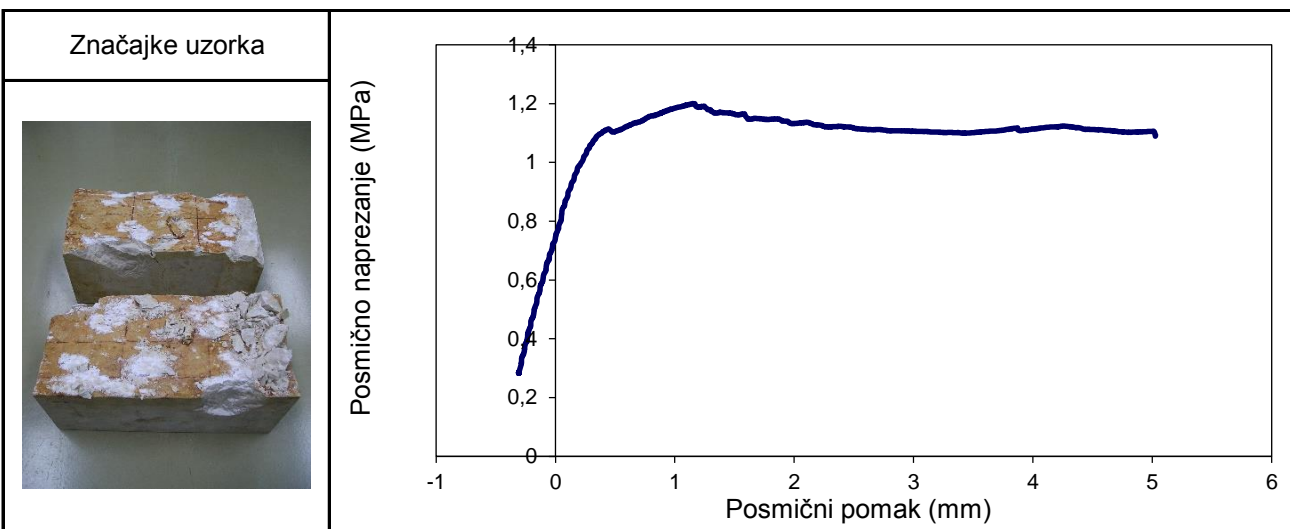
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom bez ispune

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,1	278,6	2610		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>1,479</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>1,200</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>39,0</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 1,147 mm Brzina smicanja: 0,42 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-1-2 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--





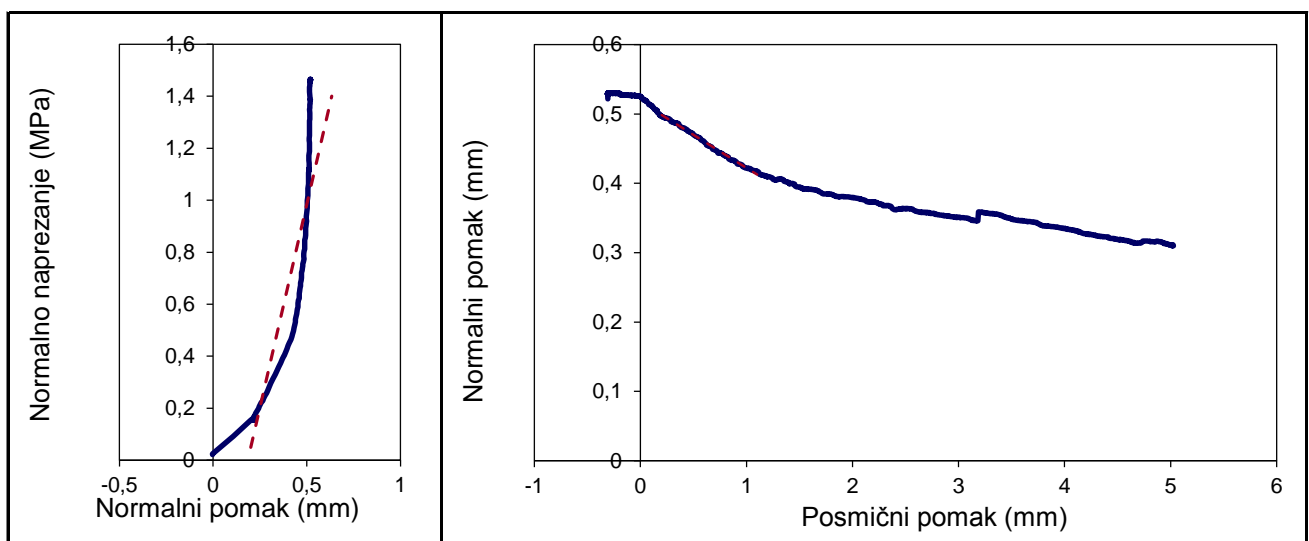
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,1	Visina $h$ (mm) 278,6	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2610		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>1,350</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,432</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>3,128</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,376</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,600</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,627</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,086</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,900</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>5,5</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,8 mm Amplituda hrapavosti: 12,3 mm

Debljina ispune: mm Tlačna čvrstoća JCS: 88,8 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 20%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 11. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-1-2 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 9. 12. 2020.

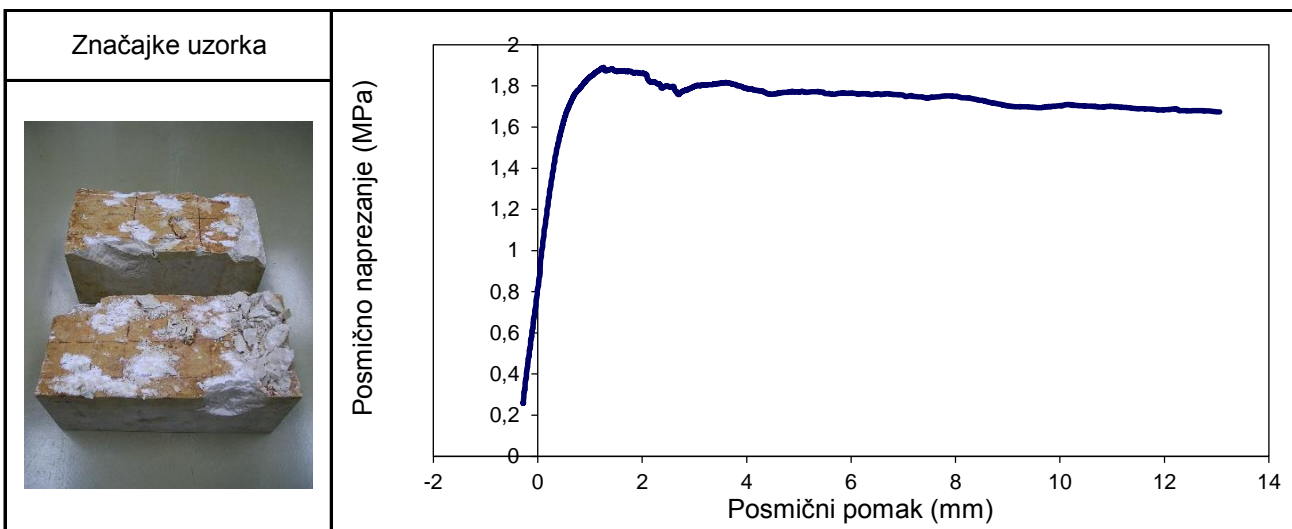
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom bez ispune

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,1	278,6	2610		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>2,898</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>1,890</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>33,1</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 1,263 mm Brzina smicanja: 0,27 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-1-3 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



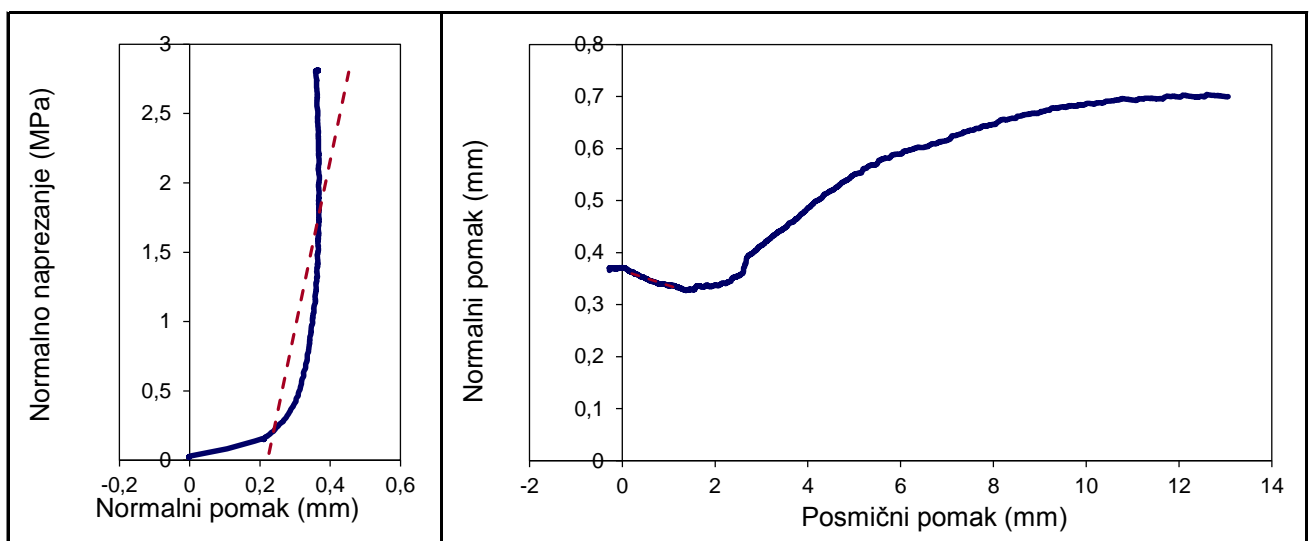
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,1	Visina $h$ (mm) 278,6	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2610		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>2,750</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,227</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>12,132</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>1,014</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,960</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>1,056</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,029</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,000</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>1,7</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,8 mm Amplituda hrapavosti: 12,3 mm

Debljina ispune: mm Tlačna čvrstoća JCS: 88,8 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 40%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 11. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-1-3 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.

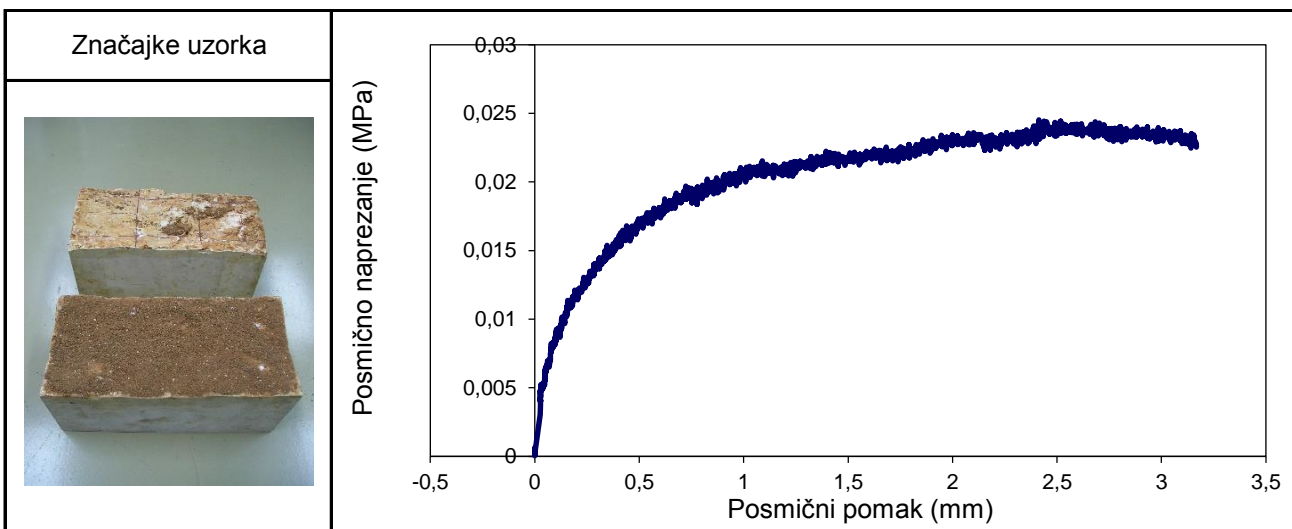
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna < 2 mm u suhom stanju

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,1	278,6	2610		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,021</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,025</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>49,1</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 2,413 mm Brzina smicanja: 0,19 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-2-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



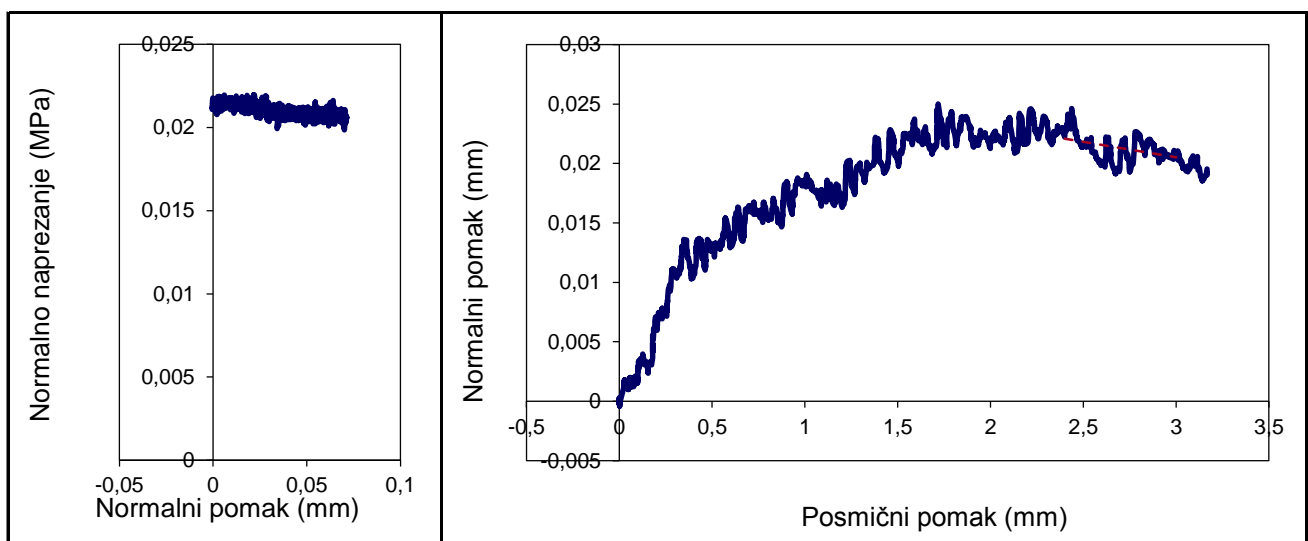
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,1	Visina $h$ (mm) 278,6	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2610		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,012</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,950</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,006</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,002</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,600</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>0,1</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,8 mm Amplituda hrapavosti: 12,3 mm

Debljina ispune: 3,4 mm Tlačna čvrstoća JCS: 88,8 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 6. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-2-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.

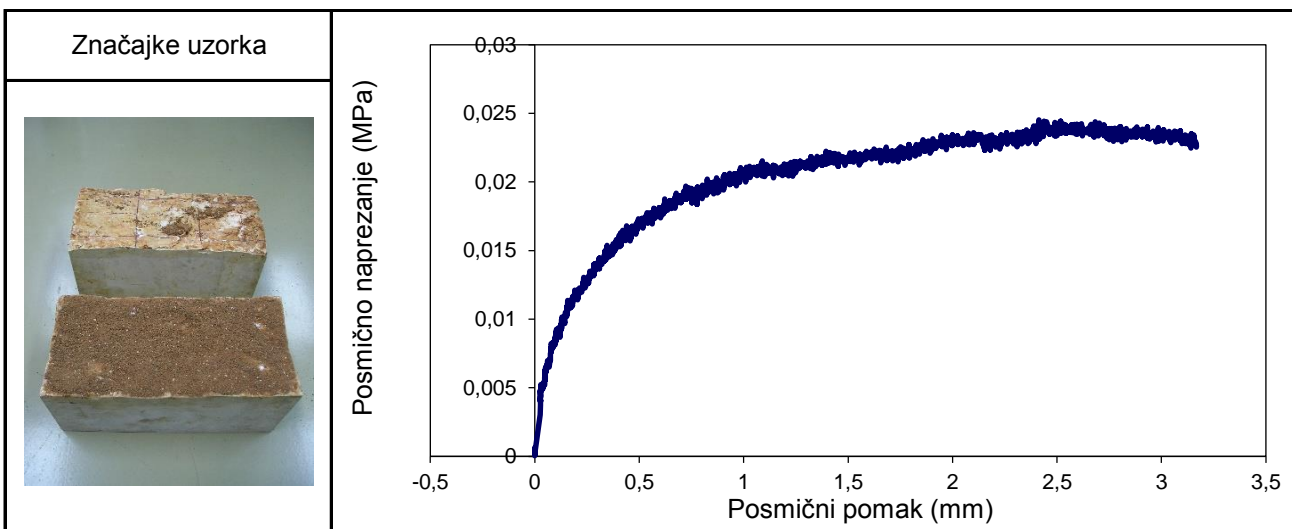
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna < 2 mm u suhom stanju

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,1	278,6	2610		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,021</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,025</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>49,1</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 2,413 mm Brzina smicanja: 0,19 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-2-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



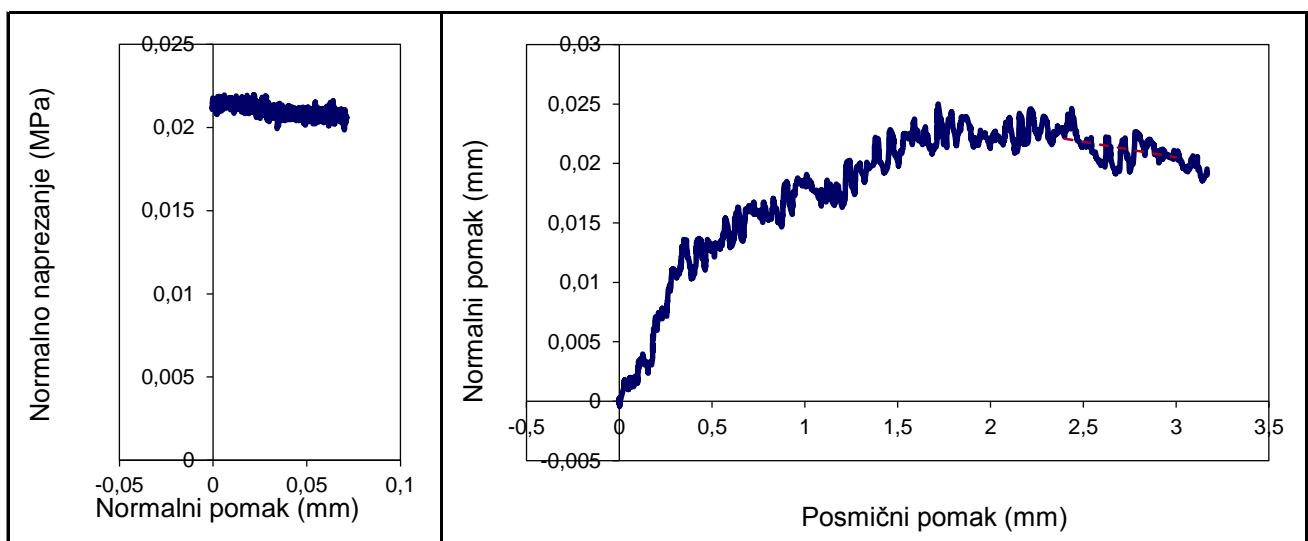
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,1	Visina $h$ (mm) 278,6	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2610		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,012</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,950</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,006</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,002</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,600</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>0,1</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,8 mm Amplituda hrapavosti: 12,3 mm

Debljina ispune: 3,4 mm Tlačna čvrstoća JCS: 88,8 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 6. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-2-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.

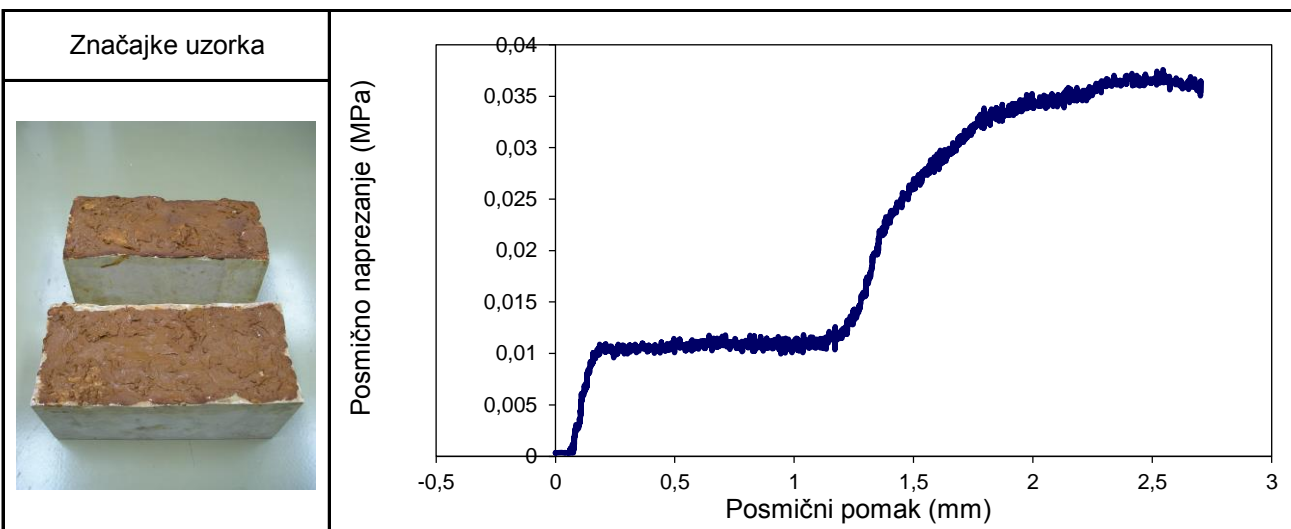
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) laboratorijski pripremljene na vlažnost granice tečenja ( $w_l=70\%$ )

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,1	278,6	2610		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,021</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,038</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>61,0</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 2,545 mm Brzina smicanja: 0,23 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-3-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--





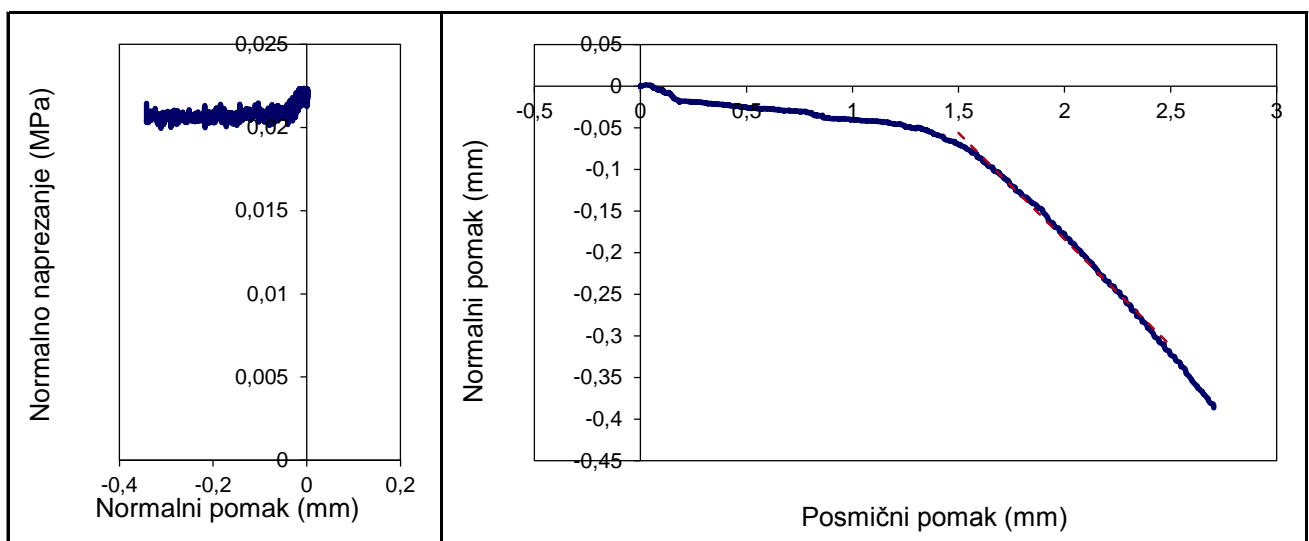
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,1	Visina $h$ (mm) 278,6	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2610		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,036</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,450</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,015</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,256</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,000</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>14,3</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,8 mm Amplituda hrapavosti: 12,3 mm

Debljina ispune: 2,3 mm Tlačna čvrstoća JCS: 88,8 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 6. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-3-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.

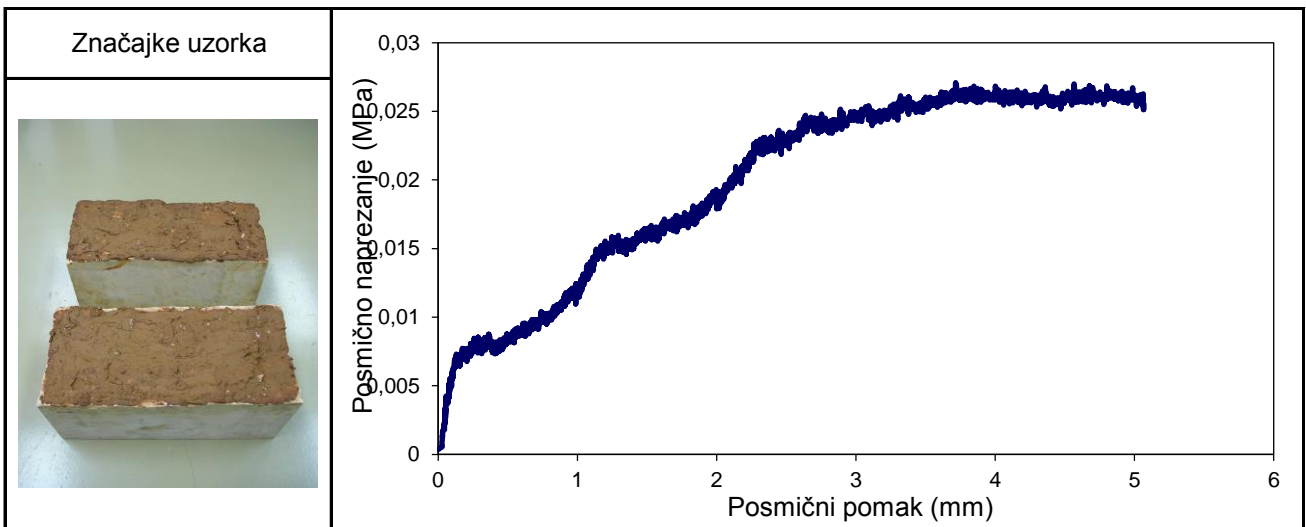
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) i kršja laboratorijski pripremljenog na stanje vlažnosti od 45%

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,3	300,1	278,6	2610		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,024</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,027</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>48,1</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 3,716 mm Brzina smicanja: 0,22 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-4-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



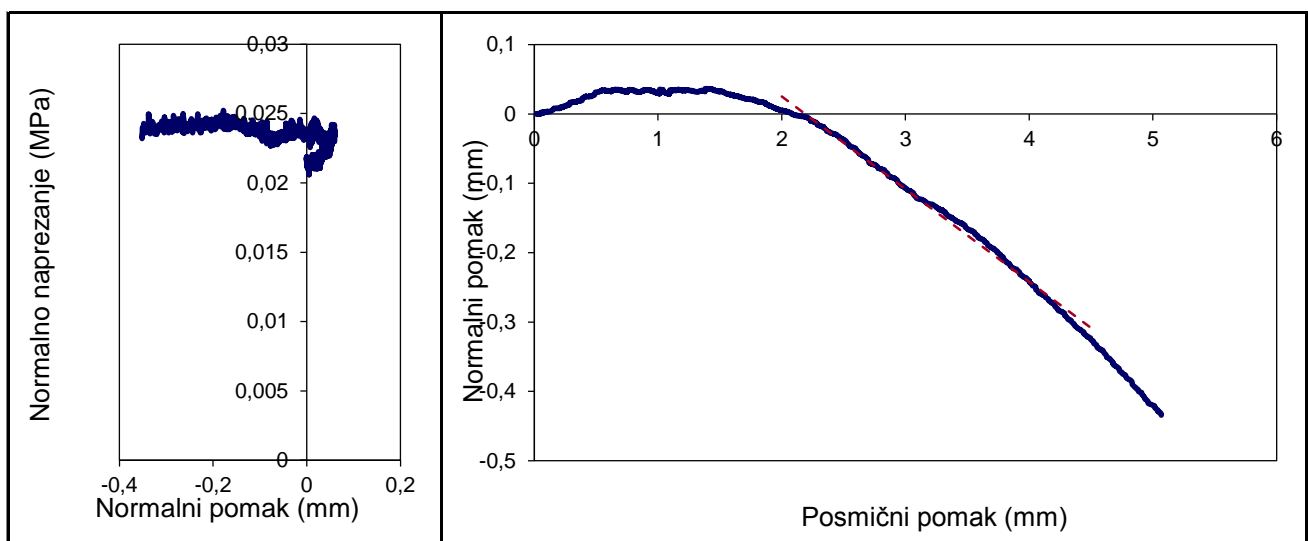
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-004 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,3	Duljina $l$ (mm) 300,1	Visina $h$ (mm) 278,6	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2610		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,023</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>3,600</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,006</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,333</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,500</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>7,6</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,8 mm Amplituda hrapavosti: 12,3 mm

Debljina ispune: 2,8 mm Tlačna čvrstoća JCS: 88,8 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 6. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-004DSR-CNL-4-0 6. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.

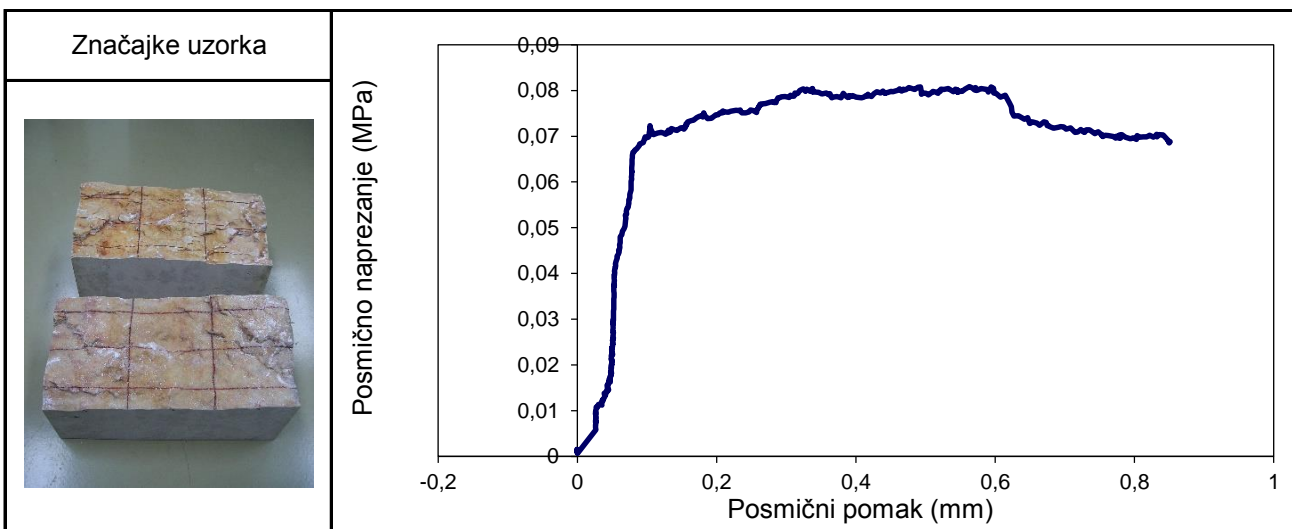
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i  
karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom bez ispune

Lab. broj: 19-013-005 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,2	299,9	277,9	2611		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,019</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,081</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>76,6</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 0,563 mm Brzina smicanja: 0,20 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-005DSR-CNL-1-0 7. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



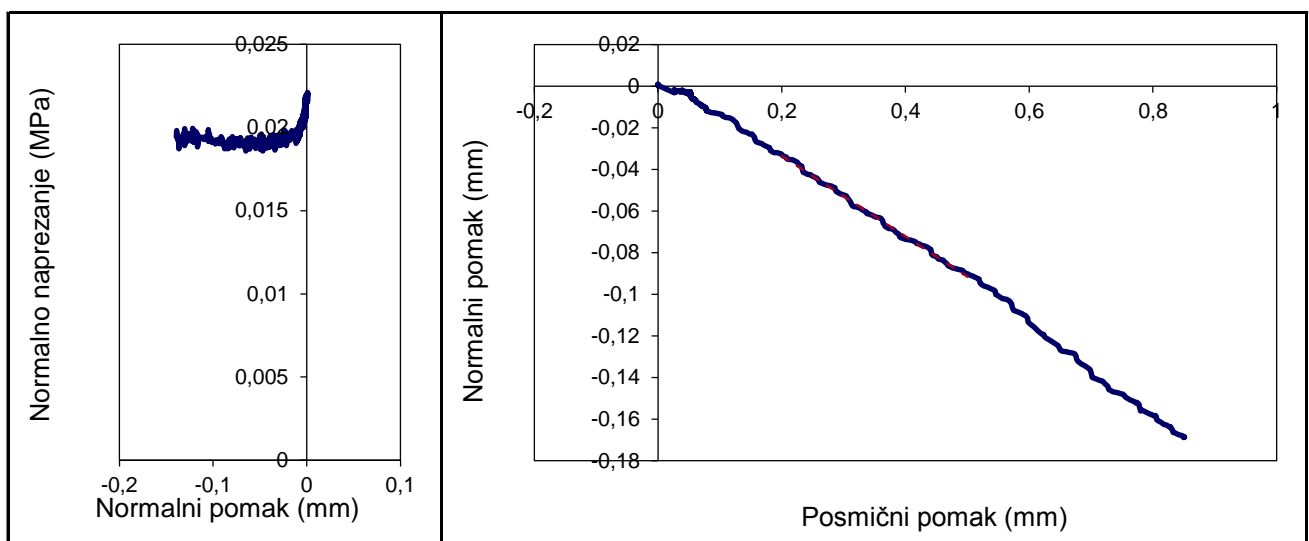
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-005 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,2	Duljina $l$ (mm) 299,9	Visina $h$ (mm) 277,9	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2611		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,046</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,450</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,102</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,058</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,300</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>10,9</b> °

Zijev diskontinuiteta: 5,5 mm Amplituda hrapavosti: 12,3 mm

Debljina ispune: mm Tlačna čvrstoća JCS: 92,0 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 7. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-005DSR-CNL-1-0 7. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--

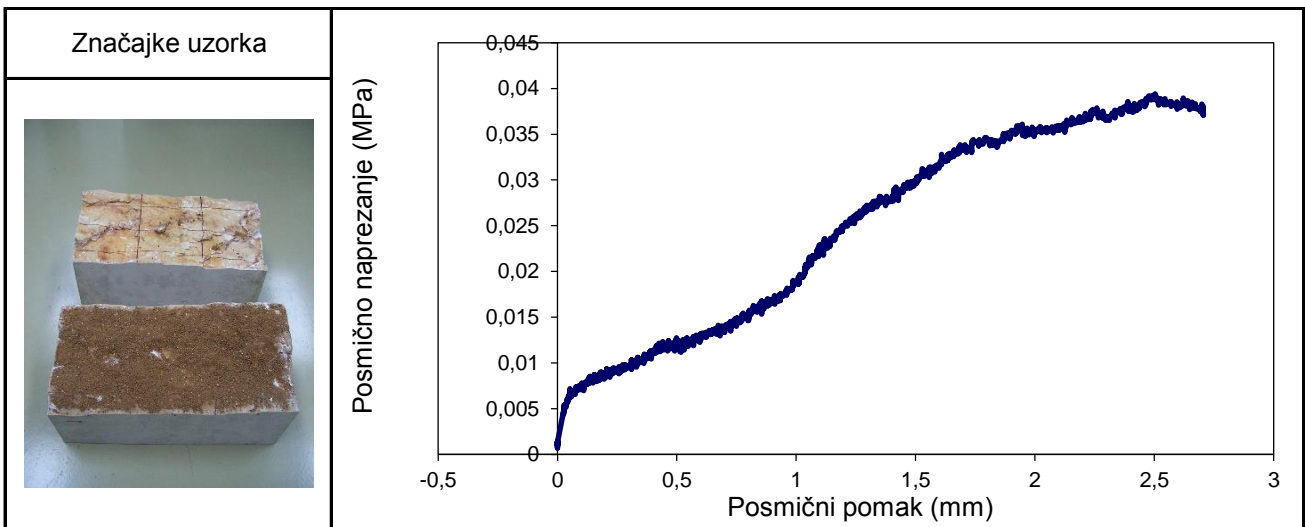


## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.  
Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb  
Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima  
Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -  
Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.  
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti  
Geogr. porijeklo: Kanfanar  
Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna < 2 mm u suhom stanju  
Lab. broj: 19-013-005 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,2	299,9	277,9	2611		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,021</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,039</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>62,4</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 2,503 mm Brzina smicanja: 0,21 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-005DSR-CNL-2-0 7. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.

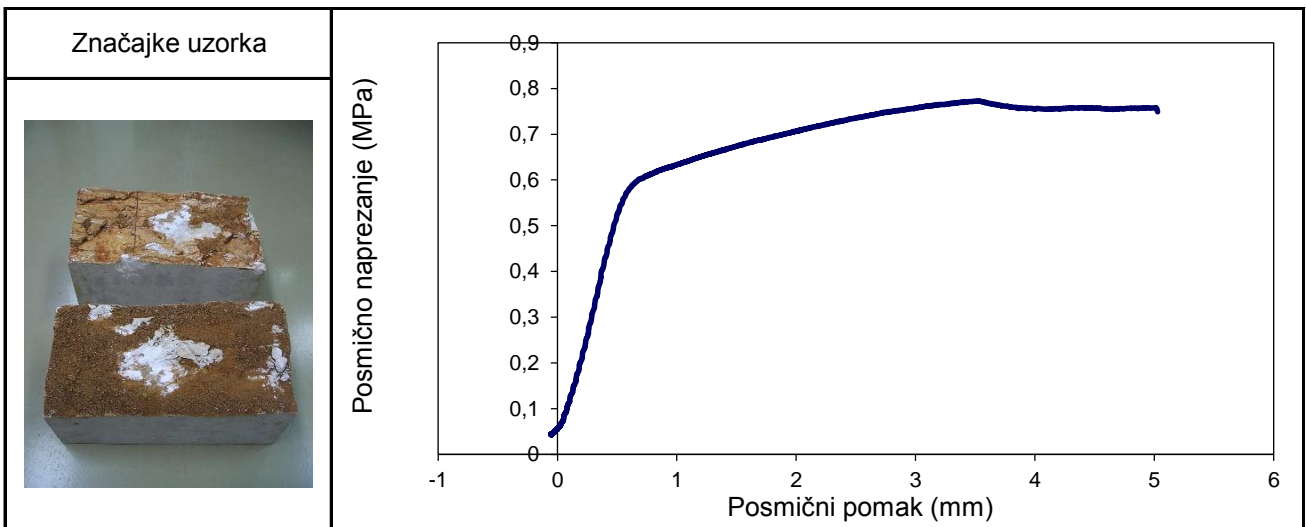
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna < 2 mm u suhom stanju

Lab. broj: 19-013-005 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,2	299,9	277,9	2611		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,714</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,773</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>47,3</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 3,524 mm Brzina smicanja: 0,24 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-005DSR-CNL-2-1 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



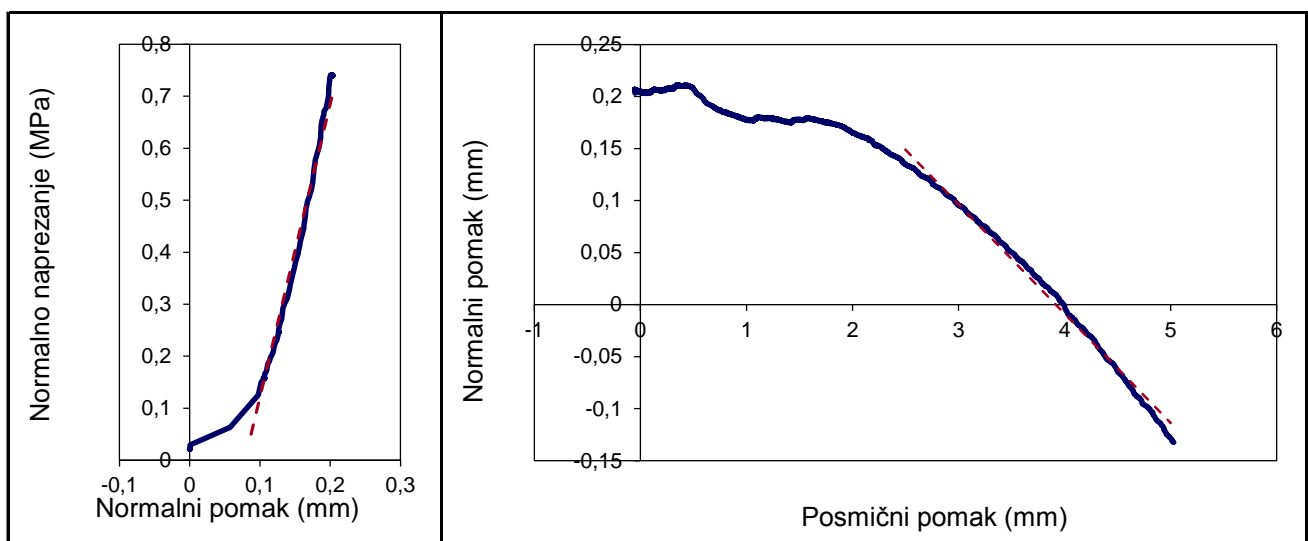
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-005 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,2	Duljina $l$ (mm) 299,9	Visina $h$ (mm) 277,9	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2611		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>0,650</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,115</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>5,639</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,599</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,950</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,203</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,263</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,500</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>6,0</b> °

Zijev diskontinuiteta: 5,5 mm Amplituda hrapavosti: 12,3 mm

Debljina ispune: 2,98 mm Tlačna čvrstoća JCS: 92,0 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 5%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 14. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-005DSR-CNL-2-1 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--





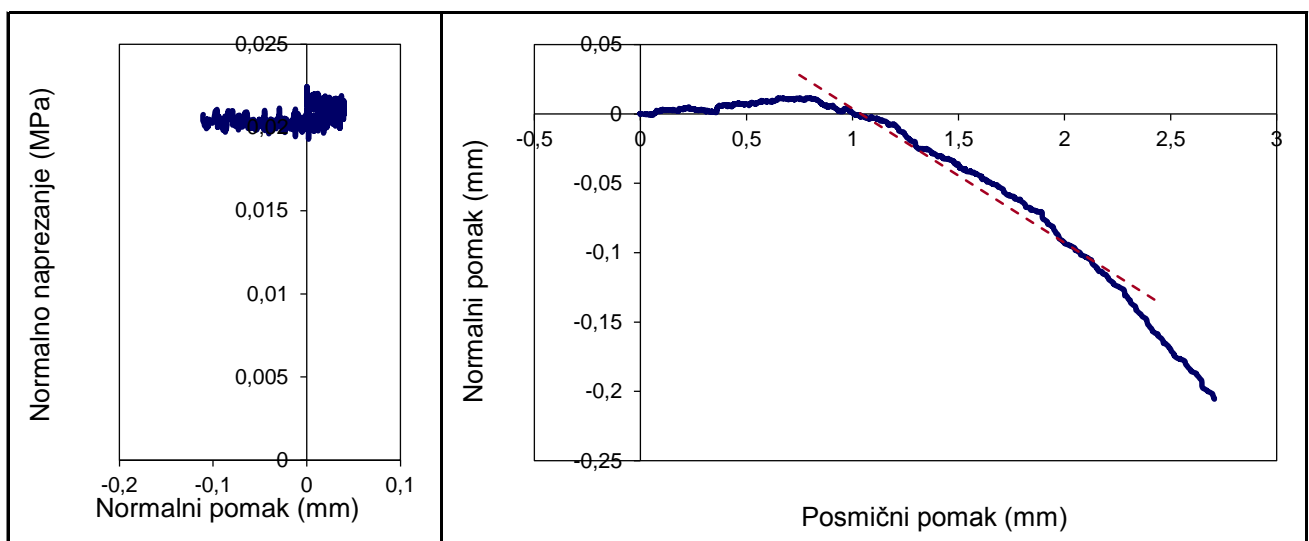
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-005 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,2	Duljina $l$ (mm) 299,9	Visina $h$ (mm) 277,9	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2611		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,036</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,400</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,015</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,165</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,700</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>5,5</b> °

Zijev diskontinuiteta: 5,5 mm Amplituda hrapavosti: 12,3 mm

Debljina ispune: 3,1 mm Tlačna čvrstoća JCS: 92,0 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 7. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-005DSR-CNL-2-0 7. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.

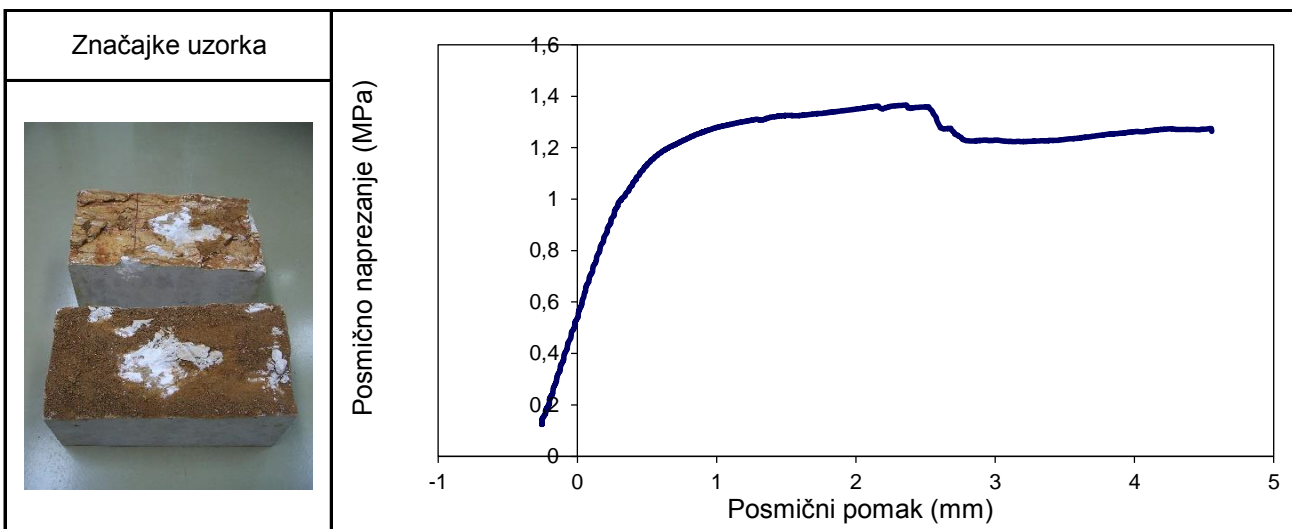
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna < 2 mm u suhom stanju

Lab. broj: 19-013-005 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,2	299,9	277,9	2611		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>1,444</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>1,366</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>43,4</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 2,361 mm Brzina smicanja: 0,28 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-005DSR-CNL-2-2 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



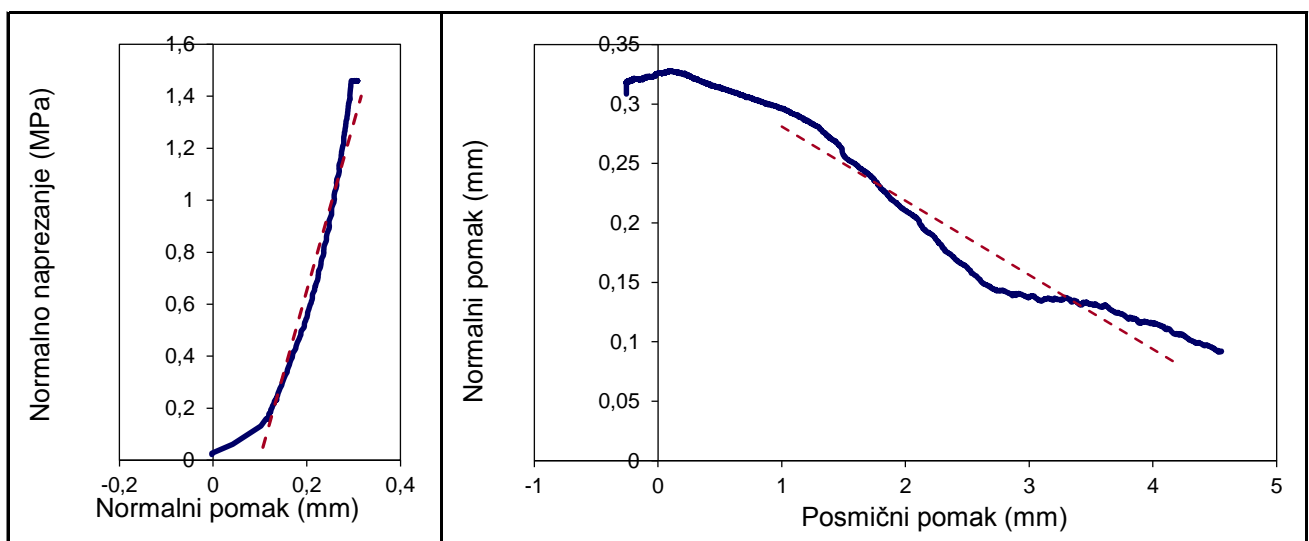
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-005 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,2	Duljina $l$ (mm) 299,9	Visina $h$ (mm) 277,9	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2611		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>1,350</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,210</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>6,435</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,632</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,330</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,475</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,200</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>3,200</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>3,6</b> °

Zijev diskontinuiteta: 5,5 mm Amplituda hrapavosti: 12,3 mm

Debljina ispune: 2,98 mm Tlačna čvrstoća JCS: 92,0 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 10%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 14. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-005DSR-CNL-2-2 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.

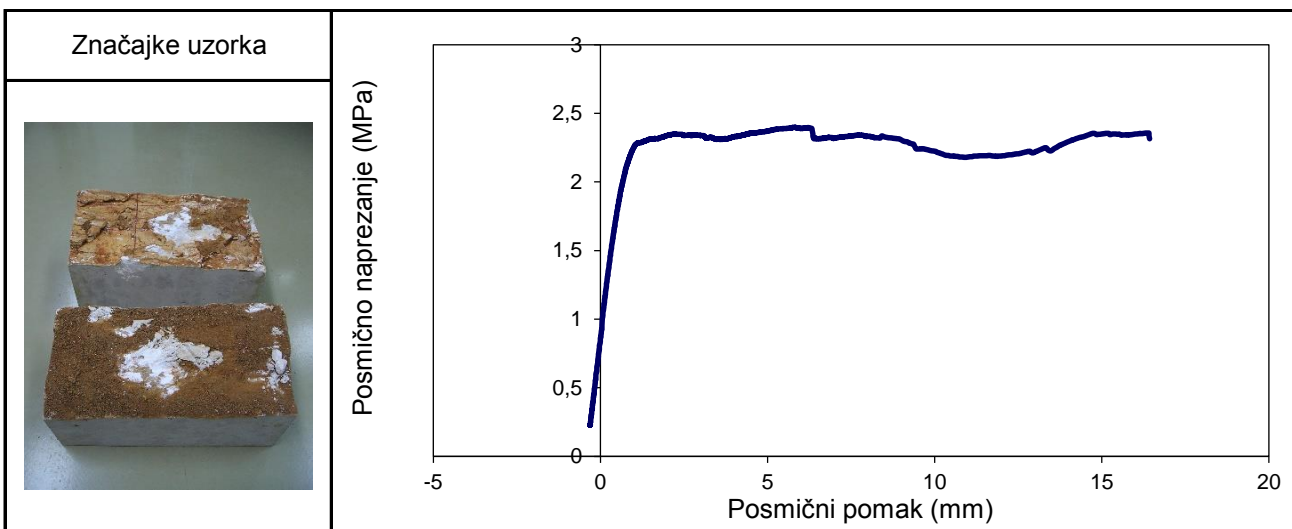
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna < 2 mm u suhom stanju

Lab. broj: 19-013-005 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,2	299,9	277,9	2611		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>2,909</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>2,399</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>39,5</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 5,812 mm Brzina smicanja: 0,38 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-005DSR-CNL-2-3 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



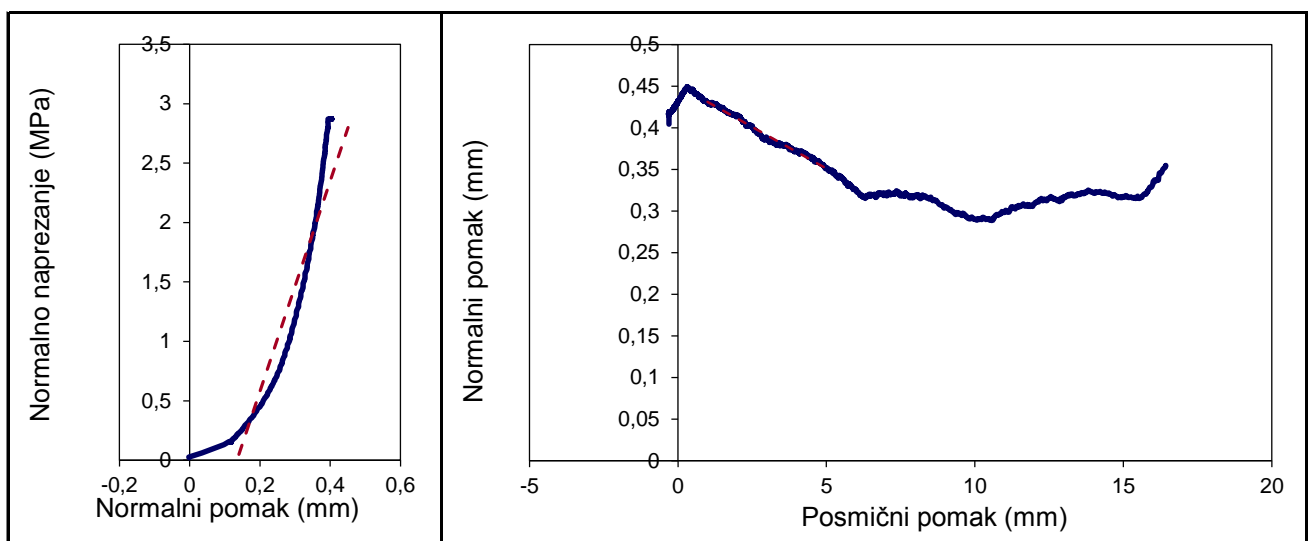
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-005 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,2	Duljina $l$ (mm) 299,9	Visina $h$ (mm) 277,9	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2611		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>2,750</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,311</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>8,831</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>1,022</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,900</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,352</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,080</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>4,000</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>1,1</b> °

Zijev diskontinuiteta: 5,5 mm Amplituda hrapavosti: 12,3 mm

Debljina ispune: 2,98 mm Tlačna čvrstoća JCS: 92,0 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 20%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 14. 12. 2020.

Odgovorna osoba: <b>Dr. sc. Petar Hrženjak</b>	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-005DSR-CNL-2-3 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: <b>Dr. sc. Petar Hrženjak</b>
---	--	---



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 5. 10. 2020.

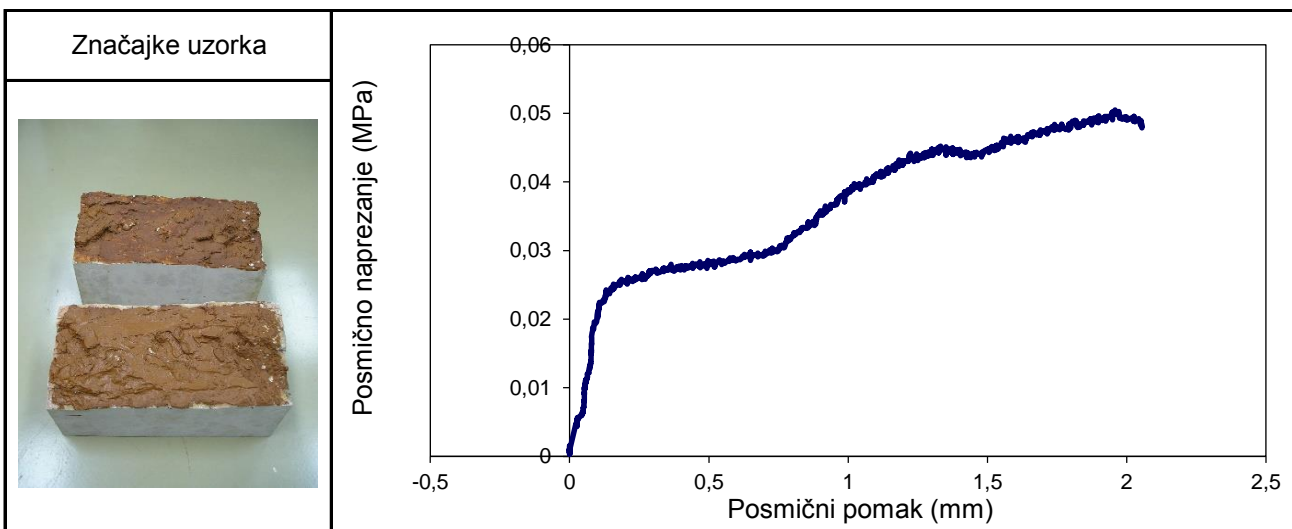
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) laboratorijski pripremljene na vlažnost granice tečenja ( $w_l=70\%$ )

Lab. broj: 19-013-005 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,2	299,9	277,9	2611		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,020</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,051</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>68,7</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 1,959 mm Brzina smicanja: 0,22 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-005DSR-CNL-3-0 7. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--

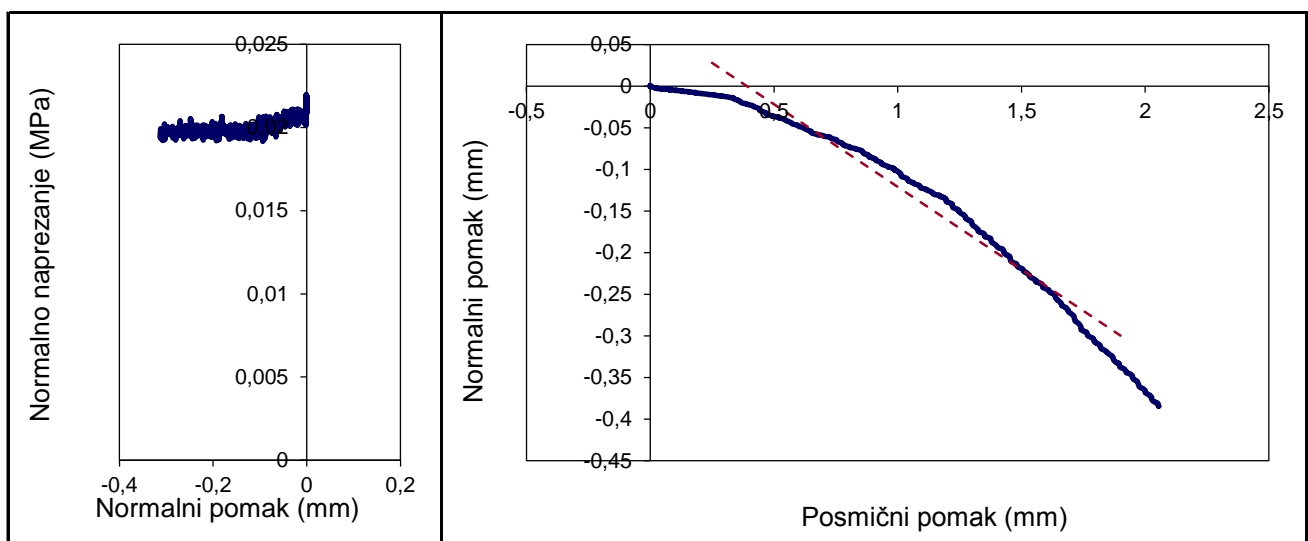


## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.  
 Lab. broj: 19-013-005 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,2	299,9	277,9	2611		



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,033</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,850</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,018</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,328</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,650</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>11,2</b> °

Zijev diskontinuiteta: 5,5 mm Amplituda hrapavosti: 12,3 mm  
 Debljina ispune: 2,3 mm Tlačna čvrstoća JCS: 92,0 MPa  
 Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 7. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-005DSR-CNL-3-0 7. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	---	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 6. 10. 2020.

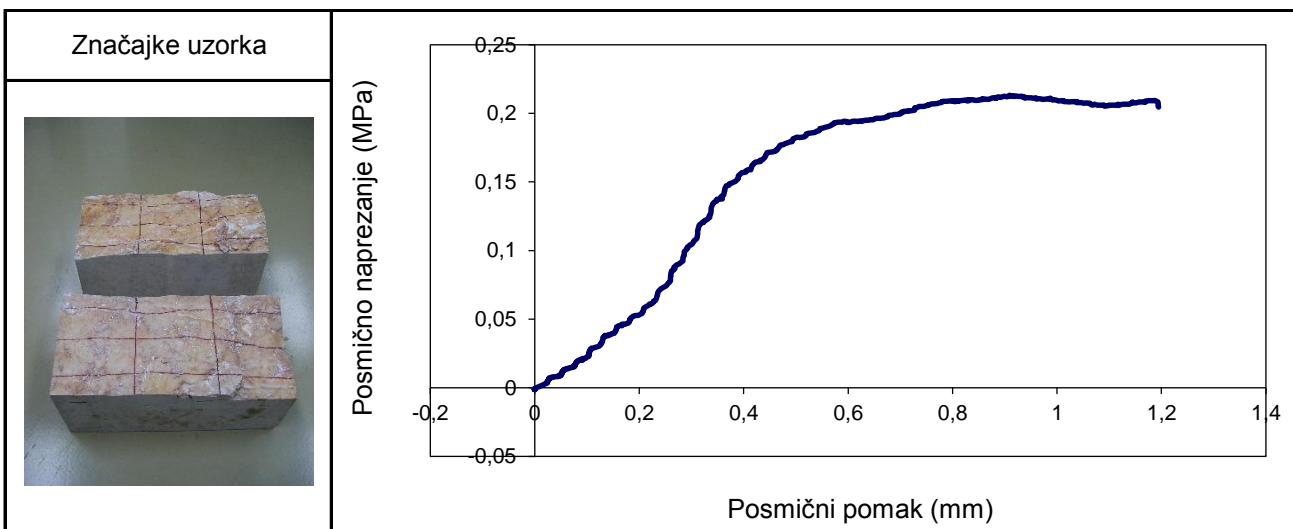
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom bez ispune

Lab. broj: 19-013-006 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,4	300,1	279,4	2603		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,038</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,213</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>80,0</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 0,909 mm Brzina smicanja: 0,21 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-006DSR-CNL-1-0 13. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--





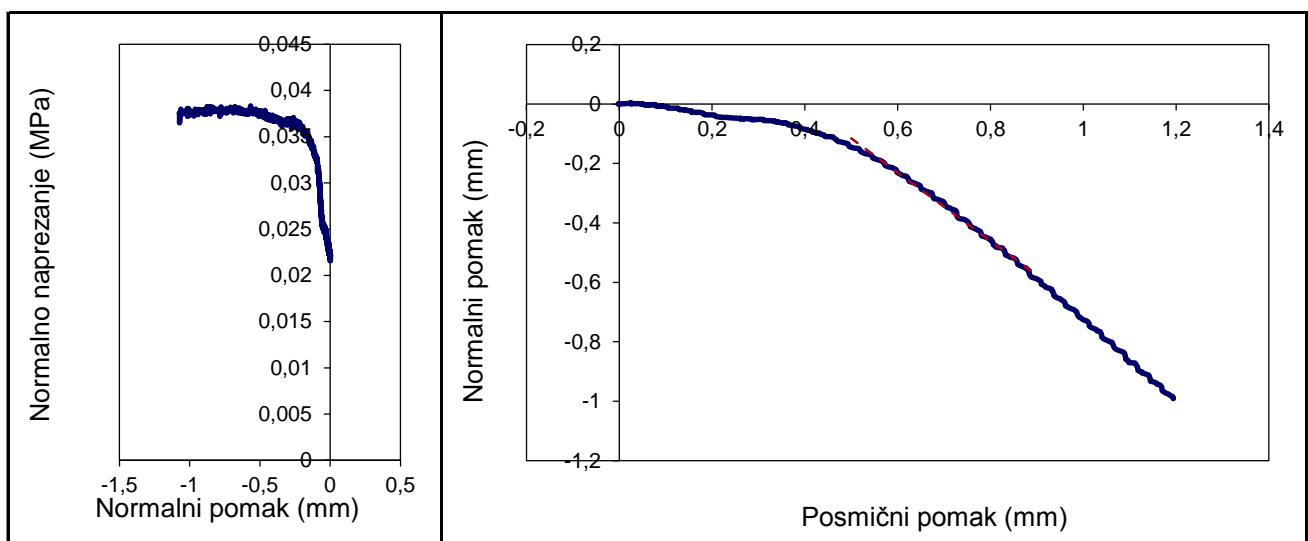
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-006 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,4	300,1	279,4	2603		



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,233</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,850</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,274</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,459</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,400</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>48,9</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,3 mm Amplituda hrapavosti: 20,0 mm

Debljina ispune: mm Tlačna čvrstoća JCS: 90,5 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 13. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-006DSR-CNL-1-0 13. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 6. 10. 2020.

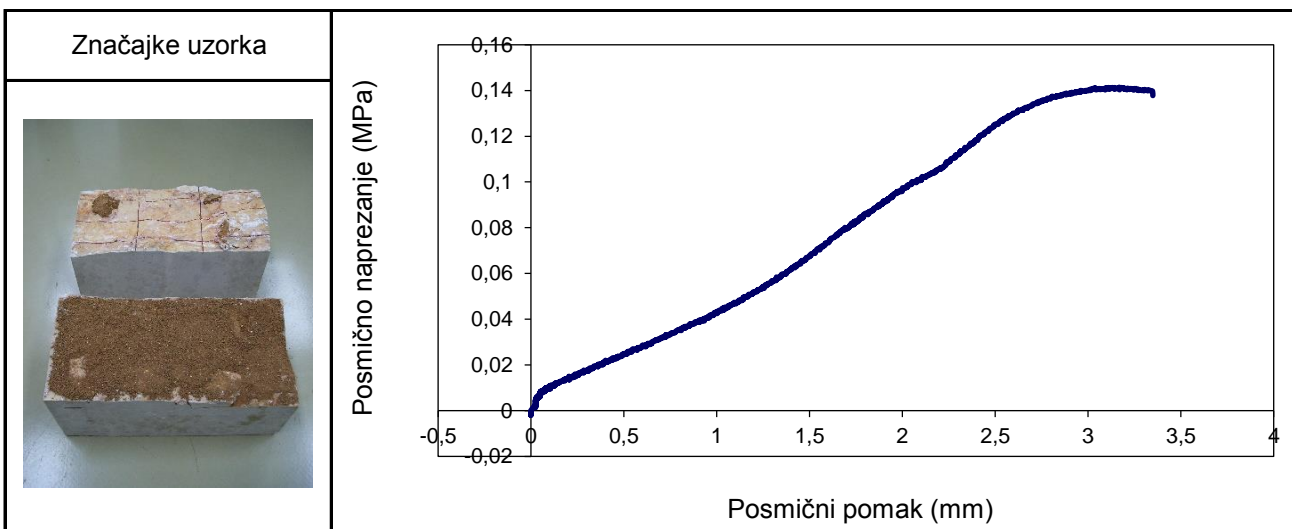
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) s udjelima zrna < 2 mm u suhom stanju

Lab. broj: 19-013-006 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,4	300,1	279,4	2603		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,031</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,141</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>77,6</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 3,169 mm Brzina smicanja: 0,24 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-006DSR-CNL-2-0 13. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



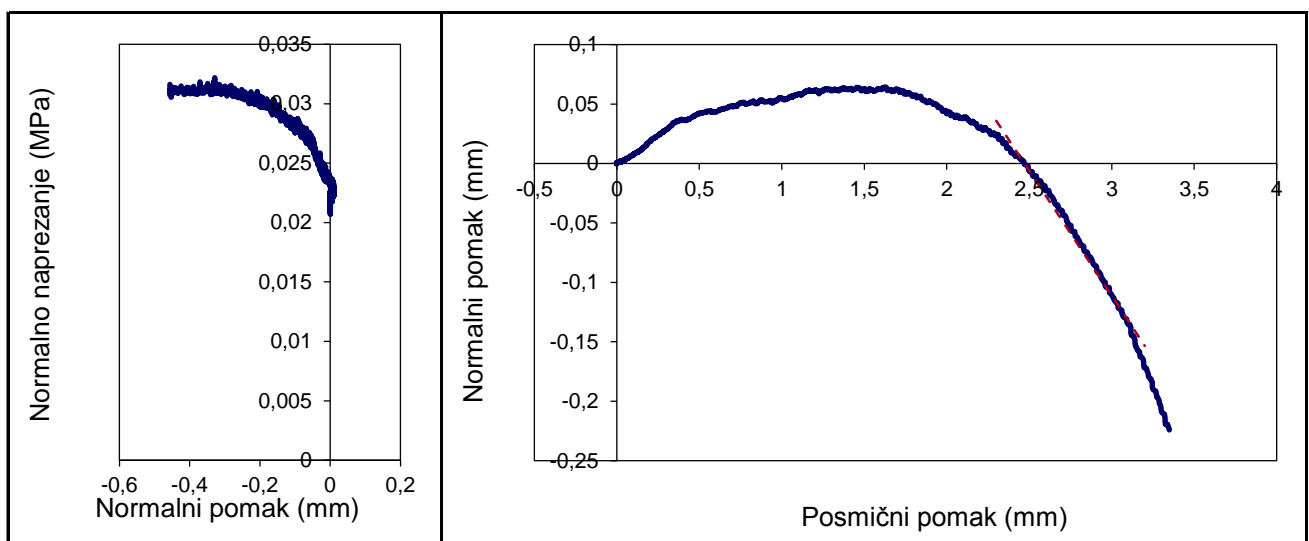
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-006 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,4	300,1	279,4	2603		



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,146</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>3,050</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,048</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,189</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,900</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>11,9</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,3 mm Amplituda hrapavosti: 20,0 mm

Debljina ispune: 3 mm Tlačna čvrstoća JCS: 90,5 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 13. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-006DSR-CNL-2-0 13. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 6. 10. 2020.

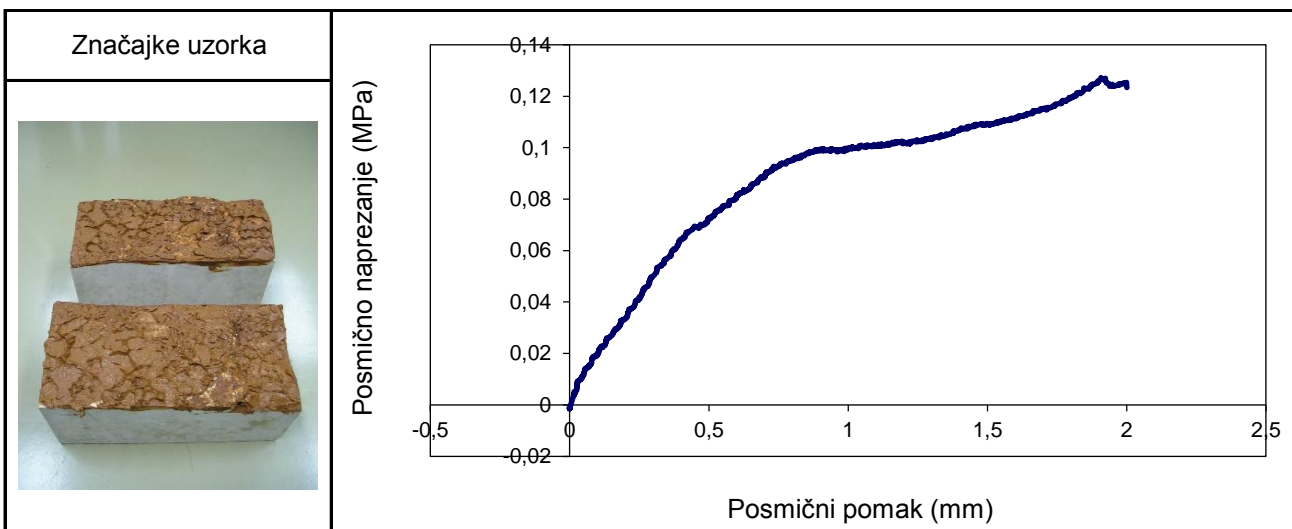
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) laboratorijski pripremljene na vlažnost granice tečenja ( $w_l=70\%$ )

Lab. broj: 19-013-006 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,4	300,1	279,4	2603		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,031</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,127</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>76,4</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 1,908 mm Brzina smicanja: 0,20 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-006DSR-CNL-3-0 13. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



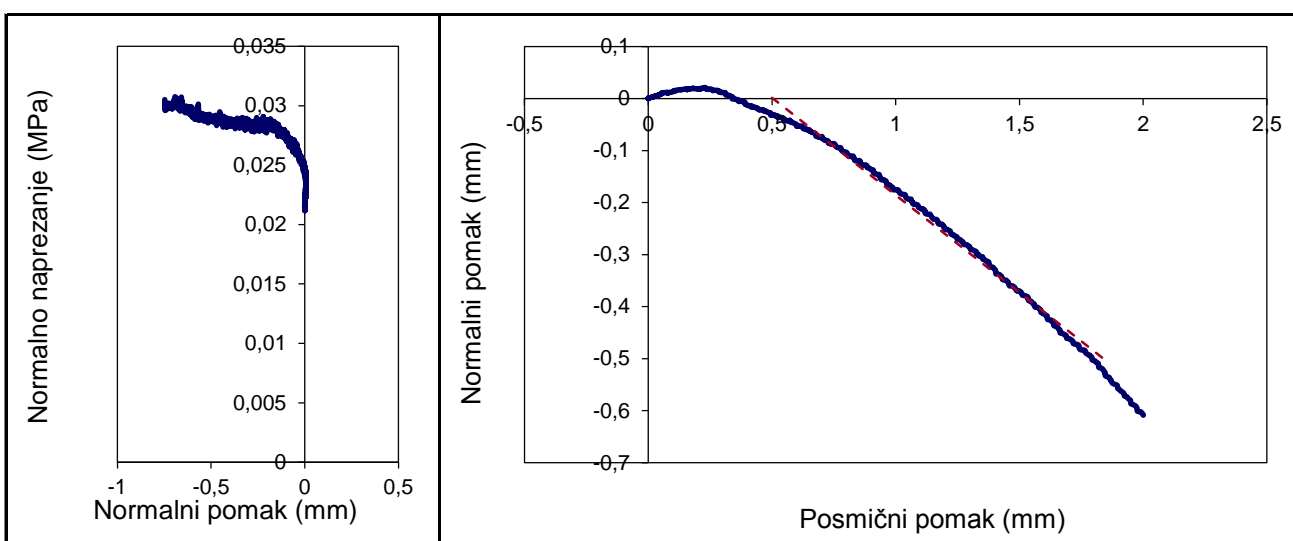
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-006 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,4	Duljina $l$ (mm) 300,1	Visina $h$ (mm) 279,4	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2603		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,096</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,800</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,053</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,505</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,350</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>20,5</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,3 mm Amplituda hrapavosti: 20,0 mm

Debljina ispune: 2,3 mm Tlačna čvrstoća JCS: 90,5 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 13. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-006DSR-CNL-3-0 13. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 6. 10. 2020.

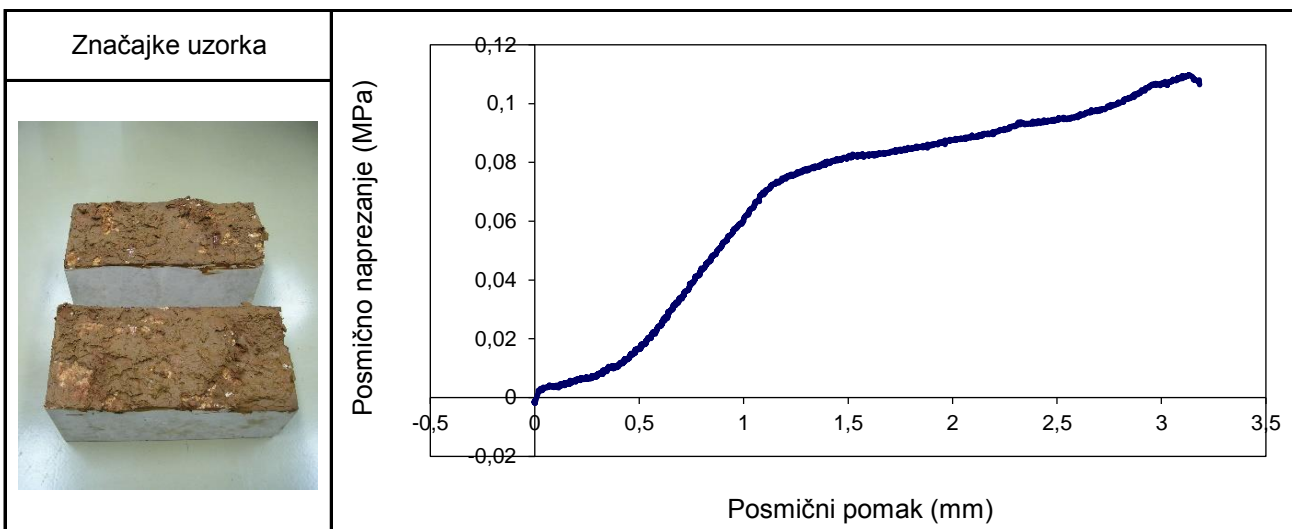
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) i kršja laboratorijski pripremljenog na stanje vlažnosti od 45%

Lab. broj: 19-013-006 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,4	300,1	279,4	2603		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,029</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,110</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>75,4</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 3,131 mm Brzina smicanja: 0,18 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-006DSR-CNL-4-0 13. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



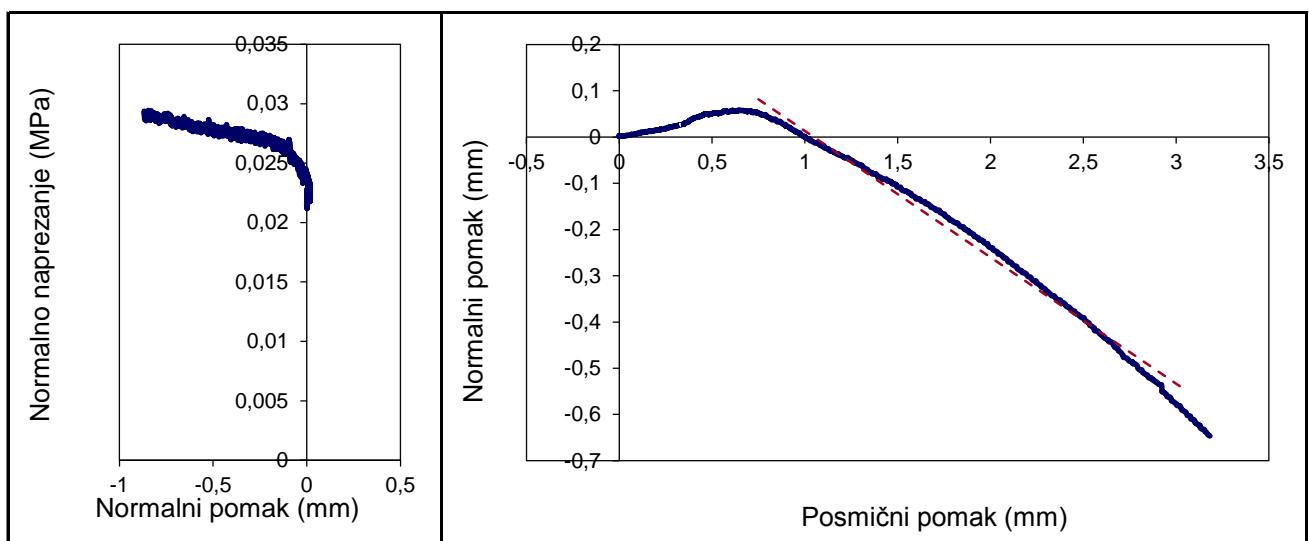
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-006 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,4	Duljina $l$ (mm) 300,1	Visina $h$ (mm) 279,4	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2603		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ mm	Normalna krutost $k_n$ MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,116</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>3,000</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,039</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,629</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,300</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>15,3</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,3 mm Amplituda hrapavosti: 20,0 mm

Debljina ispune: 3 mm Tlačna čvrstoća JCS: 90,5 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje ploha < 1%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 13. 10. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-006DSR-CNL-4-0 13. 10. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 8. 12. 2020.

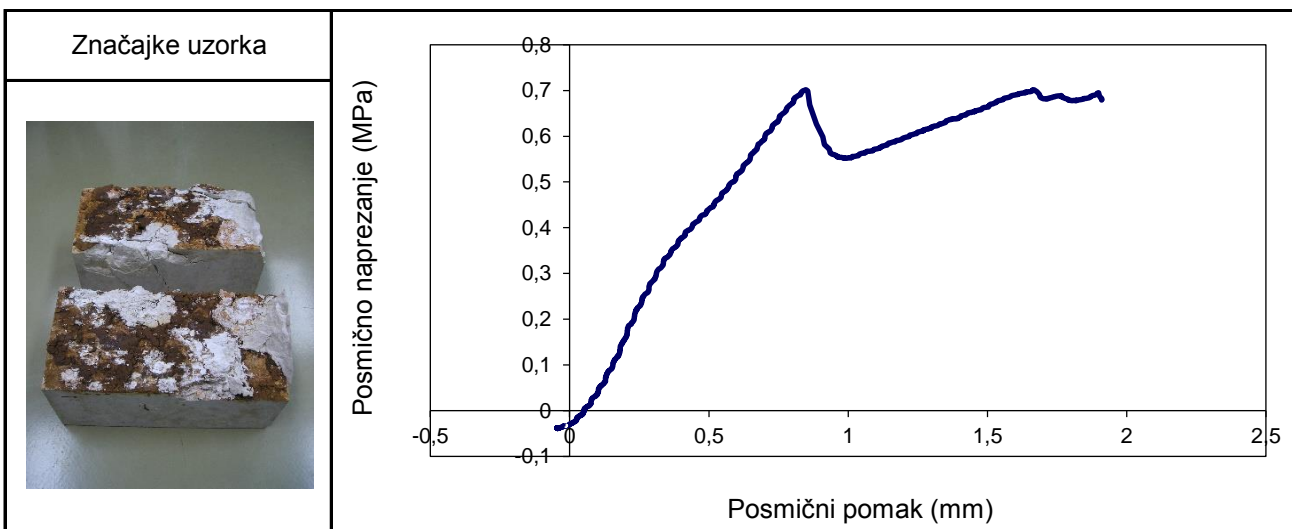
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) i kršja laboratorijski pripremljenog na stanje vlažnosti od 45%

Lab. broj: 19-013-006 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,4	300,1	279,4	2603		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>0,792</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>0,702</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>41,5</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 1,668 mm Brzina smicanja: 0,20 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-006DSR-CNL-4-1 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--





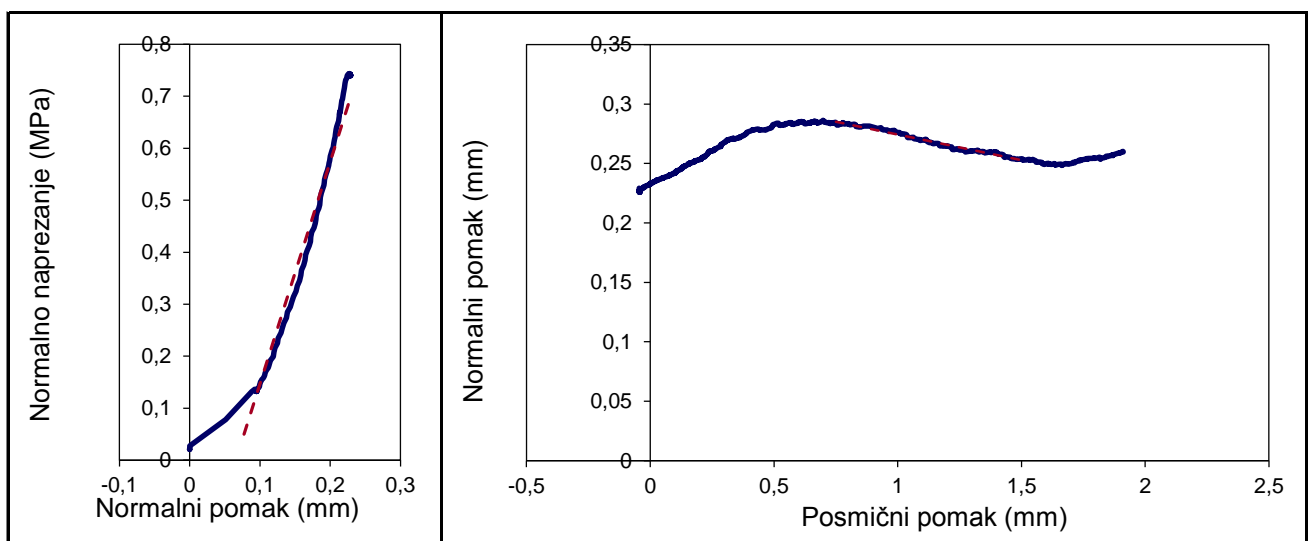
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-006 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,4	Duljina $l$ (mm) 300,1	Visina $h$ (mm) 279,4	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2603		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>0,650</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,152</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>4,280</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,676</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>1,550</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,436</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,032</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,750</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>2,5</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,3 mm Amplituda hrapavosti: 20,0 mm

Debljina ispune: 3,38 mm Tlačna čvrstoća JCS: 90,5 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 5%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 10. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-006DSR-CNL-4-1 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 8. 12. 2020.

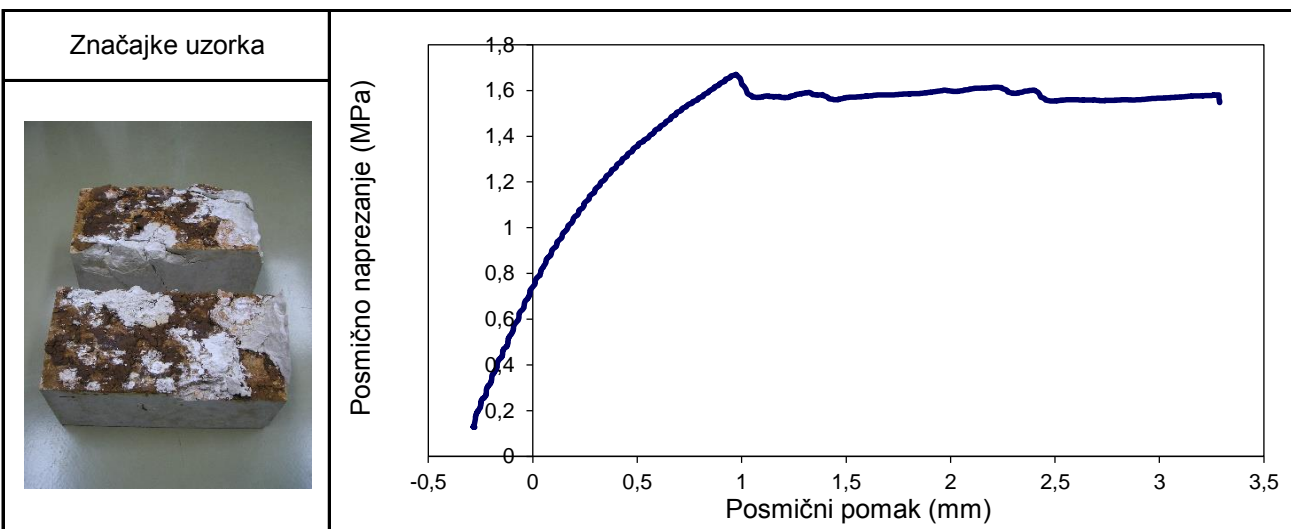
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) i kršja laboratorijski pripremljenog na stanje vlažnosti od 45%

Lab. broj: 19-013-006 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,4	300,1	279,4	2603		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>1,614</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>1,670</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>46,0</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 0,973 mm Brzina smicanja: 0,22 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-006DSR-CNL-4-2 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



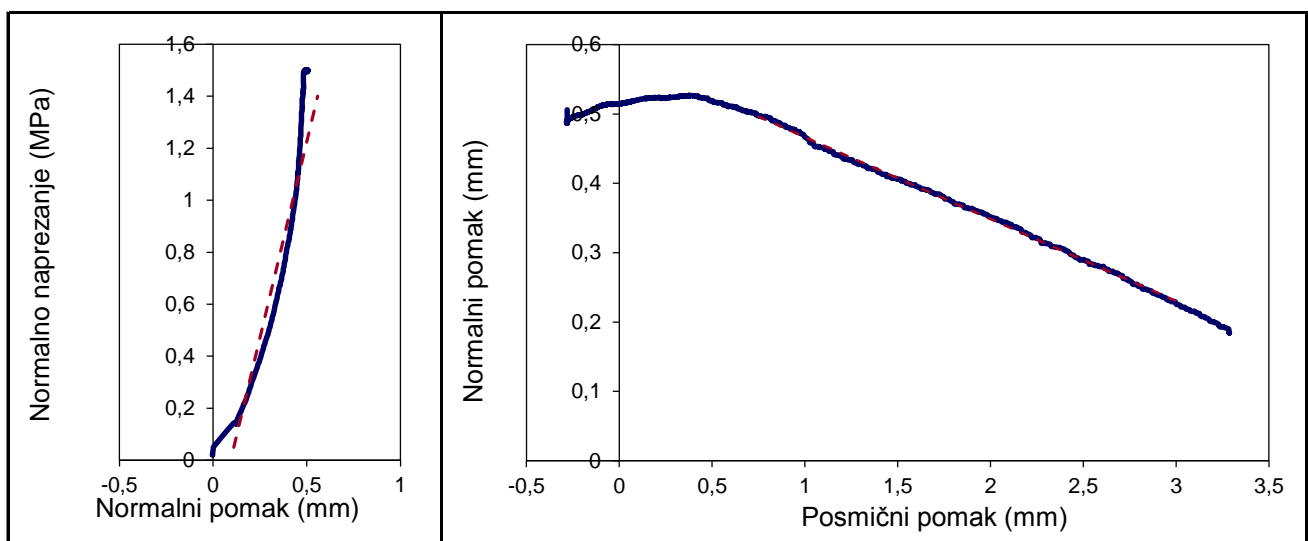
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-006 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )
150,4	300,1	279,4	2603



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>1,350</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,448</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>3,013</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>0,486</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>0,400</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>1,215</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,266</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,250</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>6,7</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,3 mm Amplituda hrapavosti: 20,0 mm

Debljina ispune: 3,38 mm Tlačna čvrstoća JCS: 90,5 MPa

Značajke sloma: Smični lom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 15%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 10. 12. 2020.

Odgovorna osoba: <b>Dr. sc. Petar Hrženjak</b>	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-006DSR-CNL-4-2 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: <b>Dr. sc. Petar Hrženjak</b>
---	--	---



## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 1/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Naručitelj: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Projekt: Model za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta u masivnim vapnencima

Ter. uzorkov.: S. Zvocak, dipl. ing. geol. Datum uzorkov.: -

Lab. uzorkov.: E. Oršulić, dipl. ing. Datum uzorkov.: 8. 12. 2020.

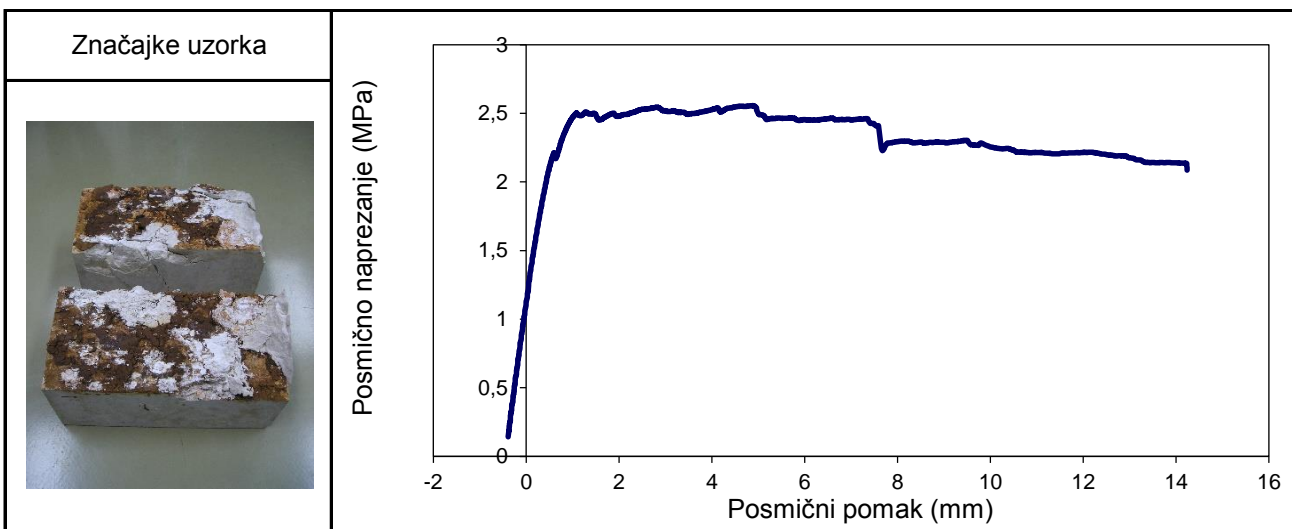
Post. s uzorcima: Uzorak nije bio zaštićen od promjene vlažnosti

Geogr. porijeklo: Kanfanar

Litološki opis i karakt. uzorka: Uzorak vapnenca s prirodnim diskontinuitetom koji sadrži ispunu od gline visoke plastičnosti (CH) i kršja laboratorijski pripremljenog na stanje vlažnosti od 45%

Lab. broj: 19-013-006 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm)	Duljina $l$ (mm)	Visina $h$ (mm)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )		
150,4	300,1	279,4	2603		



Normalno naprezanje $\sigma_n$ <b>3,188</b> MPa	Vršna posmična čvrstoća $\tau_{peak}$ <b>2,557</b> MPa	Vršni kut trenja $\varphi_{peak}$ <b>38,7</b> °
Normalno naprezanje $\sigma_{res}$	Rezidualna posmična čvrstoća $\tau_{res}$	Rezidualni kut trenja $\varphi_{res}$

Posmični pomak pri slomu: 4,881 mm Brzina smicanja: 0,46 mm/min

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-006DSR-CNL-4-3 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--



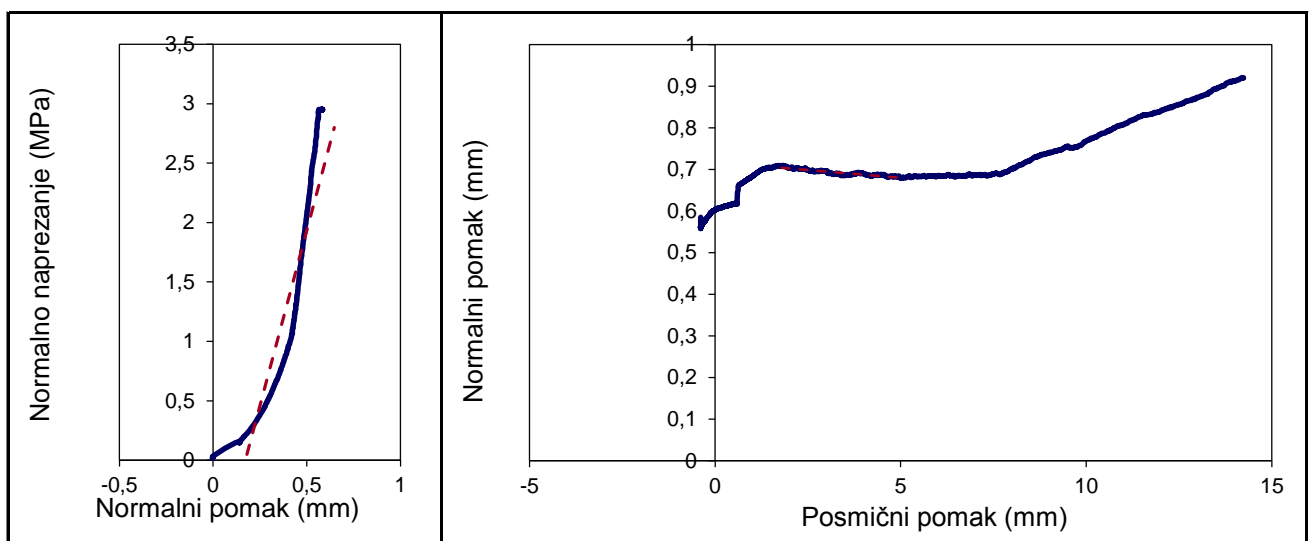
## IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU posmične čvrstoće stijenskih diskontinuiteta u uvjetima konstantnog normalnog naprezanja

(strana 2/2)

Radni nalog: 19-013 Datum zaprima.: 21. 11. 2018.

Lab. broj: 19-013-006 Lokacija: Kanfanar III Dubina: - m

Širina $w$ (mm) 150,4	Duljina $l$ (mm) 300,1	Visina $h$ (mm) 279,4	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) 2603		
--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------------------	--	--



Normalno naprezanje $\Delta\sigma_n$ <b>2,750</b> MPa	Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>0,467</b> mm	Normalna krutost $k_n$ <b>5,889</b> MPa/mm
Posmično naprezanje $\Delta\tau_s$ <b>1,035</b> MPa	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>2,300</b> mm	Posmična krutost $k_s$ <b>0,450</b> MPa/mm
Normalni pomak $\Delta\delta_n$ <b>-0,024</b> mm	Posmični pomak $\Delta\delta_s$ <b>3,200</b> mm	Vršni kut dilatancije $\psi_{peak}$ <b>0,4</b> °

Zijev diskontinuiteta: 4,3 mm Amplituda hrapavosti: 20,0 mm

Debljina ispune: 3,38 mm Tlačna čvrstoća JCS: 90,5 MPa

Značajke sloma: Smični slom uz oštećenje stijenki diskontinuiteta oko 50%

Metoda ispit.: ISRM SM for laboratory determination of the shear strength of rock joints, 2014

Napomena:

Ispitni uređaji: NI mjerni sustav, SBEL servo, Soiltest pumpa Datum ispit.: 10. 12. 2020.

Odgovorna osoba: Dr. sc. Petar Hrženjak	Oznaka i datum izvještaja: 19-013-006DSR-CNL-4-3 18. 12. 2020.	Voditelj odjela: Dr. sc. Petar Hrženjak
--	--	--