

# Utjecaj rastrošbe na trajnost zasjeka u mekoj stijeni

---

**Vlastelica, Goran**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

<https://doi.org/10.31534/DocT.037.VlaG>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:543235>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-26**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT

  
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**Sveučilište u Splitu**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,**  
**ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

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

**UTJECAJ RASTROŠBE NA TRAJNOST**  
**ZASJEKA U MEKOJ STIJENI**

**D i s e r t a c i j a**

**Split, 2015.**



**Sveučilište u Splitu**

**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE  
I GEODEZIJE**

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

**UTJECAJ RASTROŠBE NA TRAJNOST  
ZASJEKA U MEKOJ STIJENI**

**Disertacija**

**Split, 2015.**

Goran Vlastelica

Redni broj 37

**Ova disertacija predana je na ocjenu  
Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije,  
Sveučilišta u Splitu u svrhu stjecanja  
akadenskog stupnja doktora tehničkih  
znanosti u znanstvenom polju građevinarstvo.**

**Mentor:** prof.dr.sc. Predrag Mišćević

**Povjerenstvo za ocjenu:**

prof.dr.sc. Tanja Roje-Bonacci

prof.dr.sc. Predrag Mišćević

prof.dr.sc. Željko Arbanas



## **Povjerenstvo za obranu**

prof.dr.sc. Tanja Roje-Bonacci

prof.dr.sc. Predrag Mišćević

prof.dr.sc. Željko Arbanas

Rad je obranjen 24. travnja, 2015.

Tajnica:

Saša Delić, dipl.iur.

**Rad sadrži:**

168 stranica teksta

94 slike

30 tablica

3 priloga

154 citirane reference

*Zahvaljujem svima koji su dali doprinos dovršetku ovog rada, a posebno:*

*Mentoru prof. dr. sc. Predragu Miščeviću za podršku i savjete u svim fazama istraživanja, posebice za uključivanje u japansko-hrvatski bilateralni projekt.*

*Prof. dr. sc. Tanji Roje-Bonacci za detaljan pregled rada, kao i na vrlo korisnim savjetima tijekom pisanja koji su cjelokupni rad zasigurno učinili kvalitetnije prezentiranim.*

*Prof. dr. sc. Željku Arbanasu na savjetima, kao i nadasve srdačnoj i konstruktivnoj suradnji, još od početka japansko-hrvatskog projekta.*

*Prof. dr. sc. Bošku Milošu na nesebičnoj pomoći vezanoj uz specifična poglavlja, literaturu i obradu rezultata istraživanja. Bez njegove pomoći infracrveni dio spektra bi mi i dalje bio nevidljiv.*

*Dragom kolegi Tihomiru Bilošu građ. teh. na tisućama utrošenih radnih sati u provođenju laboratorijskih ispitivanja i terenskih aktivnosti, te na konstruktivnim i često dugim razgovorima o stručnim, a nerijetko i o životnim temama.*

*Dragoj kolegici Daši Salvezani (rođ. Sinanović) mag.ing.aedif. na pomoći pri izradi tablica, dijagrama, crteža i formatiranju teksta, kao i nadasve detaljnom pregledu svakog slova ovog rada. Svi eventualni tipfeleri su namjerni.*

*Cemex Hrvatska d.d. na ustupljenim arhivskim zapisima i uzorcima, kao i pristupu kamenolomima Sv. Juraj i 10. Kolovoz. Pri tome posebno kolegi Anti Grubišiću dipl. ing.*

*Svim kolegama s japansko-hrvatskog projekta „Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje rizika klizanja i bujica u Hrvatskoj“, posebice prof. dr. sc. Hiroshiju Fukuoki i prof. dr. sc. Genu Furuyi na suradnji i savjetima te kolegici Jasmini Martinčević na ustupljenim mineraloškim analizama s područja Medvednice. Velika zahvala i svim institucijama koje su financirale ovaj projekt, kao i nabavku potrebne opreme za provedbu ovog istraživanja.*

*Svim prijateljima i kolegama na razumijevanju i podršci.*

*I na kraju, voljenoj supruzi Kristini veliko hvala na pruženom strpljenju, odricanju i ljubavi. Bez njene podrške dovršetak ovog rada vrlo vjerojatno ne bi bio moguć i zasigurno ne bi imao smisla.*

Goran Vlastelica, dipl. ing. građ.

## Utjecaj rastrošbe na trajnost zasjeka u mekoj stijeni

### Sažetak:

Na primjeru lapora kao gradiva s područja Dalmacije i zasjeka kao primjera geotehničkog zahvata u prirodi, sagledani su osnovni procesi koji dovode do pojave rastrošbe, ali i posljedice iste koje se u konačnici manifestiraju in situ. Upotrebom klasičnih laboratorijskih tehnika mehanike stijena, uz nadopune, izmjene i reinterpretaciju kriterija, provedeno je sustavno istraživanje utvrđivanja podložnosti gradiva rastrošbi. Istraživanje je provedeno na intaktnim uzorcima, ali i na uzorcima pri različitim fazama laboratorijski oponašane rastrošbe. Pritom su uočene određene manjkavosti uvriježenih klasifikacija, te su predložene izmjene i dodaci. Rezultati su izraženi putem indeksa trajnosti i parametara posmične čvrstoće pri različitim fazama degradacije gradiva uslijed rastrošbe. Osim klasičnih laboratorijskih tehnika upotrebljene su i dosad neuvriježene tehnike temeljene na VIS-NIR spektrometriji. Prvi rezultati pokazuju da je moguće detektirati ključne mineraloške komponente ovog tipa gradiva, ali još važnije i na mogućnost procjene podložnosti rastrošbi. Nadalje, izvršen je niz opažanja zasjeka na 14 pilot lokacija koristeći TLS za kreiranje 3D modela morfologije zasjeka. Istraživanje je provedeno za različite vremenske korake i broj opažanja, pritom omogućujući definiranje prosječnih stopa erozije zasjeka u ovom tipu gradiva, kao osnove za izradu prognoznih i povratnih analiza. Na koncu su provjereni poznati matematički modeli razvoja erozije na zasjecima te su predložene smjernice za korištenje.

**Ključne riječi:** rastrošba, trajnost, lapor, meka stijena, zasjek, spektrometrija, TLS, modeliranje.

Goran Vlastelica, M. Eng.

## The Influence of Weathering on Durability of Cuts in Soft Rock Mass

### Abstract:

The thesis describes basic processes which lead to weathering of soft rock and their typical manifestations on site. For that, marl from Eocene flysch strata that can be found in Dalmatia, was used as an example of soft rock, while the usual form of open cut slopes was used as an example of a geotechnical construction. A systematic study was carried out using the conventional rock mechanics laboratory techniques and apparatuses, with some additions as well as changes in the procedure and the re-interpretation of some general criteria, all in favor of determining the best way to evaluate material's susceptibility to weathering. In addition to standard laboratory techniques, new testing procedure based on VIS-NIR spectrometry was also used. First results show that it is possible to detect key mineralogical components for this type of material, and more importantly, the ability to assess susceptibility to weathering. Furthermore, a series of observations in manmade cuts at 14 pilot sites using terrestrial laser scanner were made. For the purpose of forecasting and retrograde analysis, the survey was conducted in different time intervals and number of observations, all for purpose of defining the average rate of erosion in cuts of this type of material. Consequently, two known mathematical models for development of erosion in cuts are calibrated and the guidelines on their usage are proposed.

**Keywords:** weathering, durability, marl, soft rock, cut, slope, spectrometry, TLS, modelling

## S a d r Ź a j

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. UVOD.....</b>                                                    | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivacija .....                                                  | 2         |
| 1.2. Ciljevi istraživanja .....                                        | 7         |
| 1.3. Plan istraživanja i metodologija.....                             | 8         |
| 1.3.1. Određivanje inženjerskih svojstva lapora .....                  | 10        |
| 1.3.2. Spektrometrijska analiza .....                                  | 10        |
| 1.3.3. Analiza trajnosti zasjeka u mekoj stijeni.....                  | 11        |
| 1.4. Područje istraživanja.....                                        | 12        |
| 1.4.1. Osnovne geološke značajke područja .....                        | 12        |
| 1.4.2. Klimatske značajke područja .....                               | 16        |
| 1.4.3. Postojeća saznanja u području istraživanja .....                | 18        |
| 1.5. Organizacija doktorske disertacije.....                           | 21        |
| <b>2. MEKE STIJENE I RASTROŠBA.....</b>                                | <b>23</b> |
| 2.1. O mekim stijenama općenito .....                                  | 23        |
| 2.2. Definicija meke stijene .....                                     | 25        |
| 2.3. Osnovno o rastrošbi .....                                         | 27        |
| 2.3.1. Erozija .....                                                   | 31        |
| 2.4. Pojavnost rastrošbe na zasjecima u flišu .....                    | 33        |
| <b>3. UTJECAJ RASTROŠBE NA INŽENJERSKA SVOJSTVA MEKIH STIJENA.....</b> | <b>38</b> |
| 3.1. Uvod .....                                                        | 38        |
| 3.2. Laboratorijska ispitivanja svojstava mekih stijena .....          | 41        |
| 3.2.1. Uzorkovanje .....                                               | 41        |
| 3.2.2. Mineraloška analiza lapora.....                                 | 42        |
| 3.2.3. Indeksna svojstva meke stijene .....                            | 44        |
| 3.3. Analiza trajnosti meke stijene.....                               | 48        |
| 3.3.1. Indeks trajnosti .....                                          | 49        |
| 3.3.2. Modificirani indeks trajnosti .....                             | 51        |
| 3.3.3. Usporedba rezultata.....                                        | 54        |
| 3.4. Posmična čvrstoća meke stijene .....                              | 62        |
| 3.4.1. Laboratorijsko oponašanje rastrošbe .....                       | 65        |
| 3.4.2. Rezultati .....                                                 | 67        |
| 3.5. Diskusija i zaključci.....                                        | 72        |

|                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4. UPOTREBA VIS-NIR SPEKTROMETRIJE U ANALIZI SVOJSTAVA MEKIH STIJENA.....</b>                     | <b>75</b>  |
| 4.1. Uvod .....                                                                                      | 75         |
| 4.2. Osnove VIS-NIR spektrometrije .....                                                             | 77         |
| 4.3. Kvalitativna analiza mineraloškog sastava meke stijene upotrebom baze spektralnih otisaka ..... | 81         |
| 4.3.1. Kvalitativna analiza spektralnih otisaka lapora s područja Dalmacije.....                     | 84         |
| 4.3.2. Kvalitativna analiza spektralnih otisaka lapora s područja Medvednice .....                   | 90         |
| 4.4. Određivanje udjela karbonata u mekoj stijeni .....                                              | 92         |
| 4.4.1. Analiza reflektance dijela NIR spektra .....                                                  | 95         |
| 4.4.2. Analiza reflektance VIS-NIR spektra upotrebom kemometrijskih metoda .....                     | 99         |
| 4.5. Diskusija i zaključci.....                                                                      | 105        |
| <b>5. MODELIRANJE EROZIJE ZASJEKA U MEKOJ STIJENI .....</b>                                          | <b>107</b> |
| 5.1. Uvod .....                                                                                      | 107        |
| 5.2. Matematički modeli erozije uspravnog zasjeka.....                                               | 116        |
| 5.2.1. Fisher–Lehmannov model.....                                                                   | 116        |
| 5.2.2. Bakker–Le Heuxov model .....                                                                  | 119        |
| 5.3. Primjena terestičkog laserskog skeniranja.....                                                  | 121        |
| 5.3.1. Pribavljanje podataka .....                                                                   | 123        |
| 5.3.2. Usporedba oblaka točaka iz različitih epoha.....                                              | 124        |
| 5.4. Rezultati.....                                                                                  | 126        |
| 5.4.1. Pilot lokacija Žnjan 1 .....                                                                  | 126        |
| 5.4.2. Ostale pilot lokacije.....                                                                    | 132        |
| 5.4.3. Sumarni prikaz rezultata.....                                                                 | 145        |
| 5.5. Diskusija i zaključci.....                                                                      | 146        |
| <b>6. ZAKLJUČCI I PRAVCI DALJNJIH ISTRAŽIVANJA.....</b>                                              | <b>148</b> |
| 6.1. Zaključci .....                                                                                 | 148        |
| 6.2. Mogući pravci daljnjih istraživanja .....                                                       | 152        |
| <b>7. LITERATURA.....</b>                                                                            | <b>154</b> |
| <b>PRILOZI.....</b>                                                                                  | <b>169</b> |
| <b>POPISI .....</b>                                                                                  | <b>189</b> |
| Popis kratica.....                                                                                   | 190        |
| Popis slika.....                                                                                     | 191        |
| Popis tablica.....                                                                                   | 195        |
| <b>ŽIVOTOPIS .....</b>                                                                               | <b>197</b> |

## 1. UVOD

Meka stijena je vrlo složeno prirodno gradivo i čest uzrok mnogih poteškoća u građevinskoj praksi. Upravo zbog prirodnog porijekla gradiva, ponekad i izražene heterogenosti sredine u kojoj se pojavljuje, često nije moguće opisati njena svojstva na razumljiv i primjenjiv način za svakidašnju praksu. Standardizirani pokusi određivanja inženjerskih svojstava stijena, a pogotovo tla, ponekad nisu primjenjivi bez preinaka ili rezultati istih zahtjevaju dodatna objašnjenja.

Na području Jadranske obale pojavnost mekih stijena se povezuje uz kompleks sedimentnih naslaga poznatih pod nazivom fliš. Flišni tereni predstavljaju složenu geotehničku i sedimentološku sredinu izgrađenu od litološki različitih članova, pri čemu su samo pojedini, zahvaljujući svom mineraloškom sastavu, izrazito skloni rastrošbi i eroziji. Upravo ta raznolikost članova kod zasjeka u flišnim stijenskim masama u prvi red ističe problem različito stupnjevane rastrošbe i lokalnih odranjanja.

Predmet istraživanja ovog rada predstavljaju postojeći zasjeci sa šireg područja grada Splita izgrađeni u flišu. Egzogeni procesi koji se odvijaju na njima (rastrošba, erozija površinskog sloja i lokalna klizanja, odranjanje, ...) posljedično utječu na sigurnost i cijenu održavanja objekata koji se nalaze u podnožju tih kosina, ali i na stabilnost objekata na vrhu kosine. Ublažavanje posljedica tih procesa kroz doprinos razumjevanju istih, kao i preporučene zahvate pri izgradnji i/ili održavanje građevine u njenom vijeku trajanja, neki su od željenih doprinosa ovog rada.

## 1.1. Motivacija

Promatrajući geomorfologiju Vanjskih Dinarida nije teško zaključiti da osim endogenih i egzogenih procesa, koji su ih i oblikovali kroz geološku povijest, do izražaja dolazi i sve veći antropogeni utjecaj. Upravo potreba modernog čovjeka da oblikuje sve veće zahvate u prirodi, bilo za potrebe iskopa sirovina, izgradnje širokih prometnica, velikih vodoravnih platoa raznih namjena, najviše dolazi do izražaja u relativno strmim obalnim područjima Dalmacije (Slika 1.1.a). Nadalje, kada se navedeni zahvati „preklope“ s geološki „slabom“ podlogom kao što je fliš, odnosno njegovim „mekšim“ sastavnicama kao što je lapor, rezultat često može biti nepovoljan, kako sa sigurnosnog tako i s estetskog stajališta (Slika 1.1.b).



(a)



(b)

Slika 1.1. Primjeri antropogenog utjecaja: a) kamenolomi u širem području grada Splita (izvor: Google earth) i b) zasjecanje kosine na mikrolokaciji na području grada Splita

Iskopi u mekim stijenama se najčešće moraju izvoditi miniranjem ili pomoću teških pneumatskih čekića. Međutim, nakon iskopa započinje se razvijati proces razlaganja stijene – rastrošba (engl. „weathering“), kako na površini zasjeka tako i kroz unutrašnjost stijenske mase. Iako su sve stijene litosfere podložne rastrošbi, njeni učinci su u slučaju mekih stijena vidljivi već unutar razdoblja od nekoliko mjeseci do nekoliko godina te ih je moguće zapaziti u okolišu i od strane laika. Iz tog razloga je vrlo bitno poznavati procese koji uzrokuju rastrošbu, kao i njihove moguće posljedice. Ti procesi se vrlo često mogu uočiti i na mnogim prirodnim kosinama i zasjecima u flišnim naslagama i na području Dalmacije [1]. Na slici 1.2. prikazani su primjeri dviju kosina na Jadranskoj magistrali u općinama Podstrana i Dugi rat. Vidljiv je razvijeni proces degradacije lapora na površini kosine s nakupljanjem odlomljenih komada u dnu kosine.





(a)



(b)

*Slika 1.2.* Primjeri ogolina na Dalmatinskoj obali: a) kosina uz Jadransku magistralu u općini Podstrana i b) kosina iznad mjesta Duće u općini Dugi rat

Ovakav tip vrlo nepostojanog reljefa moguće je zapaziti u prirodi neovisno o antropogenom utjecaju, a u literaturi se nalazi pod nazivom ogoline (eng. “badland”). Ogoline se mogu pronaći i u obalnom području Dalmacije, međutim najčešće su površinom relativno male i neprimjećene. Najpoznatije ogoline u hrvatskoj mogu se pronaći u Istri [2], dok se u širem mediteranskom području mogu pronaći u Francuskim Alpama [3], Španjolskoj [4], Italiji [5], Maroku [6] i td. Razumijevanje procesa degradacije ogolina u žiži je mnogih istraživača, jer ti procesi često dovode do povećanja vjerojatnosti pojave klizanja kod takvih kosina [7].

Pojava klizišta u flišu je vrlo česta i kod izgradnje građevnih jama (Slika 1.3.), ukoliko se ne poduzmu odgovarajuće mjere zaštite. Tu najčešće dolazi do izražaja nepoznavanje brzine utjecaja rastrošbe na svojstva gradiva, upravo zbog njenih visokih čvrstoća u nedegradiranom stanju.



(a)



(b)

*Slika 1.3.* Građevna jama “Zdravstvene škole” u Splitu: a) urušavanje pokosa jame b) Procijeđivanje vode kroz sekundarne pukotine (označeno crvenim strelicama)

Slika 1.3.a prikazuje klizište koje se formiralo nekoliko mjeseci nakon iskopa u građevinskoj jami za potrebe izgradnje "Zdravstvene škole" u Splitu. U ovom primjeru osim na površini, proces rastrošbe se širi i dublje u stijensku masu i to kroz sustav pukotina kroz koje se voda može procjeđivati (Slika 1.3.b). Također, neposredno prije pojave klizišta, zabilježene su znatne oborine (preko  $50 \text{ mm/m}^2$ ) što ukazuje da i voda, vlaženjem građiva i povećanjem pornog pritiska, ima vrlo važan na pojavu ovakvih klizanja. Srećom u ovom slučaju klizanje se desilo tijekom noći te nije ugrozilo živote radnika na dnu građevne jame.

Na slici 1.4.a prikazan je primjer klizišta koja su vrlo česta u okolini Splita na prirodnim klifovima u flišu uzduž južne obale grada. Proces klizanja se ponavlja jer odloženi materijal na dnu kosine odnosi more i s time oslobađa plohu za sljedeću "fazu klizanja".

Na slici 1.4.b prikazan je primjer formiranja većih blokova pješčenjaka na prirodnom klifu u naslazi fliša, a koji je također posljedica rastrošbe lapora. Slojevi pješčenjaka (kalkarenita, odnosno kalcirudita) unutar strukture slojeva fliša nisu podložni procesu rastrošbe istom brzinom kao lapori. Rastrošbom slojeva lapora ispod i iznad sloja pješčenjaka, lapor se dezintegrira i postupno biva uklonjen djelovanjem gravitacije i oborina [8, 9], odnosno nastaje proces diferencijalne rastrošbe (eng. "differential weathering"). Izdanci slojeva pješčenjaka ostaju na kosinama poput "konzola". Kada duljina konzole postane dovoljno velika, uslijed djelovanja momenta savijanja, odvajaju se blokovi i nastaje odron koji ugrožava prostor ispod kosine.



(a)



(b)

Slika 1.4. a) Klizište uz obalu mora na prirodnom klifu u flišnoj naslazi (Split, lokacija Duilovo)  
b) "Konzola" od čvršćeg sloja pješčenjaka na kosini (diferencijalna rastrošba po kosini)

Prikazane situacije su ujedno i primjeri štete koja može nastati kao posljedica procesa rastrošbe mekih stijena, u prvom redu kroz ugrožavanje ljudskih života i imovine, ali i ne manje



bitnih: produžetka trajanja gradnje objekata, nemogućnosti korištenja plaža i šetnica, zatvaranja vitalnih prometnica, itd

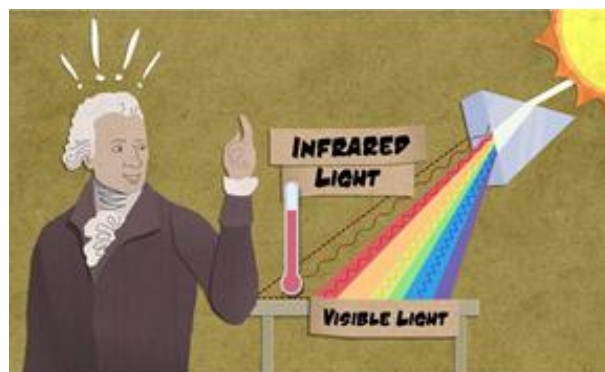
Iz prethodnih primjera moguće je primjetiti da je problem trajnosti (eng „durability“) prirodnih kosina i zasjeka u mekim stijenama prepoznatljiv i sveprisutan. Trajnost meke stijene je u izravnoj vezi s promjenom inženjerskih svojstava gradiva u vremenu, od početnog svojstva stijene pri iskopu, do prašinasto-glinovitih ostataka na kraju procesa. Upravo takvo svojstvo trajnosti odredilo je „u praksi“ pojam meke stijene kao gradiva koje se u nedinutom stanju ponaša kao stijena (s donje granice područja koje pokrivaju stijene), ali koji se podvrgnut procesu rastrošbe, u konačnici razgradi u sitnozrni materijal, uz izraženu promjenu fizikalno-mehaničkih svojstava u odnosu na početno stanje.

Svaki novi uvid u procese, koji uzrokuju nestabilnosti kosina u vremenu, može pomoći u ublažavanju posljedica istih. Razvojem novih tehnologija u području mineralogije i geodezije, u prvom redu VIS-NIR (visible and near-infrared) spektrometrije i LiDAR (Light Detection and Ranging) tehnologije, otvaraju se novi putevi za praćenje promjena zemljine kore i gradiva od kojih je sačinjena. Te promjene se mogu pratiti na globalnoj razini, ali i na lokalnoj razini upotrebom terestičkih inačica.

Tako je hiperspektralna analiza u posljednja tri desetljeća [10] svoju primjenu našla u agronomiji, industriji prehrambenih proizvoda, mineralogiji, astronomiji itd., a u posljednje vrijeme i u geologiji kod procjene mineraloškog sastava stijena, upotrebom prijenosnih inačica instrumenata (Slika 1.5.).



(a)

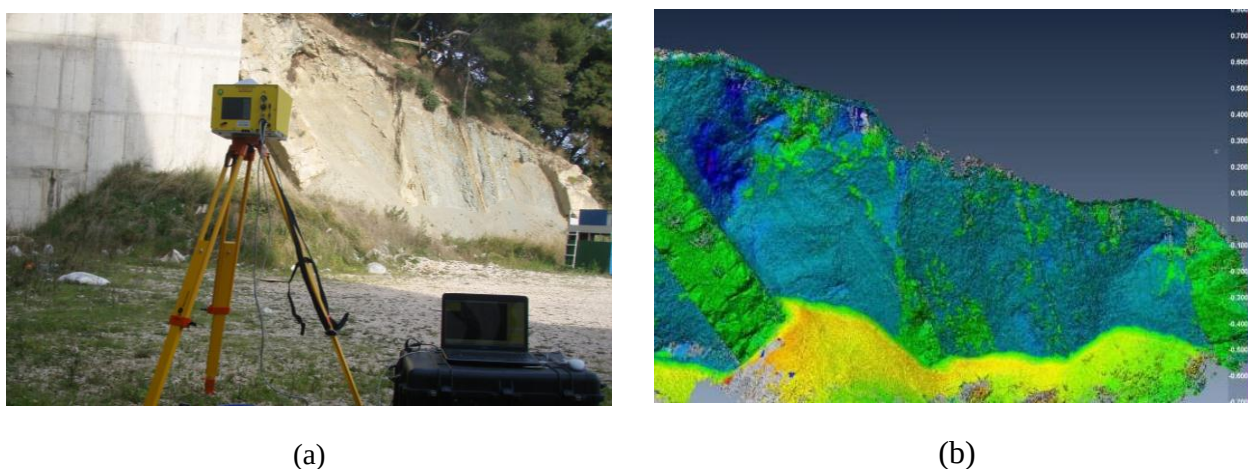


(b)

Slika 1.5. a) Prijenosni spektrometar TerraSpec 4 Explorer b) Slikoviti prikaz pojavnosti blisko-infracrvene svjetlosti (eng. near-infrared light)

U isto vrijeme LiDAR tehnologija se, u kombinaciji s različitim platformama (sateliti, zrakoplovi, helikopteri, ...) razvila u nezaobilazni alat za izradu digitalnih elevacijskih modela

(engl. digital elevation model - DEM), ali i za niz primjena u agronomiji, arheologiji, geologiji, rudarstvu, meteorologiji, itd [11]. Razvojem prijenosnih varijanti „terestičkih laserskih skenera“, pristupačnijoj cijeni i sve većoj preciznosti, u posljednje vrijeme pronalaze svoju upotrebu i u praćenju napredovanja erozije kosina koje nisu bile dostupne iz zračnih snimaka [12-14]. Na slici 1.6. prikazan je prijenosni terestički laserski skener ILRIS-3D-ER korišten u ovom radu, kao i primjer rezultata usporedbe dvaju snimaka zasjeka sa slike 1.1.b s vremenskim odmakom od jedne godine. Upotrebom ovih tehnologija moguće je pristupiti analizama trajnosti, ne samo kroz klasične laboratorijske tehnike, već i „in-situ“ na konkretnim primjerima pritom vrednujući stvarne promjene.



Slika 1.6. a) Terestički laserski skener ILRIS-3D-ER b) Usporedba dvaju snimaka zasjeka s vremenskim odmakom od jedne godine

Klasične laboratorijske i terenske metode određivanja inženjerskih svojstava stijene, razvijane i unaprijeđivane od kraja 70-godina prošlog stoljeća [15], su nezaobilazni dio svakog istraživanja kojim se teži praktičnoj upotrebi u struci. Laboratorijska ispitivanja mehaničkih svojstava intaktnih stijenskih uzoraka u geotehnici su nezaobilazna, jer se radi o osnovnim svojstvima kod bilo koje opće prihvaćene razredbe stijenske mase, kriterija čvrstoće stijenske mase, procjene mogućnosti iskopa, određivanja parametara miniranja, ocjene upotrebljivosti gradiva za izradu nasipa, određivanja nosivosti stijenske mase i dr. [15-20].

Međutim, kod terenskih mjerenja, sama pojava novih tehnologija mjerenja koje pružaju daleko veće mogućnosti u praćenju geometrijskih promjena zasjeka i mineraloških svojstava gradiva od koji su sastavljeni, obvezuje na primjenu istih te uspostavljanje novih metoda i protokola njihove upotrebe. Upravo dostupnost istih, kao i očita uporabna vrijednost, motivira autora da pristupi rješavanju teze ovog rada na multidisciplinarnan i dosad neuvriježen način.

## 1.2. Ciljevi istraživanja

Uvažavajući prethodno opisanu problematiku kroz motivaciju za izradu disertacije, ali i činjenicu na sveprisutni i potpuni izostanak zakonske regulative na području RH, odnosno nedostatak smjernica za projektiranje te održavanje zasjeka i konstrukcija u mekim stijenama, postavljaju se sljedeći ciljevi istraživanja:

- Preispitati dosadašnja saznanja o pojavi rastrošbe mekih stijena na primjeru lapora i naslaga fliša s područja Dalmacije, ponajprije kroz njihovu uporabnu vrijednost i trajnost kod izrade zasjeka u takvim stijenskim masama.
- Izvršiti ispitivanja inženjerskih svojstava lapora i prikupiti dostupne podatke o obavljenim ispitivanjima iz literature. Žarište istraživanja predstavljaju ispitivanja svojstava mekih stijena sa šireg splitskog područja s udjelom sastavnice  $\text{CaCO}_3$  u području od 30-80%.
- Protumačiti odnose između geomehaničkih (inženjerskih) i indeksnih (npr. SDI ili LSI indeks) svojstava te ispitati mogućnost promjene pojedinih propisanih ispitivanja (npr. kroz variranje trajanja SDI pokusa, odnosno kroz dodatke uređaju za direktno smicanje koji omogućuju ispitivanje u različitim fazama laboratorijski oponašane rastrošbe).
- Osmisliti postupak oponašanja rastrošbe u laboratorijskim uvjetima i načine vrednovanja iste kroz Mohr-Coulombove parametre posmične čvrstoće stijene.
- Statističkim metodama utvrditi korelacije između parametara čvrstoće, trajnosti, fizikalnih osobina i/ili djelomičnog uvida u mineralna svojstva (za praktičnu upotrebu  $\text{CaCO}_3$ ).
- Ispitati mogućnosti primjene VIS-NIR spektrometrije za procjenu udjela  $\text{CaCO}_3$  u stijeni u laboratorijskim i/ili terenskim uvjetima, uz primjenu odgovarajućih statističkih analiza.
- Ispitati mogućnosti primjene LiDAR tehnologije upotrebom terestickog laserskog skenera za vremensko praćenje procesa rastrošbe na primjeru uspravnog zasjeka u flišnoj stijenskoj masi i mogućnosti utvrđivanja „brzine“ trošenja zasjeka ovim postupkom, kao osnovnog parametra kod predviđajućih odnosno povratnih analiza.
- Ispitati primjenjivost rezultata promjene čvrstoće meke stijene na Bakker-Le Heux-ovom i Fisher–Lehmannovom modelu rastrošbe zasjeka u stijenskoj masi [21, 22], uz analizu mogućnosti modeliranja na primjeru zasjeka u mekoj stijeni s izvršenim osmatranjem.
- Izraditi smjernice za projektiranje zasjeka u ovom tipu materijala, kao i za potrebna laboratorijska ispitivanja.

### 1.3. Plan istraživanja i metodologija

Za ostvarenje navedenih ciljeva istraživanja izvršeni su niže navedeni koraci (a) do (g), prikazani shemom istraživanja na slici 1.7.

#### *Uzorkovanje*

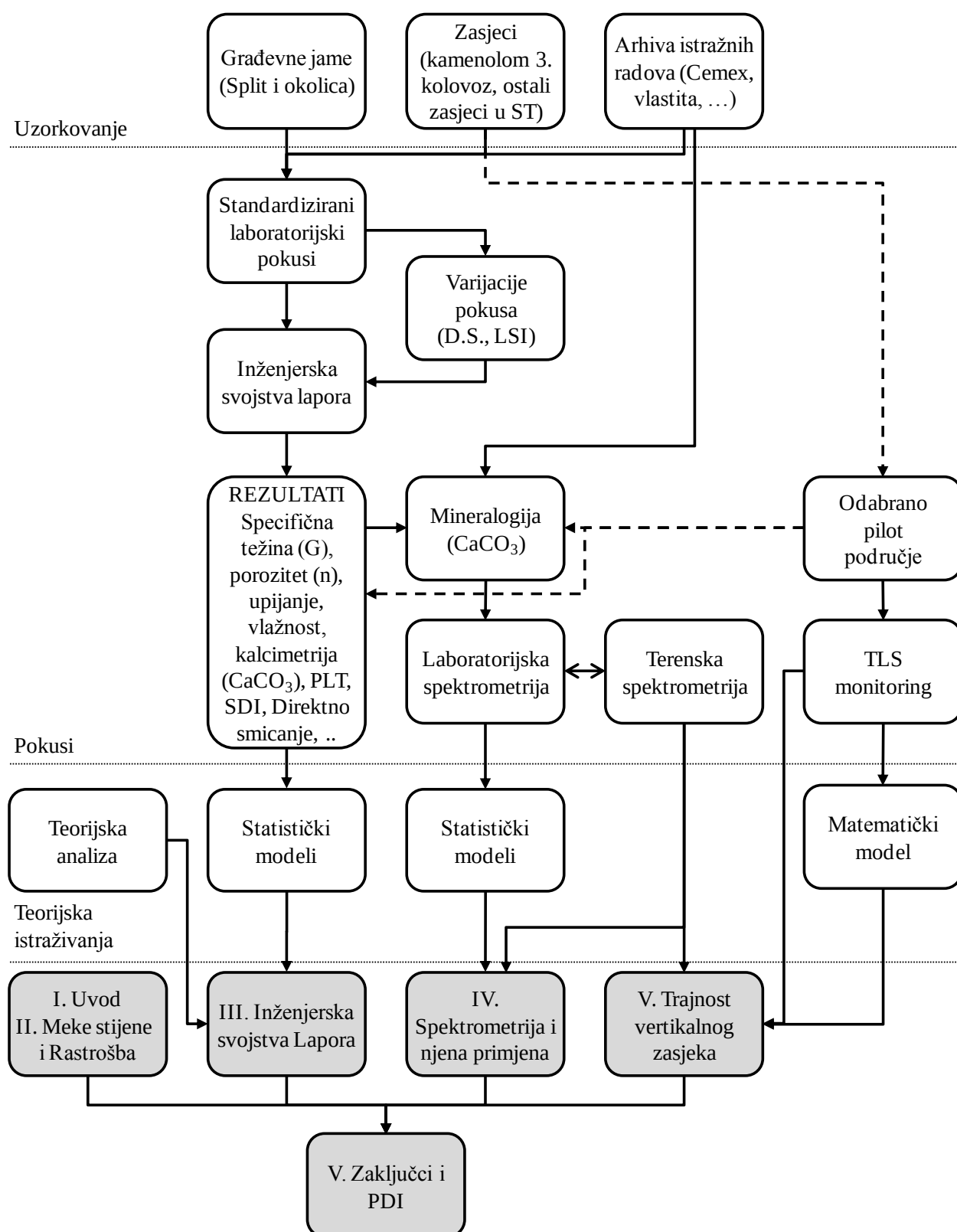
- (a) Prikupljanje uzoraka za ispitivanje inženjerskih svojstava lapora provedeno je na širem području grada Splita: na postojećim zasjecima uz prometnice, u kamenolomima, sondažnim bušenjem u okviru trenutno izvođenih istražnih radova te u iskopima građevnih jama (ovisno o dostupnosti).
- (b) Prikupljanje uzoraka za ispitivanje mineraloškog sastava VIS-NIR spektrometrijom provedeno je na uzorcima u sklopu podtočke (a), ali i nizu drugih lokacija koji zbog obima ispitivanja nisu uključeni u nju. U navedeno ispitivanje uključeni su i svi dostupni arhivski uzorci iz arhive FGAG-a i Cemexa, kao i uzorci prikupljeni na pilot lokacijama na kojima je vršeno terestičko skeniranje laserskim skenerom.

#### *Pokusi i opažanja*

- (c) Ispitivanje mineraloškog sastava rendgenskom difrakcijom (eng. X-ray diffraction method - XRD) određeno je na manjem broju uzoraka pri Rudarsko-naftno-geološkom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu i Hrvatskom geološkom institutu.
- (d) Svi standardizirani laboratorijski postupci, kao i njihove nestandardne varijacije, vršeni su u Geomehaničkom laboratoriju Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu. Cilj tih pokusa jest određivanje inženjerskih svojstava građiva opisanih u nastavku.
- (e) Uporedo s laboratorijskim ispitivanjima, izvršeno je opažanje promjene morfologije zasljea terestičkim laserskim skenerom na 14 pilot lokacija na širem području grada Splita u razdoblju od jedne do tri godine, ovisno o lokaciji.
- (f) Prikupljanje spektralnih podataka izvršeno je upotrebom prijenosnog spektrometra u Geomehaničkom laboratoriju Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu te na odabranim pilot lokacijama na području grada Splita.

#### *Teorijska istraživanja*

- (g) Uz analizu teoretske podloge istraživanju, rezultati su obrađeni kroz odgovarajuće statističke odnosno matematičke modele detaljno opisane u nastavku, te su prikazani kroz tri cjeline. U konačnici, rezultati svih ispitivanja dodatno su prokomentirani u zaključnom poglavlju.



Slika 1.7. Shema istraživanja i koncept disertacije

### 1.3.1. Određivanje inženjerskih svojstva lapora

Za potrebe određivanja inženjerskih svojstava stijene laboratorijskim postupcima odredit će se sljedeće: specifična gustoća stijene, suha gustoća stijene, porozitet, upijanje vode, udio kalcijevog karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ), indeks točkaste čvrstoće, indeks trajnosti stijene i modificirani indeks trajnosti stijene. Za odabrane uzorke odredit će se parametri posmične čvrstoće direktnim smicanjem [15, 23-25]. Sva ispitivanja biti će obavljena u skladu s preporukama ISRM-a i ASTM-a, uz manje izmjene kada je to bilo potrebno zbog prirode građiva. Korišteni standardi, kao i opis izmjena navedeni su u poglavlju 3.2.

Indeks trajnosti stijene (SDI) određuje se prema postupku Franklina i Chandre [26] te preporukama ISRM-a [23]. Osim za propisani 10 minutni ciklus trajanja i broj ponavljanja, analiza trajnosti stijene provesti će se i za varijacije standardnog testa s izmjenjenim vremenom trajanja do 120 minuta i brojem ponavljanja do 4 ciklusa trajanja (detaljno opisano u pogl. 3.3.).

Određivanje parametara posmične čvrstoće intaktnog uzorka izvršit će se postupkom direktnog smicanjem prema preporukama ISRM-a [25] te na uzorcima u različitim stupnjevima rastrošbe uz primjenu dodatka propisanom postupku i postupka oponašanja razvoja mehaničke rastrošbe u laboratoriju, opisanog u točkama 3.4.1.

Za prethodno navedene određene parametre provesti će se statističke analize njihove međusobne ovisnosti korelacijskom analizom kroz modele jednostavne linearne regresije, upotrebom metode parcijalnih najmanjih kvadrata.

### 1.3.2. Spektrometrijska analiza

U ovom istraživanju VIS-NIR spektrometrija se koristi za ispitivanje mogućnosti određivanja udjela karbonatne sastavnice u stijeni, kao i mogućnosti kvalitativne procjene mineraloškog sastava s aspekta trajnosti. Provest će se kvantitativna analiza s ciljem baždarenja i potvrđivanja modela na 150 uzoraka s šireg područja grada Splita. U tu svrhu formiraju se dvije grupe uzoraka: prva za baždarenje (engl. „calibration set“) i druga za potvrdu valjanosti prethodno baždarenog modela (engl. „validation set“). Osnovni cilj ovog postupka jest procjena sposobnosti predviđanja i razredbe VIS-NIR spektrometrije u određivanju udjela karbonatne sastavnice u stijeni te procjene inženjerskih svojstava (npr. trajnosti stijene standardnim indeksima trajnosti).

Prikupljanje uzoraka lapora provodi se na istim lokacijama kao i za laboratorijska ispitivanja. Osim uzoraka koji se koriste za određivanje inženjerskih svojstava, zbog jednostavnije



procedure prikupljanja i manje potrebne količine za jedan uzorak, izvršena je nadopuna do 150 uzoraka (ukupno za kalibraciju i validaciju), pazeći da se pritom pokrije cijeli raspon udjela kalcitne sastavnice.

Prikupljanje spektralnih podataka provedeno je upotrebom spektrometra TerraSpec 4 Hi-Res mineral analyzer (ASD, Inc., SAD). Analiza spektralnih podataka provodi se metodama multivarijatne analize u programskom alatu za analizu spektralnih podataka Unscrambler 9.7 (CAMO Software AS., Norveška) i u statističkom paketu Statistica 8.0 (StatSoft, Inc., SAD). Podaci će se grafički prikazati u aplikaciji ViewSpec Pro 4.0. (ASD, Inc., SAD), nakon čega će biti preinačeni iz \*.asd oblika datoteke u \*.ascii oblik pomoću programa ENVI (Research Systems, Inc., SAD). Izvorni spektralni podaci obrađeni su metodama predtretmana i transformacije, pomoću različitih algoritama kako bi se izbjegli fenomeni “pomaka” (“shift”) i „šuma“ (“noise”) kojima je otežano razlučivanje varijabilnosti u podacima.

U svrhu smanjenja količine podataka i pojednostavljenja složenih statističkih analiza, odabrana je svaka peta valna duljina, kroz puni spektralni raspon snimljene refleksije i njenih različitih transformacija. Nezavisne varijable činili su spektralni podaci – refleksija, 1. i 2. derivacija refleksije, dok je sadržaj ukupnog karbonata u stijeni ( $\text{CaCO}_3$ ) odabran kao zavisna varijabla. Za prethodno navedene određene parametre, provedene su statističke analize njihove međusobne ovisnosti upotrebom korelacijske analize kroz modele jednostavne linearne regresije, metode parcijalnih najmanjih kvadrata i kemometrijske metode.

### 1.3.3. Analiza trajnosti zasjeka u mekoj stijeni

U svrhu numeričkog modeliranja rastrošbe i erozije zasjeka u flišnoj stijenskoj masi, izvršeno je detaljno trodimenzionalno skeniranje zasjeka na pilot lokaciji „Žnjan“ upotrebom terestičkog laserskog skenera ILRIS-3D-ER (Optech Inc, Kanada). Skeniranje započeto u ožujku 2012. vrši se u pravilnim vremenskim razmacima (3 ili 6 mjeseci), zaključno s rujnom 2014., s čime se praktično uspostavlja vremenski određen model praćenja promjene morfologije zasjeka. Periodičnost skeniranja se poklapa s izmjenama godišnjih doba, stoga omogućuje i procjenu utjecaja meteoroloških prilika na „brzinu“ trošenja zasjeka. Upravo je utvrđivanje te „brzine“, kao osnovnog parametra kod predikcijskih odnosno povratnih analiza, glavni cilj ovog postupka.

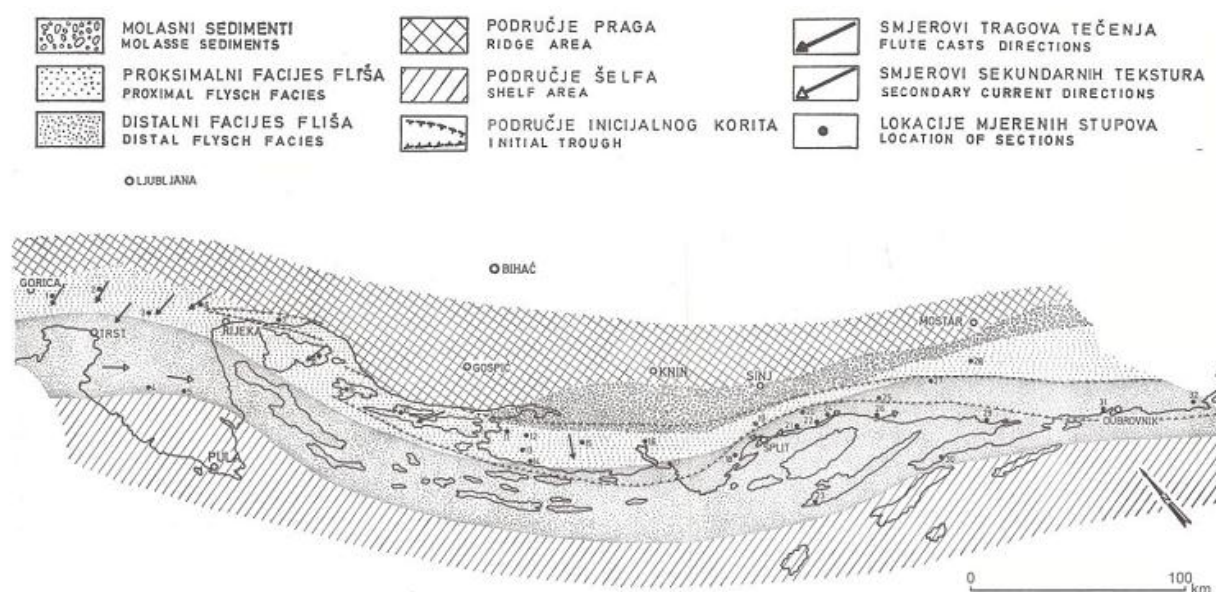
Metodologija je provjerena na drugim pilot lokacijama (ukupno 14) za minimalno dva vremenska intervala. Analiza prikupljenih podataka izvršena je u specijaliziranom programskom paketu Polyworks v12, u modulima IMAlign i IMSurvey. Posebnost ovog softvera je u točnom i

brzom procesu automatskog spajanja susjednih “oblaka točaka” sa prikazom ocjene točnosti i mogućnošću kontrole postupka tijekom računa. Na temelju terenskih opažanja provjereni su poznati matematički modeli rastrošbe zasjeka u mekim stijenama [21, 22] te definirane ulazne veličine za proračun, koje omogućavaju procjenu promjene morfologije zasjeka u ovom tipu stijena.

## 1.4. Područje istraživanja

### 1.4.1. Osnovne geološke značajke područja

Prema Marinčiću [27] fliš središnje Dalmacije je dio velikog flišnog bazena koji se prostire od Gorice u Italiji sve do Albanije (Slika 1.8.). U epohi Eocenu se razvija pirinejska orogenetska faza (nazvana prema Pirinejima zbog najznačajnijih nabiranja u tom području), kao jedna od najznačajnijih tokom Alpske orogeneze. Tektonski pokreti iz tog geološkog razdoblja, zajedno s onim naknadnim, uzrokovali su oblik geoloških struktura na istočnoj obali Jadrana kakav vidimo i danas [28].

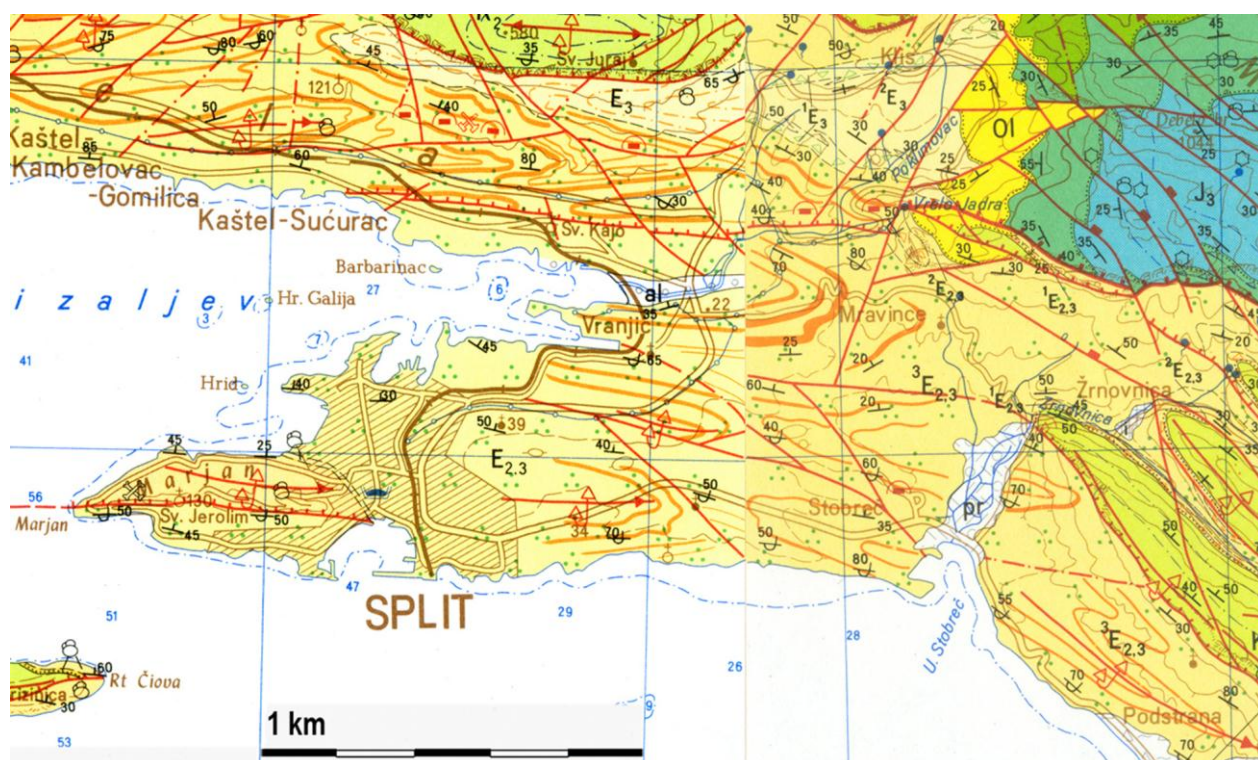


Slika 1.8. Rasprostranjenost flišnih facijesa [27]

Posljedica tih tektonskih pokreta bila je mjestimično jako suženje dijelova flišnog sedimentacijskog bazena u Jadranskom pojasu i reducirano pojavljivanje tih stijena na površini terena [29], što dolazi do izražaja i u srednjoj i južnoj Dalmaciji. Na srednjedalmatinskom području ove naslage su izdvojene na području Trogira, Kaštela i Splita te su definirane prema

OGK (Osnovna geološka karta) kao klastične i karbonatne naslage Eocenskog fliša - E<sub>2,3</sub> (Slika 1.9.).

Sa sjeverne strane flišne naslage pretežno su u anormalnom kontaktu s vapnencima Kozjaka iz doba Krede, dok ih na južnoj strani oplakuje Jadransko more. Prema petrološkim karakteristikama to su pretežito klastične naslage klasificirane kao vapnenačke breče, brečokonglomerati, kalciruditi, kalkareniti i biokalkareniti, kalcisiltiti i lapori. Lapori predstavljaju završne članove sekvenci u flišnoj seriji s utvrđenom pojavnošću minerala kvarca, ilita, muskovita, plagioklasa, mikrolina i montmorilonita [30].



*Slika 1.9. Osnovna geološka karta za šire područje grada Splita (Hrvatski geološki institut).*

Tumač: (al) – aluvij, (d) – čvrsto vezana breča, (pr) – proluvijalni nanosi, E<sub>2,3</sub> – Fliš: lapori s interkalacijama silificiranih vapnenih pješčenjaka (Moguća pojava uložaka biokalkarenita i kalcirudita), <sup>1</sup>E<sub>2,3</sub> – Breče s fragmentima foraminiferskog vapnenca, <sup>2</sup>E<sub>2,3</sub> – Tankouslojeni kalkareniti, <sup>3</sup>E<sub>2,3</sub> – Fliš: pješčenjaci u izmjeni s laporima; leće kalkarenita i kalcirudita, E<sub>3</sub> – Breče i brečokonglomerati s ulošcima vapnenaca i lapora te vapnenci, OI – slabosortirane vapnenačke polimikitne breče, K<sub>2</sub><sup>3</sup> – gromadasti te uslojeni vapnenci i vapneni dolomiti, J<sub>3</sub> – debelouslojeni dolomitični vapnenci (OGK 1:100.000, list Split i Omiš).

Šestanović [31] za naslage fliša na području grada Splita navodi da se sastoje od brečokonglomerata, breča, pješčenjaka, detritičnog vapnenca i lapora s različitim udjelom  $\text{CaCO}_3$  sastavnice. Toševski [32] te iste članove flišnog slijeda dijeli na krupnozrnate i sitnozrnate



(pelitne), pri čemu su krupnozrnati najčešće predstavljeni (bio)kalkruditima i (bio)kalkarenitima, brečama, konglomeratima i pješčenjacima, a pelitni članovi laporima i prahovnjacima.

Krupnozrnati slojevi su zbog svog mineralnog sastava znatno otporniji rastrošbi nego sitnozrnati slojevi, čiji se intenzitet trošenja praktički može pratiti iz dana u dan [32]. Upravo ta raznolikost članova te izraziti kontrast njihovih fizikalno-mehaničkih značajki (različita čvrstoća, otpornost na fizikalnu i mehaničku rastrošbu, itd.) kod zasjeka u flišnim stijenskim masama u posebno ističe probleme trajnosti, različito stupnjevanje rastrošbe i lokalnih odranjanja [1, 33-36].

U nastavku slijede osnovne definicije fliša i lapora, budući se iste u praksi često miješaju.

## Fliš

Fliš je opisni termin za kompleks klastičnih sedimentnih stijena nastalih turbidnim (mutnim) tokovima, što može biti popraćeno podmorskim klizanjima sedimenata koji su prethodno nastali brzom erozijom na kopnu [37]. Zbog svog sedimentnog podrijetla naslage fliša su primarno postavljene vodoravno, međutim kao posljedica tektonskih procesa najčešće ih pronalazimo borane ili ukošene. Općenito, za flišne komplekse karakteristična je izmjena krupnozrnih i sitnozrnih sedimenata (Slika 1.10.).



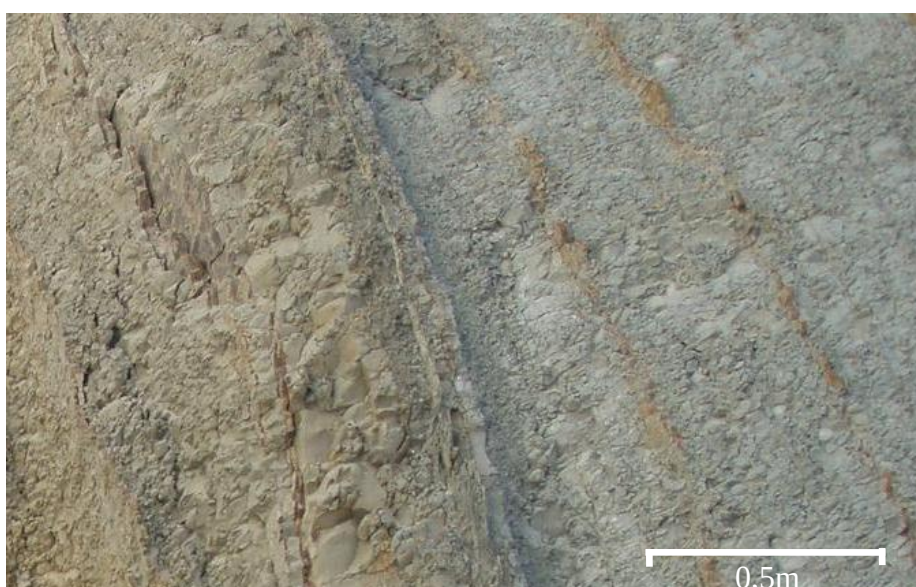
Slika 1.10. Primjer flišne naslage s područja grada Splita

Pojam krupnozrnatih struktura kod klastičnih stijena s geotehničkog aspekta najčešće obuhvaća psefitske strukture (veličine zrna  $>2\text{mm}$ ) kao što su konglomerati i breče te psamitske (od  $2\text{mm}$  do  $0.06\text{mm}$ ) kao što su pješčenjaci. Sitnozrnate strukture obuhvaćaju siltitske (od  $0.06$  do  $0.002\text{mm}$ ) kao što su siltit i prapor ili les te pelitske (manje od  $0,002\text{ mm}$ ) u koju spada i lapor [20].

## Lapor

Lapor (Slika 1.11.) je po definiciji stijena na prijelazu između klastičnih i kemogenih (kristalastih) sedimentnih stijena, budući sadrži klastični materijal dimenzije gline ( $<0,002\text{mm}$ ) i karbonat (kalcit) izlučen iz otopine. Obično su svijetložute, sive, smeđe ili modrikaste boje, dok im uslojenost varira od nekoliko centimetara do nekoliko metara.

Pretežni dio kalcita u laporima je kemogenog porijekla, tj. nastao je izlučivanjem iz morske ili jezerske vode, a manji dio je klastičan (karbonatni detritus - kršje) [38]. Laporom se obično smatra stijena koja sadrži između 15 i 85% gline i 15 i 85% karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ), s pripadnim prefiksima opisanim u Tablici 1.1. [20].



Slika 1.11. Primjer lapora s područja grada Splita

Lapor karakterizira njegov školjkasti lom i topivost u hladnoj solnoj kiselini (pri čemu se otapaju njegovi kalcitni dijelovi), te se ta činjenica najčešće koristi kod određivanja udjela karbonata postupkom kalcimetrije.

Tablica 1.1. Razredba karbonatnih stijena prema udjelu sadržaja kalcita i glinovitih komponenti (prema EN 12407:2007) [15]

| CaCO <sub>3</sub> (%)       |                        |                     |       |                    |                     |       |     |
|-----------------------------|------------------------|---------------------|-------|--------------------|---------------------|-------|-----|
| 100                         | 95                     | 85                  | 65    | 25                 | 15                  | 5     | 0   |
| vapnenac                    | laporoviti<br>vapnenac | vapnenački<br>lapor | lapor | glinoviti<br>lapor | laporovita<br>glina | glina |     |
| 0                           | 5                      | 15                  | 35    | 75                 | 85                  | 95    | 100 |
| nekarbonatna komponenta (%) |                        |                     |       |                    |                     |       |     |

Iako su lapori definirani kao smjesa gline i kalcita, u njima se najčešće nalazi i detritus dimenzija praha do sitnog pijeska. Pravi, čisti lapori izgrađeni samo od kalcita i gline su razmjerno vrlo rijetki. Detritus s dimenzijama praha uglavnom čine kvarc, feldspati i tinjci. Lapori koji pored gline i kalcita sadrže i 10 - 30% detritusa dimenzije praha nazivaju se siltozni lapori, a ako uz silt sadrže i sitni pijesak zovu se pjeskovito-siltozni lapori [38].

### 1.4.2. Klimatske značajke područja

Uz sastav gradiva i antropogeni utjecaj, klimatski uvjeti su najznačajniji čimbenik o kojem ovisi trajnost kod zasjeka u mekoj stijeni. Kao što je opisano u poglavlju 2, dominantni utjecaj na rastrošbu meke stijene u području Dalmacije ima proces sušenje-vlaženje, na koji direktno utječe vremenska raspodjela oborina, temperature i vjetera. Stoga u nastavku slijedi kratki opis klimatoloških značajki područja.

Prema Köppenovoj klasifikaciji [39] priobalni pojas Dalmacije i svi dalmatinski otoci klimatski se svrstavaju u sredozemnu klimu sa suhim i vrućim ljetom (Csa), koju karakteriziraju kasnojesenski maksimumi padalina i vrlo suha ljeta, dok se unutrašnjost Dalmacije svrstava u umjereno toplu vlažnu klimu s vrućim ljetom (Cfa), koja se od Sredozemne razlikuje u količini padalina, te njihovom ravnomjernijem rasporedu tijekom godine, iako su ljeta također dosta sušna. Prema Thornthwaiteovoj klasifikaciji klime, temeljenoj na odnosu količine vode potrebne za potencijalnu evapotranspiraciju i oborinske vode, u Dalmaciji prevladava humidna klima, pri čemu je dalmatinsko zaleđe nešto vlažnije [40].

Srednja godišnja temperatura zraka na području Dalmatinske obale je oko 17°C, što je u odnosu na raspon srednjih godišnjih temperatura u RH (3 - 17°C) uzrokovano ponajprije povoljnim geografskim položajem i neposrednim utjecajem mora. Maksimalne temperature se kreću od 36°C - 38°C, dok su minimalne do -7°C. Minimalna temperatura zraka na visini 5 cm iznad tla, važna zbog procjene uvjeta pogodnih za stvaranje poledice, u području Dalmatinske zagore može se pojaviti od prosinca do veljače, dok je u priobalnom pojasu rijetka pojava te se mjerenja od strane DHMZ-a (na području Splita) ne provode.

Srednja godišnja količina oborine je oko 800 do 900 mm na području srednje Dalmacije do 1300 na području južne Dalmacije. Godišnji hod mjesečnih količina oborine na području Hrvatske može se podijeliti u dva tipa s obzirom na dio godine u kojem se nalazi mjesec s minimumom oborine: tip godišnjeg hoda u kojem najmanje oborine padne u toplom dijelu godine (travanj do rujan) i tip hoda u kojem najmanje oborine ima mjesec u hladnom polugodištu (listopad do ožujak). Cijelo Jadransko priobalje, otoci i dalmatinsko zaleđe pripadaju prvom tipu. U Dalmaciji

ekstremno sušni mjeseci s najmanjim količinama tijekom godine javljaju se od srpnja do listopada, kada mjesečna oborina može i izostati. Od toga odstupa listopad u južnoj Dalmaciji kada ekstremno sušan mjesec može primiti i oko 40 mm oborine. Maksimalno odstupanje od normale dnevnih količina oborine ( $R_{dmax}$ ) za područje Dalmacije iznosi 30% do 40%, uz napomenu da se može očekivati i povremeno veće kolebanje koje znatno odstupa od količina u ostalim godinama (npr. 352,2 mm u Zadru 11. rujna 1986. godine).

Vjerojatnost pojavljivanja sušnih razdoblja, definiranih kao neprekidni niz dana u kojima je palo najviše 1 mm oborine, u Dalmaciji i na otocima je najveća u lipnju (do 13%), kao i u rujnu i listopadu (do 11%), a mogu se pojaviti u svim mjesecima u godini osim u sječnju i studenom (najdulje sušno razdoblje u cijeloj primorskoj Hrvatskoj trajalo je 84 dana u Splitu - lipanj 1962.).

Iz podataka izmjerenih na šest meteoroloških postaja na širem području istraživanja, za razdoblje od 1971. do 2000. godine prikazane su srednje godišnje količine oborina za pet navedenih lokacija (tablica 1.2.). Prosječne mjesečne oborine prema podacima sa svih mjernih postaja ukazuju na razdoblja s najviše oborina iz čega se vidi da je studeni najkišovitiji mjesec u godini, a srpanj najsušniji.

*Tablica 1.2.* Podaci o srednjim mjesečnim količinama oborina (mm) za razdoblje 1971.-2000. [40]

| Meteorološka postaja | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | IX    | X     | XI    | XII   | Srednja godišnja oborina |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|
| Zadar                | 72,6 | 62,5 | 63,5 | 70,0 | 64,7 | 54,4 | 30,4 | 49,6 | 104,0 | 106,7 | 105,6 | 95,2  | 872,2                    |
| Split (Marjan)       | 73,7 | 61,2 | 63,4 | 61,9 | 61,6 | 47,3 | 25,5 | 44,8 | 68,9  | 82,1  | 101,7 | 90,8  | 782,8                    |
| Knin                 | 75,9 | 69,8 | 74,7 | 92,0 | 90,5 | 81,1 | 43,7 | 61,7 | 108,1 | 114,3 | 112,3 | 101,7 | 1025,8                   |
| Hvar                 | 68,4 | 55,7 | 62,7 | 54,1 | 46,7 | 34,4 | 26,4 | 45,2 | 63,7  | 79,3  | 94,0  | 83,2  | 713,3                    |
| Dubrovnik            | 98,3 | 97,9 | 93,1 | 91,4 | 70,1 | 44,0 | 28,3 | 72,5 | 86,1  | 120,1 | 142,3 | 119,8 | 1064,0                   |

U ruži vjetrova najzastupljeniji su bura i jugo te oštro. Bura je suh, hladan i mahovit sjeveroistočni vjetar (NNE–ENE smjerova), s lokalnim udarima do 48,5 m/s zabilježenim na splitskom području. Za razliku od bure, jugo je vlažan (često je praćeno velikom količinom oborine), topao i jednoličan jugoistočni vjetar (ESE–SSE smjerova). Za dalmatinsko područje svojstvena je izmjena juga i bure, te su češće i jače u hladnom dijelu godine. Nakon juga na srednjem i južnom Jadranu moguće je da vjetar skrene preko južnog i jugozapadnog smjera na zapadni smjer. U pomorstvu je južni (S) vjetar poznat kao oštro, jugozapadni (SW) kao lebić ili garbin, a zapadni (W) kao pulenat.

Prema zapažanju autora na širem području grada Splita, prosječno godišnje se izmjeni 50-tak ciklusa sušenja-vlaženja otvorenih zasjeka u flišu (prema kriteriju 5 mm minimalne oborine), što izrazito pogoduje razvoju procesa rastrošbe tokom cijele godine.

### 1.4.3. Postojeća saznanja u području istraživanja

Sve stijene i tla litosfere, pa tako i meke stijene, podložne su mehaničkom i kemijskom procesu rastrošbe koje se može odrediti kao razlaganje ili usitnjavanje geološkog materijala [41]. Kemijskim procesima rastrošbe često se ne pridaje velika važnost, jer su mehanički procesi ti koji su dominantni tijekom procesa degradacije flišnih stijena, što ne znači da ih treba zanemariti. Najzapaženiji su procesi izluživanja  $\text{CaCO}_3$  komponente, oksidacijski procesi i bubrenje [7]. Za mehaničku rastrošbu lapora raspucavanjem intaktnog gradiva uzrokovanu sušenjem i vlaženjem, u literaturi se koristi engleski termin „slaking“, a najčešće se vrednuje preko „lake durability index-a“ (SDI). U ovom radu za sve varijacije SDI indeksa koristiti će se termin „indeks trajnosti“. Način izvođenja pokusa i proračun SDI indeksa osmislili su Franklin & Chandra [26] te je uvršten u preporuke ISRM-a još davne 1977. [23]. Njegove vrijednosti ukazuju na postojanost stijene koja sadrži određeni postotak glinovite komponente.

Mnogi istraživači koriste upravo SDI indeks kao procjenu trajnosti meke stijene [26, 42-55] u nastojanjima da je povežu sa inženjerskim svojstvima, čvrstoćom, mineraloškim sastavom, stupnjem rastrošbe materijala ili sl. Tako je npr. Tugrul [48] primjetio da jednoosna tlačna čvrstoća ima tendenciju linearnog povećanja s povećanjem SDI indeksa, dok su Sousa i ostali [54] i Youn i ostali [55] zaključili da mineralni sastav i mikrostruktura također utječu na trajnost gradiva. Undul & Tugrul [51] u svom istraživanju zaključuju da su specifična težina, jedinična težina, upijanje i efektivna poroznost najprikladniji parametri za procjene trajnosti. Bryson i ostali [52] izvršili su i varijacije trajanja standardiziranog SDI pokusa na temelju zaključka studije Hopkinsa & Deena [53], pritom osmisливši novi LSI indeks. Cetin i ostali [56] u studiji pojave slijeganja brane Ataturk u Turskoj ističu važnost istraživanja „slaking-a“ u objašnjavanju kratkoročne i dugoročne kemijske rastrošbe. Dick [57] naglašava činjenicu da je SDI najvažnije inženjersko svojstvo stijene kod procjena stabilnosti prirodnih i zasječenih pokosa, kao i Dhakal i ostali [58] koji u svojoj studiji razmatrajući i utjecaj saliniteta vode u samom pokusu, dolaze do istog zaključka. Mnogi autori [46, 49, 50] primjetili su da uvriježene klasifikacije prema trajnosti materijala ne opisuju najbolje podložnost rastrošbi pojedinih mekih stijena te je u području definiranja trajnosti potraga za sveobuhvatnijim kriterijem još uvijek aktualna.



Uz SDI indeks, mineraloški sastav se vrlo često koristi kao najbolji uvid u podložnost rastrošbi [54, 57]. Kvantifikacija udjela minerala glina i njihova razredba, daju uvid u njihov potencijal bubrenja. Na području Splita to su minerali iz grupe smektita (najčešće montmorilonit) [32]. Budući je detaljna mineraloška analiza, s obzirom na često veliki broj potrebnih ispitivanja, vrlo skup i dugotrajan postupak u praksi se često pribjegava jednostavnijim analizama kao što je kalcimetrija [49].

Udio  $\text{CaCO}_3$  sastavnice u laporima fliša splitskog područja je u području od 30-80% [31, 59-61] što ukazuju na široki raspon, ali i visoki udio kalcitne sastavnice što je svojstvo lapora šireg splitskog područja, za razliku od npr. dubrovačkog područja, gdje udio  $\text{CaCO}_3$  sastavnice varira u rasponu od 8% do 20% [62]. Upravo ta širina omogućava primjenu i manje točnih analiza, kao što je kalcimetrija, za dobivanje općenitog uvida u mogući mineralni sastav. Tu se otvara i mogućnost provjere primjenjivosti novih postupaka koji omogućavaju novi pristup s bržim očitajima i terenskom primjenom, kao što je VIS-NIR spektrometrija („Visible and Near InfraRed Spectrometry“).

Spektrometar je opći pojam koji opisuje skup uređaja sa jednim ili više detektora u svrhu mjerenja inteziteta u jednom ili više područja elektromagnetskog spektra [63]. VIS-NIR spektrometar obuhvaća vidljivi dio spektra (400-780nm) i dio infracrvenog (780-2500). Pojednostavljeni princip mjerenja je u ovom slučaju sljedeći: iz umjetnog izvora odašilje se svjetlosni snop na uzorak te se pritom putem detektora mjeri upijanje/refleksija u cijeloj širini promatranog dijela spektra. Na frekvencijama kod kojih dolazi do absorpcije, rezultat se očituje u vidu smanjenog reflektiranog signala na detektoru, a mjerenje je za praktičnu upotrebu trenutno [64, 65]. Više autora u svojim studijama, između ostalog, ukazuje na mogućnost detekcije udjela karbonata u materijalima na rubu područja mjerenja što je od velikog interesa za primjenu u mekim stijenama [66, 67].

Osim što se intenzivno koristi u agronomiji, industriji prehrambenih proizvoda, mineralogiji, astronomiji itd., VIS-NIR spektrometrija se u posljednje vrijeme pokazala kao nezaobilazan alat i u geologiji, upotrebom prijenosnih inačica uređaja [10]. Praksa je ustaljena kod prepoznavanja i određivanja svojstava metala i dragog kamenja, ali sve više i drugih gradiva, između ostalih: glina, klorita, sulfata i za predmetnu studiju najbitnije karbonata. Prvi veći iskorak u području geologije i mineralogije napravio je USGS (United States Geological Survey) na čelu s Clarkom [68] izdavanjem sveobuhvatnog priručnika o osnovama spektrometrije i njenoj primjeni na stijene i minerale. Uz to osnovali su on-line laboratorij sa velikom bazom spektralnih zapisa osnovnih

minerala, koja je od neprocjenjive važnosti za interpretaciju složenijih (ponajprije sedimentnih) stijena [69].

Robben i ostali [66] navode da je upotreba NIR spektrometrije nezaobilazna u istraživanjima ležišta vrijednih minerala, kao i da se upotrebom prijenosnih spektrometara značajno ubrzava i povećava točnost analize jezgri istražnih bušotina [66, 70] ne samo u rudarske već i u geološke svrhe. Dematte i ostali [71] smatraju nezaobilaznim alatom u modernoj klasifikaciji tala, do mjere da su danas usavršene tehnike upotrebe prijenosnih spektrometara za određivanje vlažnosti u površinskim slojevima tala [72, 73], kao i u prehrambenoj industriji kod određivanja vlažnosti prehrambenih proizvoda [74, 75].

Ova tehnologija ima veliki potencijal u automatizaciji procesa razredbe bušotina kod velikih projekata u kombinaciji s robotikom. Tako Huntington i ostali u svojoj studiji [76] objašnjavaju automatizirani sustav razredbe bušotina „HyLogging“, koji kao osnovu koristi upravo NIR-VIS spektrometar.

Pribavljanje preciznih geomorfoloških podataka i izrada detaljnih digitalnih modela reljefa postaje sve dostupnija upotrebom LiDAR tehnologije. Razvojem jeftinijih i sve preciznijih prijenosnih inačica terestičkih laserskih skenera, standardne geodetske metode se postupno potiskuju ili se probijaju u područja gdje su dosad ionako bile neprimjenive (za teško pristupačna područja, uspravne klifove i sl.). Upotreba instrumenata ovog tipa i razvijanje postupaka mjerenja je u žarištu mnogih znanstvenika, ponajprije kod: osmatranja pomaka kosina i odrona u stijenskim masama [77-80], razredbi stijenske mase [81], određivanja zapremina odrona i pronalaženju mogućih područja sklonih odranjanju [82], otkrivanju erozije klifova u obalnim područjima [83, 84] i promjeni geomorfologije ogolina [85]. Sve su to aktualni projekti sa začetkom u ovom desetljeću, stoga je još uvijek otvoren značajan prostor za unaprijeđenje postojećih metodologija i saznanja, kroz znanstveni rad temeljen na lokalnom i regionalnom praćenju pojava, što je posebno naglašeno kod dugoročnih procesa kao što je erozija. U konačnici, uz upotrebu instrumenata tipa ILRIS-3D-ER dugoročnim opažanjima mogu se potvrditi dosad razvijeni modeli rastrošbe zasjeka u mekim stijenama [21, 22].

## 1.5. Organizacija doktorske disertacije

Rad je podijeljen u sedam poglavlja.

U *prvom poglavlju* iznesena je motivacija za izradu doktorske disertacije, plan i ciljevi znanstvenog istraživanja te je opisana metodologija istraživanja. Navedeni plan istraživanja ukazuje na složenost pristupa, kao i mogućnosti znanstvenog djelovanja kroz alate dostupne autoru. Nadalje, pregled područja istraživanja daje kratki pregled geoloških i klimatskih značajki područja kao i pregled postojećih saznanja, relevantnih radova i istraživanja na koje se ponajviše naslanja ova disertacija, kroz područja geotehnike, spektrometrije i geodezije. Kraj prvog poglavlja daje kratki prikaz sadržaja rada.

U *drugom poglavlju* su prikazana postojeća saznanja vezana uz meku stijenu kao gradivu, te problematika rastrošbe i erozije, kroz osnovne definicije i dodatni pregled literature. Nadalje, opisana je pojava različito stupnjevane rastrošbe na zasjecima u mekoj stijeni kroz temeljna saznanja, koja će se dodatno obraditi i u petom poglavlju.

U okviru *trećeg poglavlja* prikazani su rezultati provedenih laboratorijskih ispitivanja fizikalnih svojstava i indeksa trajnosti lapora s šireg područja grada Splita, s ciljem određivanja dodatnih kriterija razredbe prema trajnosti. Predloženi su dodatni kriteriji za razredbu u ovom tipu gradiva te je uveden modificirani indeks trajnosti. Nadalje, osmišljen je i opisan postupak laboratorijske simulacije rastrošbe lapora izloženog mehaničkoj rastrošbi, kao i rezultati analize posmične čvrstoće u različitim fazama, te su predložene smjernice za primjenu postupka laboratorijski simulirane rastrošbe u mekim stijenama.

U *četvrtom poglavlju* prikazane su osnove VIS-NIR spektrometrije kroz analizu mineraloških spojeva u mekoj stijeni. Na primjeru lapora s područja Dalmacije izvršena je analiza mogućnosti procjene udjela vezivnih minerala (u ovom slučaju kalcijevog karbonata) putem analize reflektance dijela NIR spektra i analiza reflektance cijelog VIS-NIR spektra upotrebom kemometrijskih metoda. Urađena je i analiza mogućnosti provedbe kvalitativne procjene tipa gline, za primjere mekih stijena s područja Dalmacije i Medvednice, kao moguće osnove za procjenu trajnosti meke stijene upotrebom predložene tehnologije.

U *petom poglavlju* su rezultati terenskih opažanja promjene geometrije zasjeka u mekoj stijeni uslijed kombiniranog utjecaja rastrošbe i erozije. Terenska opažanja vršena su na pilot lokaciji Žnjan od izrade zasjeka (2002.) te su dovršena trogodišnjim monitoringom terestičkim laserskim skeniranjem. Na temelju terenskih opažanja, s navedene i niza drugih lokacija sa šireg

područja Splita, izvršena je provjera uporabivosti prikazanih matematičkih modela kao osnova za buduće prognoze promjene geometrije zasjeka u ovom tipu gradiva.

U *šestom poglavlju* predstavljeni su generalni zaključci doneseni na osnovu dobivenih rezultata. Također se predstavlja i smjer daljnjeg znanstvenog djelovanja.

*Sedmo poglavlju* sadrži pregled korištene literature.

## 2. MEKE STIJENE I RASTROŠBA

U prvom poglavlju ukratko je obrazložena postojanost mekih stijena, kao i trajnost zasjeka i prirodnih kosina kroz nekoliko ilustrativnih primjera prikazanih u motivaciji za izradu rada. Nastavno, u drugom poglavlju prikazati će se trenutne spoznaje o gradivu – mekoj stijeni te o rastrošbi, kroz osnovne definicije i dodatni pregled literature.

### 2.1. O mekim stijenama općenito

Meke stijene su vrlo kritičan geomaterijal [86] budući ispoljavaju nekoliko različitih tipova problema:

- Često se ponašaju nepoželjno (niska čvrstoća, raspadanje, usitnjavanje, visoka plastičnost, kalanje, brza rastrošba i td.). Gotovo uvijek inženjeri nastoje zaobići područja gdje dominiraju meke stijene, ali što u slučajevima kada to ne mogu učiniti?
- Čvrstoća mekih stijena je negdje na granici između tla i stijene. U nekim slučajevima su premekane za upotrebu laboratorijske opreme koja se koristi za stijene, a s druge strane prečvrste za opremu koja se koristi za ispitivanje svojstava tla [87]. Najčešće je potrebno izvršiti podešavanja ili izraditi dodatke standardiziranoj opremi da bi se ispitivanja mogla kvalitetno izvršiti.

- Jedna od većih poteškoća kod mekih stijena je uzorkovanje za potrebe ispitivanja. Upotreba mehanizacije i prijenosnih pila na terenu omogućava pribavljanje neporemećenog – intaktnog uzorka, ali na malim dubinama (površinsko uzorkovanje ili u istražnim jamama) uz veliki utrošak vremena i energije. S druge strane sondažnim bušenjem je praktično nemoguće dobiti neporemećeni uzorak. Meke stijene su kao gradivo, bez obzira na pridjev „meka“, dovoljne čvrstoće da zahtijevaju bušenje s upotrebom vode, budući rotirajuće dijamantne krune zahtijevaju vodeno hlađenje. S upotrebom vode dolazi do ispiranja jezgre kroz isplaku ili do prvih učinaka rastrošbe te više ne možemo govoriti o neporemećenom uzorku.
- Kod nekih tipova mekih stijena, kao što je i lapor s područja Dalmacije, često su neprimjenjive standardne geomehaničke razredbe stijenskih masa i indeksnih svojstava, budući su one osmišljene uglavnom za diskontinuirane sredine čvrstih stijena. Za meke stijene postavlja se potreba za prilagodbom postojećih razredbi ili izradom novih.

Nadalje, Arbanas i ostali [88] uočavaju i niz problema kod proračuna stabilnosti i pridržanja zasjeka u flišnim - heterogenim stijenskim masama podložnim rastrošbi. Upotrebom računalnih programa koji se zasnivaju na metodi konačnih elemenata, do izražaja dolaze sljedeće nedoumice:

- Kako vrednovati utjecaj rastrošbe na kriterij čvrstoće?
- Kako odrediti pad čvrstoće u vremenu?
- Kako odrediti promjenu deformacijskih svojstava u vremenu kao funkciju rastrošbe?

Ove nepoznanice se uglavnom rješavaju upotrebom velikih faktora sigurnosti, utemeljenih na malom broju primjera te je naglašena potreba za detaljnijim istraživanjima ubuduće.

Meke stijene se, s obzirom na broj znanstvenika i inženjera koji se bave geotehnikom i općenito geoznanostima, vrlo malo proučavaju. Iz toga proizlazi nerazumjevanje njihovog ponašanja kod inženjera u praksi, što kao posljedicu ima često vrlo konzervativan pristup kod određivanja parametara. Da bi osigurali dovoljne faktore sigurnosti parametri su često podcijenjeni, što dovodi do odabira neekonomičnih konstrukcija. S druge strane, čak i na prvi pogled najkonzervativnije rješenje konstrukcije, u slučaju da se ne riješe problemi s rastrošbom, može se u njenom vijeku uporabe pokazati nepouzdanim.

Kao još jedan problem nužno je istaknuti i rascjepkanost znanstvene zajednice i istraživača koji se bave problematikom mekih stijena u svijetu. Naime, postoji više istaknutih nacionalnih grupacija istraživača u Južnoj Americi, Sjevernoj Americi, Europi i Mediteranu te Aziji (posebno

u Kini i Japanu), međutim razmjena informacija i iskustava je gotovo nikakva. Toj tvrdnji u prilog govori podatak da su se krajem prošlog i početkom ovog stoljeća na svjetskoj razini održale tek dvije međunarodne konferencije s temom „Geotehnika čvrstih tala-mekih stijena“, dok su sesije s tom problematikom na ostalim konferencijama uglavnom sporadične. U isto vrijeme npr. u Kini potpuno neopaženo prolazi čak 13 nacionalnih konferencija o problematici mekih stijena, praktično bez vanjskog sudjelovanja.

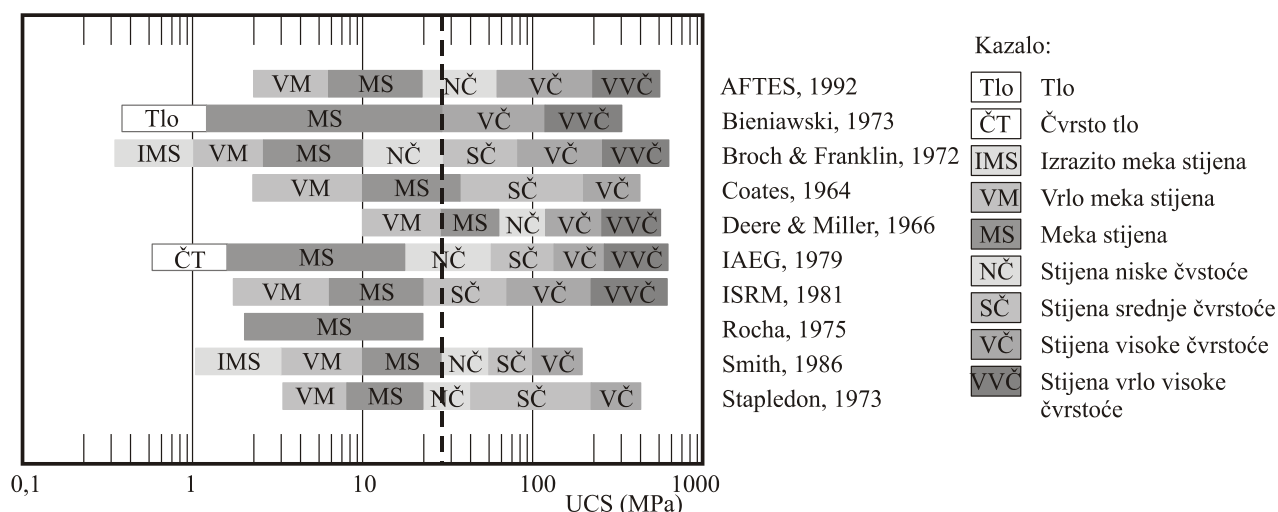
Ipak nije sve tako crno, 2011. godine ISRM osniva posebnu komisiju za područje mekih stijena (eng. „Soft Rock Technical Commision“) koja je svoj rad okrunila sa specijaliziranom međunarodnom konferencijom „2014 ISRM Conference on Soft Rocks“ u Pekingu u organizaciji Kineskog društva za mehaniku stijena i ISRM-a (International Society for Rock Mechanics), uz najavu sljedećih, ubuduće u četverogodišnjem ciklusu.

## 2.2. Definicija meke stijene

U literaturi je nemoguće pronaći jedinstvenu definiciju meke stijene, u prvom redu zbog raznolikosti geološkog gradiva koje je često obuhvaćeno tom definicijom, ali i zbog česte upotrebe različitih kriterija za određivanje tog pojma. Pri tome najčešće korišteni pojmovi su „slaba“ („weak“) i „mekana“ („soft“), a ponekad i „čvrsto tlo“ (eng. „hard soil“ ili „indurated soil“). Pojam „slaba stijena“ uveden je na ISRM-ovom međunarodnom simpoziju „Weak Rock - Soft, Fractured and Weathered Rock“ 1981. u Tokyu, dok je pojam „meka stijena“ (eng. „soft rock“) usvojen od strane tehničkog odbora TC22 ISSMGE-a (International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering) [89, 90]. U literaturi se često može pronaći i pojam „stijena niske čvrstoće“ (eng. „low strength rock“). Zbog raznolikosti porijekla gradiva, koje nužno ne mora biti sedimentnog podrijetla, već može postati od izvorno krutih i otpornijih stijena procesima alteracije i retrogradne metamorfoze, mnogi autori preferiraju ovaj općenitiji pojam. U ovom radu je usvojen pojam „meka stijena“, a definicijski je usvojena razredba koja je svrstava između tla i „čvrste“ stijene, prema kriteriju jednoosne tlačne čvrstoće.

Johnston [91] u izvješću Tehničkog odbora ISSMFE (International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering) sugerira da se meke stijene razredi kao skupina geotehničkih gradiva s jednoosnom tlačnom čvrstoćom približno u rasponu između 0,5 i 25 MPa, kao najprikladniju uzimajući u obzir sve dotadašnje razredbe. Uistinu, kada se usporede najzapaženije razredbe, kod većine gornja granica od 25 MPa udovoljava predloženom kriteriju (Slika 2.1.).





Slika 2.1. Razredba stijena prema jednoosnoj tlačnoj čvrstoći (UCS - eng. „Unconfined Compressive Strength“) prema više autora [92]

S druge strane, donja granica je poprilično različita i podložna interpretaciji. Npr. Terzaghi i Peck [93] granicu između tla i stijene definiraju s 50 udaraca SPP-a (standardnog penetracijskog pokusa) ili putem jednoosne tlačne čvrstoće uzimajući 0,4 MPa, smatrajući te vrijednosti granicama kada se gradivo počinje ponašati „manje kao tlo, a više kao stijena“. S druge strane praktičari kao npr. Rocha [94] razlikuje tlo i stijenu uranjanjem u vodu, ukoliko se uzorak u potpunosti ne raspadne s jednim uranjanjem, određuje ga kao meku stijenu.

Iako je donju granicu, za potrebe generaliziranih razredbi teško odrediti, za područje predmetnog istraživanja to i nije toliko značajno. Prema Šestanoviću [31] jednoosna tlačna čvrstoća lapora splitskog područja kreće se u rasponu od 6 do 26 MPa, a prema Roje – Bonacci i ostali [60] najveći broj uzoraka iz njihove studije ima čvrstoću od 10 do 30 MPa, što prema kriteriju jednoosne tlačne čvrstoće dalmatinske lapore nedvojbeno svrstava u meke stijene.

Naizgled jednostavna definicija meke stijene upotrebom samo jednog kriterija – jednoosne tlačne čvrstoće, skriva cijeli niz stijena (kao što su lapori, siltiti, šejlovi, slejtovi, tufovi, glinci, laporovite predkonsolidirane gline, itd. [17]) koje su različite po postanku, mineraloškom sastavu, geološkoj starosti, uslojenosti, inženjerskim svojstvima i td. Slijedom toga i nije tako iznenađujuća nekonsistentnost navedenih razredbi, ali i potreba za jasnijim dodatnim kriterijima kod razredbi mekih stijena u svakodnevnoj praksi.

## 2.3. Osnovno o rastrošbi

Pod pojmom rastrošba (eng. „weathering“, trošenje, razgradnja, dezintegracija) najčešće se podrazumijeva promjena fizikalno mehaničkih svojstava stijene kao posljedice ljuštenja, hidratacije, slabljenja kod sušenja i vlaženja („slaking“), bubrenja, otapanja, oksidacije, abrazije, smrzavanja-odmrzavanja, te drugih procesa [95]. Franklin i Dusseault [96] koriste termin „weatherability“ kao mjeru podložnosti stijene oslabljenju ili raspadanju za vrijeme korištenja objekta. Pri tome je ključno razlikovati:

- „inženjersku vremensku skalu“ (nekoliko godina do nekoliko desetaka godina),
- „geološku vremensku skalu“ (stotine tisuća do nekoliko milijuna godina).

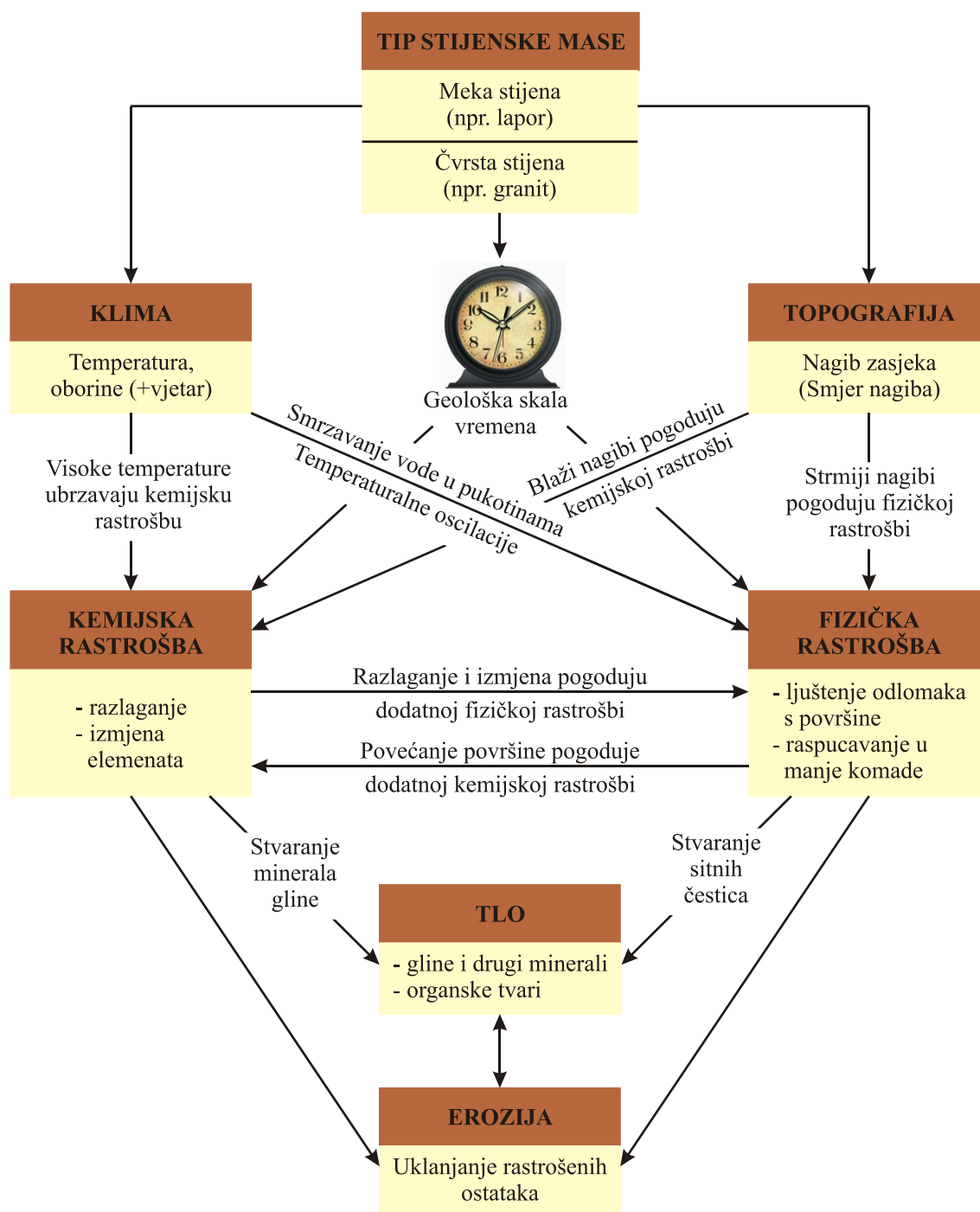
Kod mekih stijena proces rastrošbe se odvija u vrlo kratkom vremenskom razdoblju te se može govoriti o trajnosti gradiva unutar „inženjerske vremenske skale“ – vrijeme korištenja građevine [95].

Prema Fookesu [97] rastrošba se općenito dijeli u dvije dominantne grupe:

- Fizička (mehanička) rastrošba,
- Kemijska rastrošba.

Fizička rastrošba podrazumijeva razaranje stijene u manje komade bez promjene mineraloškog sastava, dok kemijska rastrošba rezultira razlaganjem strukture minerala, odnošenjem nekih od oslobođenih elemenata i/ili stvaranjem novih elemenata od ostataka koji reagiraju sa sastojcima iz okoline. U praksi se često definira i biološka rastrošba, međutim budući biološki procesi mogu uzrokovati i fizičke i kemijske promjene, najčešće se u literaturi svrstava kao podgrupa fizičkog i kemijskog trošenja [2].

Dominantni proces koji uzrokuje raspadanje lapora (razaranje strukturnih veza unutar gradiva) na području Dalmacije je ponavljani proces sušenja i vlaženja, kao glavni uzrok fizičke rastrošbe, kombiniran sa kemijskom rastrošbom na površini materijala i zidovima pukotina, tj. svim površinama koje su u izravnom dodiru s vodom. Iako se formalno razdvajaju, oba procesa se u pravilu događaju istovremeno i međusobno se nadopunjuju (Slika 2.2.). Nastajanje pukotina procesima fizičke rastrošbe povećava se površina na kojoj se mogu razvijati kemijski procesi. S druge strane kemijska rastrošba zamjenjuje čvrste minerale sa slabim glinama ili porama, pri čemu čine gradivo podložnijim fizičkoj rastrošbi.



Slika 2.2. Povezanost fizičke i kemijske rastrošbe (izmjenjeno [98])

Osim podločnosti rastrošbi važni čimbenici okoliša, koji imaju značajan utjecaj na brzinu odvijanja procesa, su klima i topografija [98]. Najznačajniji klimatski utjecaji su temperatura, oborine (bilo putem inteziteta ili ukupne količine) i vjetar. Niska temperatura uzrokuje zamrzavanje vode u pukotinama, ali i kroz velike temperaturne razlike (posebno na dnevnoj skali velikim razlikama između dnevne i noćne temperature) pogoduje bržoj fizičkoj rastrošbi. S druge strane visoka temperatura u toplijim i vlažnijim područjima ubrzava procese kemijske rastrošbe.

Kod zasjeka topografija pokazuje svoj utjecaj u prvom redu kroz nagib i smjer nagiba izvedenog pokosa. Blaži nagibi pogoduju kemijskoj rastrošbi, dok s druge strane strmiji nagibi ubrzavaju fizičku rastrošbu, kroz povećanu mogućnost prenošenja već rastrošenog građiva. Smjer nagiba svoj utjecaj iskazuje kroz odnos s osunčanošću zasjeka i smjerom dominantnog vjetera za vrijeme oborina. Npr. ako je zasjek usmjeren prema suncu i vjetru, vlaženje i sušenje, uz koje su povezani bubrenje i skupljanje minerala glina, je intenzivnije te dovodi do intenzivnijeg razlaganja kalcitičnih strukturnih veza odnosno fizičke rastrošbe [99]. S druge strane, zasjeci u stijenama koji sadrže više gipsa, podložniji su rastrošbi kod sjevernih orijentacija (ako su u sjeni i zavjetrini) budući pokos zasjeka duže zadržava vlagu te se ubrzavaju procesi kemijske rastrošbe [100].

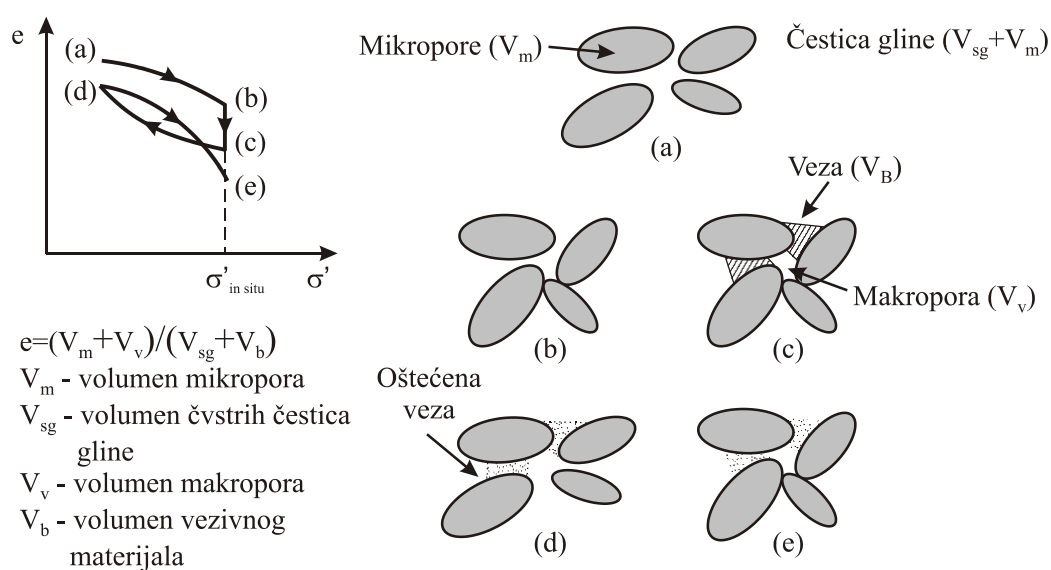
S obzirom na područje istraživanja koje uključuje zasjeka strmih nagiba pokosa i klimatski umjereno geografsko područje, fizička rastrošba se općenito smatra dominantnom te se uzročnici kemijske rastrošbe u ovom radu neće dodatno proučavati.

Slijedom prethodno navedenog, osnovni čimbenici fizičke rastrošbe, koji zajedničkim ili pojedinačnim djelovanjem uzrokuju razaranje veza u laporu, su:

- *Promjena polja naprezanja.* Naime, prema [101] potencijal bubrenja se dodatno povećava s rasterećenjem. Ako se glinovito tlo procesom dijageneze poveže vezivom pod velikim pritiskom, u njemu ostane „zarobljen“ veliki potencijal bubrenja u slučaju rasterećenja. Ovo svojstvo dolazi do izražaja kod zasjecanja u flišnim stijenskim masama koje su dodatno oblikovane tektonikom. Dodatno objašnjeno na slici 2.3.
- *Bubrenje kao posljedica kemijskog procesa.* Prema Miščeviću [95] najčešći je oblik stvaranje gipsa na zidovima pukotina. Budući gips ima 98% veću zapreminu od ulaznih sastavnica, dolazi do širenja pukotina i povećanja ukupne zapremine stijene.
- *Razlaganje strukturnih veza kemijskim procesima* (npr. stvaranje gipsa na površini) „izvlači“ građivo iz osnovne strukture te time povećava porozitet meke stijene. Povećani porozitet ubrzava „izvlačenje“ građiva zbog veće cirkulacije vode.
- *Bubrenje minerala glina.* Lapori sadrže gline iz grupe smektita, između ostalih i montmorilonit koji je veoma osjetljiv na vlaženje tako da može povećati svoju zapreminu i do 10 puta [20]. Kod lapora s većim udjelom kalcitnog veziva ovaj proces se odvija uglavnom na površini i na zidovima pukotina [59].
- *Naglo upijanje vode u pukotine i prsline suhog lapora.* Kapilarno upijena voda kroz pukotinu na površini građiva „nagurava“ zarobljeni zrak prema vrhu pukotine, što stvara dodatni pritisak koji dodatno produžuje pukotinu i stvara nove.

- *Razlaganje minerala gline.* Minerali gline se u dodiru s vodom razlažu iz strukture te kidaju slabe kalcitične veze u strukturi. Svojstveno za lapore s udjelom gline većim od 40% [59].
- *Insolacija.* Insolacija uzrokuje razlaganje stijene kao rezultat širenja i skupljanja uzrokovanih čestim temperaturnim promjenama. Proces koji je svojstven za sva gradiva, a na laporima kao posljedicu ima razaranje strukturnih veza.
- *Rast ledenih kristala u pukotinama stijenske mase.* Jedan od glavnih procesa fizičkog trošenja u područjima utjecanim hladnim klimama, gdje rast kristala leda uzrokuje nastanak polja naprezanja zbog promijene zapremine, ali i migraciju nesmrznute vode prema rastućim ledenim lećama.
- *Rast kristala soli u pukotinama stijena* uzrokuje sile dovoljne velike da uzrokuju raspadanje i razlaganje stijenskog gradiva (npr. transformacija tenardita u mirabilit [32]).
- *Fizičko trošenje uzrokovano djelovanjem organizama* (npr. rast korijenja u pukotinama).

Prema Bartonu [102] veze između čestica slijede razvoj od oblika uklještenja, preko slabih veza, cementiranja i u konačnici pretvaranja u kompaktnu stijenu, odnosno do razvoja veza na molekularnoj razini. Na slici 2.3. prikazana je glinovita struktura (a) koja je izložena velikom pritisku (b), nakon čega je cementirana pod tim istim pritiskom (c). Promjena polja naprezanja (rasterećenje) uzrokuje oštećenje cementiranih veza i oslobađa potencijal bubrenja čestica gline (d), što u konačnici uzrokuje raspadanje stijenske mase. Dodatno opterećenje (e) može doprinjeti nastavku razbijanja veza i ubrzanju procesa rastrošbe.



Slika 2.3. Objašnjenje procesa dijagenese i učinka rasterećenja i ponovnog opterećenja strukture glinovitog gradiva [103]

Kod zasjeka u mekim stijenama početno "oslabljenje veza", kao posljedica rasterećenja uslijed iskopa, se nastavlja pod utjecajem prethodno navedenih čimbenika fizičke rastrošbe, a posljedično nastavlja erozijom rastrošene stijene s pokosa zasjeka. To razaranje veza, prikazano na primjeru lapora s područja srednje Dalmacije, očituje se [59]:

- raspucavanjem (mrvljenjem) u manje komade (Slika 2.4. oznaka 1) kroz produljivanje postojećih pukotina i/ili nastajanje novih,
- ljuštenjem stijene u obliku sitnih odlomaka s površine (Slika 2.4. oznaka 2), najčešće kao posljedica topljivosti u vodi minerala gline.



Slika 2.4. Primjer raspadanja lapora s područja Dalmacije: 1 - raspucavanje, 2 - ljuštenje [104]

Može se uočiti da, iako se u pravilu oba procesa javljaju istovremeno, raspucavanje prevladava kod lapora s više kalcita, dok je ljuštenje s površine svojstveno za „glinovitije“ lapore [104].

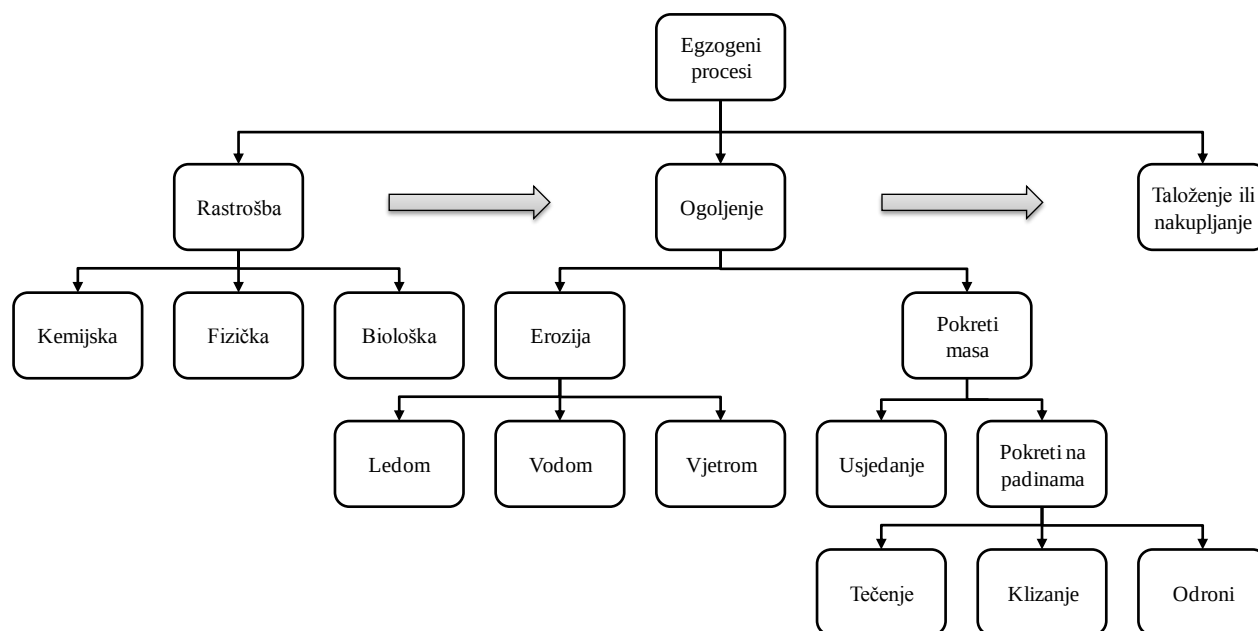
Opis svih bitnih procesa, kao i predviđanje utjecaja rastrošbe na stabilnost i trajnost zasjeka, trebao bi se razmatrati još u fazi projektiranja i u konačnici biti sastavni dio svakog projekta koji uključuje zasjecanje u mekim stijenama i flišnim stijenskim masama. Terenska istraživanja se ne smiju ograničavati na trenutno stanje, već uvijek moraju sadržavati očekivano buduće stanje i to najmanje u vijeku trajanja konstrukcije [105].

### 2.3.1. Erozijska

Da bi se ustinu razumio pojam rastrošbe, potrebno je još odrediti i pojam erozije, budući se ta dva pojma često miješaju. Razlika između rastrošbe i erozije je suptilna, stoga ju je najjednostavnije opisati na sljedeći način: *rastrošba je proces raspadanja stijene, dok je erozija*

*proces odnošenja usitnjenih komada stijene, s mjesta gdje su nastali na mjesto gdje se nakupljaju.* Naravno, rastrošba i erozija se mogu odvijati i istovremeno, stoga se često pojmovno miješaju ili ih se pogrešno smatra istoznačnicama.

Prema [2] i [32] najlogičnija podjela egzogenih procesa je prema redoslijedu događanja ovih procesa u prirodi (Slika 2.5.): rastrošba (trošenje, eng. weathering), ogoljenje (eng. denudation) i taloženje (eng. deposition). Ogoljenje uključuje eroziju, ali i sve ostale pokrete masa (kao što su klizanja, odroni i sl.).



Slika 2.5. Dijagram sistematizacije egzogenih procesa [2]

Prema Šestanoviću [19] erozija nastaje isključivo djelovanjem egzodinamičkih sila, a dijeli se u tri skupine:

- erozija vodom, koja se javlja kao:
  - regionalna ili pluvijalna (kišom)
  - fluvijalna (vodenim tokovima)
- erozija ledom i snježnim lavinama (glacijalna erozija ili eksaracija)
- erozija vjetrom (eolska erozija ili korazija)

Iako po definiciji ne spada u agense erozivnih procesa, gravitacija u kombinaciji s različitim vodoravnim ubrzanjima (potres, miniranje i sl.) je često bitan čimbenik prijenosa gradiva u manjim ili većim količinama (kroz pokrete masa). To je posebno bitno istaknuti na kratkim udaljenostima te na strmim kosinama i zasjecima.

Osim potencijala nekog agensa erozije (erozivnost), vrlo bitna je i erodibilnost podloge. Erodibilnost, određena kao podložnost nekog prirodnog gradiva da bude pokrenuto i pomaknuto [106], u prvom redu ovisi o koheziji podloge kod koherentnih gradiva, odnosno o granulometriji kod nekoherentnih gradiva. Što je kohezija podloge veća, pokretač erozije mora imati veću kinetičku energiju (npr. ledenjaci).

## 2.4. Pojavnost rastrošbe na zasjecima u flišu

Prema Kuhneltu [107] degradacija stijenske mase započinje s njenim oslabljivanjem, a završava s njenim potpunim raspadanjem. Nastavno na to zapažanje, kod zasjeka u mekim stijenskim masama mogu se izdvojiti tri osnovna koraka u vremenskom slijedu tog procesa:

- Rasterećenje stijenske mase,
- Rastrošba,
- Erozijska.

Rasterećenje stijenske mase uzrokovano iskopom dovodi do preraspodjele naprezanja. Prema [100] rasterećenje možemo podijeliti na primarno i sekundarno. Primarno se odvija unutar nekoliko dana do nekoliko mjeseci nakon iskopa, unutar kojeg se diskontinuiteti počnu postepeno otvarati, pritom omogućavajući pristup vodi i početku razvoja procesa rastrošbe. U isto vrijeme normalna naprezanja u pukotinama se smanjuju, posljedično i posmična čvrstoća, što može dovesti do pojave nestabilnih blokova neposredno nakon iskopa.

Sekundarno rasterećenje se odvija u vremenu korištenja konstrukcije kroz učinke procesa rastrošbe (opisanih u poglavlju 2.3.) i erozije. Promjenom svojstava gradiva, njegove gustoće i zapremine te nagiba i morfologije pokosa, preraspodjela naprezanja i deformacija će se nastaviti dugo nakon što se primarni učinci iščeznu. Primarno rasterećenje je značajnije i potencijalno opasnije zbog velike početne promjene i oslobađanja naprezanja, dok je sekundarna s druge strane dugoročnija i nepredvidljivija.

Rastrošba stijene uz površinu i erozija gradiva s površine pokosa su povezani procesi. Rastrošeno gradivo, kao i nerastrošeno koje je postalo nestabilno rastroškom i/ili erozijom okolnih članova, prenosi se erozijom (i drugim utjecajima) u podnožje zasjeka, što u konačnici zaokružuje jedan ciklus raspadanja stijenske mase. Ovaj proces je ograničen na relativno plitke zone stijenske mase neposredno uz površinu pokosa te se kao takav obično ne uzima u obzir kod analiza stabilnosti dubokih klizišta. Nažalost, često nije niti prepoznata njegova važnost kao samostalnog



procesa, što uz poteškoće pri njegovom vrednovanju dovodi do nerazumijevanja mehanizama koji ga uzrokuju [108]. Pri tome su često zanemarene i osnovne geološke postavke koje mogu prouzročiti i dodatne probleme (npr. diferencijalnu rastrošbu i odranjanje velikih blokova kao posljedicu iste).

S aspekta zasjecanja u mekim stijenskim masama, prema [109] i preporukama ISRM-a [15], može se odrediti dva osnovna tipa geotehničkih profila:

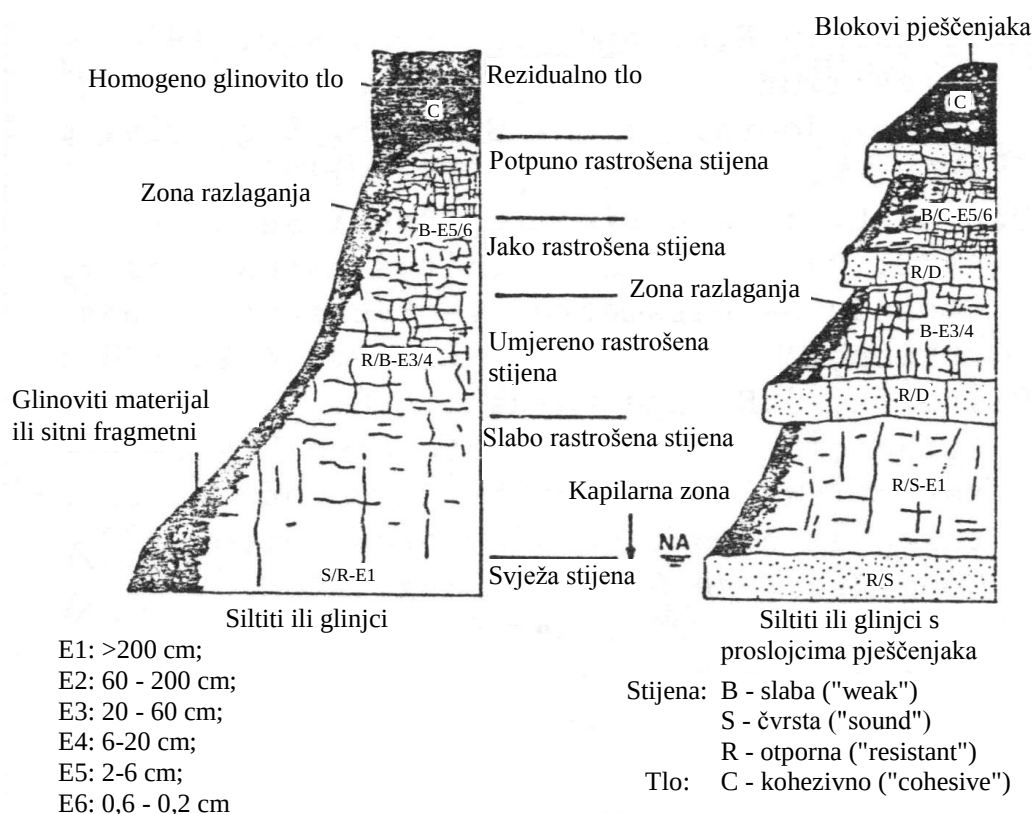
a) homogeni profili;

b) heterogeni profili.

Na slici 2.6.a prikazan je homogeni profil na primjeru stjenke koja se sastoji od meke stijene (glinca ili silita) [15]. Prema [109] dubina zone rastrošbe prvenstveno ovisi o mineralnoj fazi materijala, udjelu ekspanzivnih glinenih minerala i okolišu, ali i ostalim utjecajima navedenim u poglavlju 2.3. Pri tome se stupanj rastrošbe stijene određuje kroz šest razreda (oznake E1 - E6 na slici 2.6.), u rasponu od čvrste ("svježe", engl. fresh) stijene do rezidualnog tla (eng. residual soil), s danim pripadnim opisom u tablici 2.1.

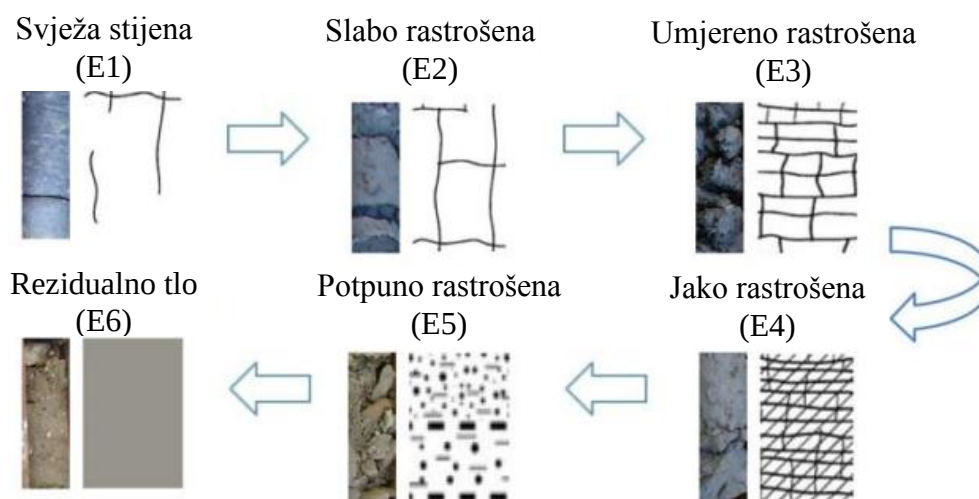
Tablica 2.1. Vrednovanje stupnja rastrošbe stijene prema preporukama ISRM-a [15]

| Pojam               | Opis                                                                                                                                                                                                              | Oznaka |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Svježa stijena      | Bez vidljivih znakova rastrošbe stijene. Moguća manja promjena boje na površinama glavnih diskontinuiteta.                                                                                                        | E1     |
| Slabo rastrošena    | Promjena boje ukazuje na rastrošbu intaktne stijene i površine diskontinuiteta. Promjena boje zbog rastrošbe je zahvatila cijelu stijenu u promatranom području, uz moguća oslabljenja u odnosu na svježe stanje. | E2     |
| Umjereno rastrošena | Manje od polovine intaktne stijene je raspadnuto u tlo. Svježa stijena, uz eventualnu promjenu boje, prisutna je samo kao okvir diskontinuiteta.                                                                  | E3     |
| Jako rastrošena     | Više od polovine intaktne stijene je raspadnuto u tlo. Svježa stijena, eventualno promijenjene boje, prisutna je kao okvir diskontinuiteta.                                                                       | E4     |
| Potpuno rastrošena  | Sva intaktna stijena je raspadnuta u tlo. Originalna struktura stijenske mase je još uvijek većinom netaknuta.                                                                                                    | E5     |
| Rezidualno tlo      | Sva intaktna stijena je raspadnuta u tlo. Struktura i tekstura su potpuno uništene. Došlo je do velike promjene zapremine, ali nije došlo do značajnog transporta tla.                                            | E6     |



Slika 2.6. Tipični profili zasjeka i zone rastrošenosti u sedimentnim stijenskim masama prema ISRM-u [15] (a) homogeni profil, (b) heterogeni profil

Kvanitativni opis stanja stijenske mase iz tablice 2.1., kao i sam tijek procesa rastrošbe na primjeru siltita s područja Draške doline u gradu Rijeci, prikazan je i grafički na slici 2.7. (prema Grošić i Arbanas [110]).



Slika 2.7. Tijek procesa rastrošbe i ocjena stanja meke stijene na primjeru siltita [110]

U flišnim stijenskim masama češći su primjeri heterogenih profila s izmjenama članova s različitim mehaničkim svojstvima (Slika 2.6.b). Budući je fliš pogodan za tektonsko oblikovanje

[32], kao posljedica boranja slojevi su često savinuti (Slika 2.8.a) ili zarotirani pod kutem čak do 90 stupnjeva u odnosu na horizontalu (Slika 2.8.b).



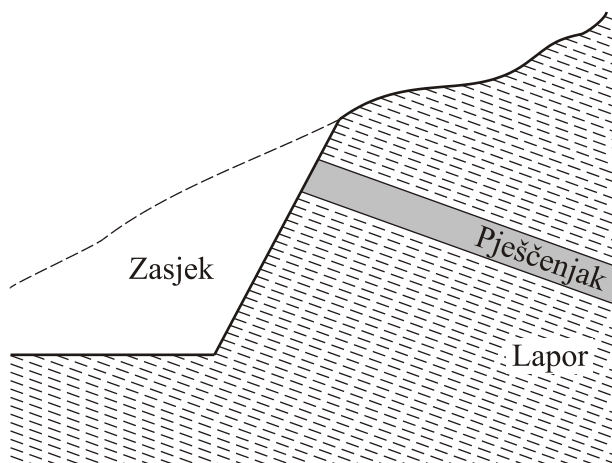
(a)



(b)

Slika 2.8. a) Primjer razlomljenog boranog flišnog slijeda (lokacija Kaštelet, Split) b) Primjer rotacije flišnog slijeda do 90 stupnjeva (lokacija Makarska ul, Žnjan, Split)

Dok je za homogene profile proces rastrošbe i erozije zasjeka relativno predvidljiv, te ga je moguće i dobro opisati matematičkim modelima recesije, za nehomogene zasjeke taj zadatak je značajno složeniji i nepredvidljiviji (Slika 2.9.a). Članovi koji su otporniji rastrošbi (njihova otpornost često spada i u "geološku vremensku skalu"), ostaju na kosinama poput "konzole" (Slika 2.9.b).



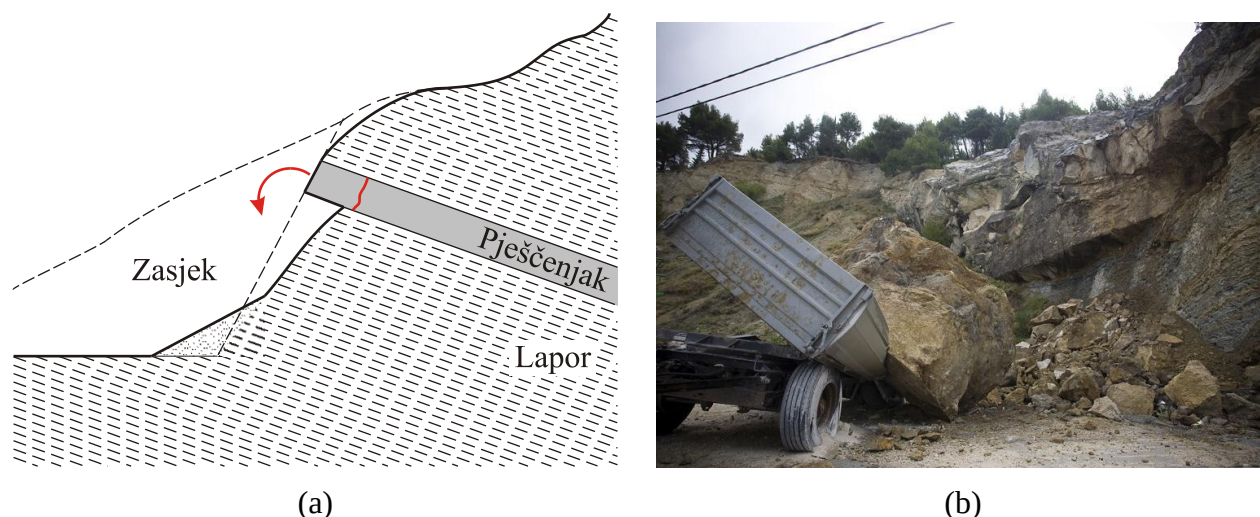
(a)



(b)

Slika 2.9. a) Primjer geološkog profila zasjeka u flišu s članom koji je otporniji rastrošbi b) Primjer zasjeka s istim geološkim profilom na lokaciji Kaštelet, Split.

Kada konzola postane dovoljno dugačka, uslijed djelovanja momenta savijanja odvajaju se blokovi (Slika 2.10.a) i nastaje odron koji ugrožava prostor ispod kosine (Slika 2.10.b).



Slika 2.10. a) Razvoj višestupnjevane rastrošbe i jednostavni mehanizam odvajanja bloka rotacijom b) Zasjek s istim geološkim postavkama u poslovnoj zoni u Omišu, kao primjer moguće štete.

Bez obzira na mogućnost (ili bolje rečeno nemogućnost) predviđanja i oblikovanja ovakvih događaja kod pojave diferencijalne rastrošbe, cilj projektnog rješenja (ili sanacije) pokosa u ovakvim situacijama bi svakako trebao biti usmjeren k sprječavanju uzročnika pojave diferencijalne rastrošbe. Kod zasjeka to bi svakako značilo sprječavanje rastrošbe upotrebom kvalitetnog projektnog rješenja zaštite pokosa ili pojačanim redovitim održavanjem kroz preventivno uklanjanje potencijalno nestabilnih blokova.

### **3. UTJECAJ RASTROŠBE NA INŽENJERSKA SVOJSTVA MEKIH STIJENA**

U ovom poglavlju prikazani su rezultati laboratorijskih ispitivanja fizikalnih svojstava i indeksa trajnosti stijene, s ciljem određivanja dodatnih kriterija razredbe prema trajnosti. Opisan je osmišljeni postupak laboratorijske simulacije rastrošbe lapora izloženog rastrošbi, kao i rezultati analize posmične čvrstoće u različitim fazama te su predložene smjernice za primjenu postupka laboratorijski simulirane rastrošbe u mekim stijenama.

#### **3.1. Uvod**

Trajnost zasjeka je jedno od ključnih pitanja kod analize stabilnosti kosina u vremenu koje su iskopane u laporu, a pritom nisu zaštićene od razvoja procesa rastrošbe. Pitanje trajnosti zasjeka u mekim stijenama najčešće se očituje kroz gubitak stabilnosti površinskog sloja ili gubitak stabilnosti cijele kosine, uzrokovane raspadanjem površinskog sloja pokosa ili smanjenjem posmične čvrstoće u dubini kosine, kao posljedicama rastrošbe stijenskog materijala. Ponašanje glinovitih stijena u vremenu, značajno je kontrolirano njihovim mineraloškim sastavom, stupnju pretkonsolidacije, sastavom veziva u strukturi, stupnjem cementacije te teksturom stijene. Zbog činjenice da su mineraloške i kemijske analiza često nedostupne i skupe, te ih je ponekad

zahtjevno interpretirati, podložnost rastrošbi se obično opisuje jednostavnijim indeksima trajnosti. Pritom se za stijene poput slabo vezanih pješčenjaka, lapora i drugih glinovitih stijena najčešće koristi indeks trajnosti stijene (engl. „slake durability index“, u hrvatskoj literaturi često se koristi termin „indeks osjetljivosti na kalavost“) [111-114].

Indeks trajnosti stijene definirali su Franklin i Chandra [26] kao funkciju cikličkog vlaženja i sušenja gradiva uz pomoć standardiziranog uređaja, te je kao takva prihvaćena od strane ASTM-a [115]. U većini studija, procjene trajnosti stijene temelje se na indeksu trajnosti stijene, definiranom nakon dva ciklusa pokusa vodeći se pritom preporukom ISRM-a i ASTM-a. Međutim, mnogi autori naglašavaju [43, 116] da tako definiran indeks nije prihvatljiv pokazatelj trajnosti glinovitih stijena. U provedbi ispitivanja prezentiranih u ovom radu bilo je lako prepoznati primjere u kojima je stijena u potpunosti fragmentirana, međutim ti fragmenti nisu dovoljno mali da prođu kroz otvore standardiziranog bubnja, te se masa uzorka ne razlikuje značajno od početne. Budući se indeks računa preko mase materijala koji je preostao u bubnju, putem indeksa se dobije privid da je stijena postojana ili visoko postojana, dok je stanje u stvarnosti dijametralno suprotno.

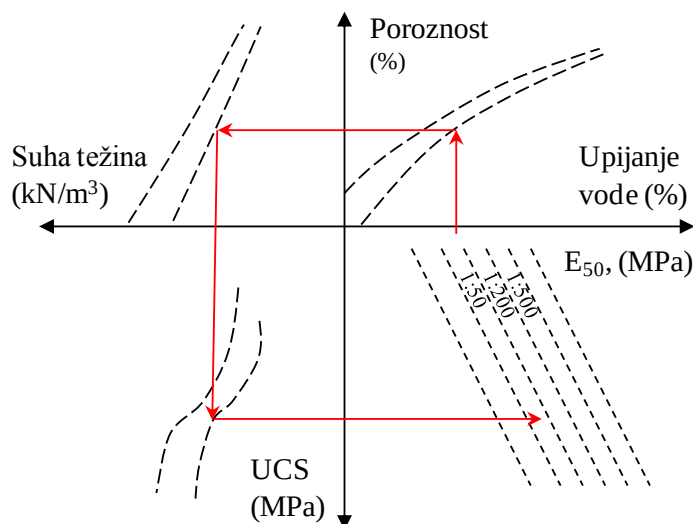
Raspucavanje (eng. „slaking“, u hrvatskoj literaturi često se koristi termin „kalavost“) je jedan od najčešćih oblika fizičke degradacije koji utječu na glinovite stijene. Lapor iz područja Dalmacije korišten u ovom radu može sadržavati različite odnose glinovitih i ne-glinenih minerala. Tip kalanja snažno kontrolira mineralogija gline [58] te koncentracija izmjenjivih natrijevih iona. U čistim glinama kalanje se očituje kroz [117]: disperziju sitnih čestica, bubrenje materijala, kroz površinsko ljuštenje materijala u obliku sitnih listića, pojavu velikih pukotina kroz cjelokupnu masu ili usitnjavanje nizom manjih.

Mješavine različitih minerala gline, kao i geometrijski raspored čestica, pokazuju različite kombinacije prethodnih navedenih vrsta kalanja te je zasigurno najbolji način određivanja očekivane postojanosti detaljno poznavanje mineraloškog sastava. Međutim, budući je određivanje detaljnog mineraloškog sastava dugotrajan i skup posao, potreba za praktičnim, brzim i jeftinijim rješenjima procjene trajnosti je od velikog značaja inženjerima u praksi. Jedno od rješenja bi svakako bilo pretpostaviti da su meke stijene uvijek nisko postojane, kako bi se izbjegle poteškoće s ispitivanja trajnosti, no to obično rezultira prekonzervativnim projektnim rješenjima, što pak u konačnici uzrokuje nepotrebno visoke troškove gradnje. S druge strane, takav pristup onemogućuje bilo kakvo suvislo razmatranje trajnosti zasjeka na kojem nije upotrebljen neki od uobičajenih tipova zaštite.



U ovom poglavlju prikazati će se rezultati korištenih standardnih ispitivanja trajnosti, različitih varijacija standardiziranog pokusa trajnosti te niza dodatnih pokusa kojima se utvrđuju fizikalna svojstva materijala, u cilju određivanja dodatnih kriterija kojima bi se uklonila nepouzdanost standardiziranog pokusa u mekim stijenama.

Osim toga, osnovna fizikalna svojstva kao što su: upijanje, poroznost, suha gustoća stijene, specifična gustoća stijene i sl., se vrlo često tretiraju kao "indeksna svojstva" te je vrlo često moguće putem njih povezati naizgled različita istraživanja na istim materijalima. Glavni kriteriji odabira pojedinog svojstva su jednostavnost i dostupnost, ali da u kombinaciji s drugima što bolje ukazuje na podložnost rastrošbi. Tema ovog rada je isključivo trajnost materijala s inženjerskog aspekta, međutim ukoliko se definira kvalitetan indeks trajnosti, koji je u korelaciji s nekim od indeksnih svojstava, tada se rezultati mogu povezati sa studijama u kojima je žarište postavljeno na parametre čvrstoće i deformabilnosti stijene (Slika 3.1.).



Slika 3.1. Primjer mogućih korelacija između pojedinih svojstava stijene [86]

Nadalje, u ovom radu razmotrit će se i utjecaj rastrošbe na smanjenje posmične čvrstoće meke stijene. Budući je lapor sklon brzom degradaciji nije preporučljivo koristiti postupke koji zahtijevaju povećanu i složenu manipulaciju s uzorcima prije izvođenja pokusa. Za ovu studiju korišten je jednostavni pokus smicanja u prijenosnom aparatu za direktno smicanje, uz potrebne preinake koje omogućavaju simulaciju rastrošbe u laboratorijskim uvjetima te jednostavniju ugradnju uzorka u ćeliju za smicanje.

Glavni cilj ovog rada jest izraditi konkretne smjernice za analizu trajnosti mekih stijena s Dalmatinskog područja, međutim osim toga, kao specifični cilj nameće se određivanje prikladnog programa ispitivanja i metoda provedbe koji su primjenjivi za sve tipove mekih stijena. Upravo u toj činjenici i leži praktična vrijednost ovog rada.

## 3.2. Laboratorijska ispitivanja svojstava mekih stijena

### 3.2.1. Uzorkovanje

Prikupljanje uzoraka za ispitivanje inženjerskih svojstava lapora provedeno je na širem području grada Splita sa svježe iskopenih zasjeka u otvorenim kamenolomima, sondažnim bušenjem u okviru trenutno izvođenih istražnih radova te u aktualnim iskopima građevnih jama.

Veliki raspon različite pojavnosti lapora, od glinovitih pa sve do vapnenačkih, čini prikupljanje i pripremu uzoraka posebno zahtjevnom. Uzorci su prikupljeni u blokovima približnih dimenzija 10 do 20 cm upotrebom različitih tehnika, od ručnog prikupljanja čekićem i djetlom, upotrebom pile za rezanje kamena (Slika 3.2.) te rotacijskim sondažnim bušenjem. U svakom od navedena tri slučaja uzorkovan je materijal iz svježe iskopenih jama ili padina s dubine od minimalno 50 cm te je postupak uvijek proveden bez upotrebe vode (tzv. postupak "na suho").



Slika 3.2. Primjer uzorkovanja na terenu upotrebom dijamantne pile

Za neke vrste lapora, posebno one s udjelom gline većim od 40%, uzorkovanje je otežano zbog čestih raspucavanja. Neki blokovi bi se raspucali tijekom uzorkovanja i prijevoza, ali ostaci su najčešće dovoljno veliki i upotrebljivi za ispunjenje programa ispitivanja. Prije prijevoza, da bi se umanjili učinci vibracija i sušenja, uzorci su obloženi parafinom i tankim plastičnim mrežama.

Nakon dopremanja u laboratorij, ovisno o tipu ispitivanja, uzorci se dodatno obrađuju upotrebom pile za kamen na željene dimenzije. Zbog sprečavanja početnog raspadanja uzorka, pila za kamen se uvijek koristi bez upotrebe vode, uz česte stanke da bi se spriječilo pregrijavanje uzorka i/ili opreme.



Na ovaj način uzorkovanje je provedeno na ukupno 30 lokacija te je na tim uzorcima proveden potpuni program ispitivanja. Uz to, u jednom dijelu prikazanog istraživanja upotrebljeni su svi dostupni laboratorijski pokusi provedeni u Geomehaničkom laboratoriju FGAG-a, koji su uvažavali navedeni postupak pripreme uzoraka te su provedeni na istoj opremi od strane istih ispitivača. U konačnici korelacijske analize osnovnih fizikalnih svojstava broje 93 uzorka.

Za analize degradacije tj. smanjenja posmične čvrstoće provedeno je 10 ispitivanja. Uzimajući u obzir značajnu količinu potrebnog materijala za provedbu ispitivanja, kao i njegovo dugo trajanje (oko 25 radnih dana za jedan uzorak) pokazani rezultati predstavljaju značajan doprinos unaprijeđenju metodologije ispitivanja, međutim nisu dovoljni za suvisliju statističku obradu i koreliranje s indeksnim svojstvima.

### **3.2.2. Mineraloška analiza lapora**

Svojstva glinovitih stijena i njihovo ponašanje u vremenu, kada su izložene vanjskim utjecajima na izvedenim zasjecima, uvjetovano je, između ostalog, njihovim mineraloškim sastavom.

Za potrebe razumijevanja samog procesa rastrošbe u laporima, izvršeno je ispitivanje mineraloškog sastava jednog dijela uzoraka lapora. Ispitivanje mineraloškog sastava izrađeno je metodom rendgenske difrakcije (XRD - X-ray diffraction). Mineraloški sastav određen za niz slučajno odabranih uzoraka lapora prikazan je u tablici 3.1. Odabrani su uzorci s udjelom karbonatne komponente do 80%, jer je za njih opažanjem ustanovljeno da se proces rastrošbe znatno brže razvija nego u laporima s većim udjelom karbonatne komponente. Utvrđen je prosječni udio minerala na ispitanim uzorcima: kalcit od 42 do 79%, dolomit od 2 do 7%, kvarc od 3 do 11%, plagioklas od 1 do 9%, klorit od 0 do 9%, smektit od 6 do 20%, vermikulit od 0 do 6%, tinjčasti minerali od 3 do 12%. Naziv "tinjčasti minerali" upotrijebljen je za označavanje smjese koja vjerojatno sadrži illit i interstratificirani illit-smektit s malim udjelom smektitnih slojeva te možda muskovit.

Ovakav mineraloški sastav upućuje na mogućnost pojave procesa opisanih u poglavlju 2, a koji zajedno rezultiraju rastrošbom materijala. Smektit je mineral koji je podložan bubrenju i javlja se u svim ispitanim uzorcima. Bubrenjem se razvija pritisak koji može dezintegrirati stijenu, ali se bubrenje može razviti samo uz prisutnost vode.

Tablica 3.1. Mineraloški sastav uzoraka lapora iz naslage fliša na Splitskom poluotoku

| Oznaka<br>uzorka | Tip | Karbonatni<br>minerali (%) |         | Vermikulit<br>(%) | Smektit (%) | Kvarc (%) | Plagioklas<br>(%) | Tinčasti<br>minerali (%) | Klorit (%) |
|------------------|-----|----------------------------|---------|-------------------|-------------|-----------|-------------------|--------------------------|------------|
|                  |     | Kalcit                     | Dolomit |                   |             |           |                   |                          |            |
| 31               | I   | 72                         |         |                   | 10          | 4         | 2                 | 5                        | 5          |
| 35               | I   | 77                         |         |                   | 8           | 3         | 1                 | 3                        |            |
| 59               | I   | 79                         |         | T                 | 6           | 3         | 1                 | 5                        |            |
| 66               | I   | 73                         | 2       |                   | 7           | 3         | 1                 | 5                        | 5          |
| 68               | I   | 79                         |         | T                 | 7           | 3         | 2                 | 3                        | T          |
| 45               | II  | 63                         |         | T                 | 8           | 7         | 3                 | 9                        | 7          |
| 47               | II  | 56                         |         | T                 | 14          | 7         | 3                 | 9                        | 6          |
| 48               | II  | 56                         | 3       |                   | 12          | 6         | 4                 | 9                        | 7          |
| 53               | II  | 69                         |         | 5                 | 10          | 4         | 1                 | 7                        |            |
| 54               | II  | 47                         | 6       |                   | 11          | 10        | 5                 | 9                        | 8          |
| 55               | II  | 45                         | 7       |                   | 9           | 11        | 8                 | 8                        | 7          |
| 60               | II  | 55                         |         | 6                 | 12          | 7         | 3                 | 11                       |            |
| 61               | II  | 55                         |         | 5                 | 12          | 7         | 4                 | 11                       |            |
| 41               | III | 57                         |         |                   | 16          | 7         | 5                 | 9                        |            |
| 42               | III | 46                         |         | 5                 | 20          | 9         | 4                 | 10                       |            |
| 43               | III | 52                         |         |                   | 16          | 7         | 5                 | 10                       | 4          |
| 44               | III | 60                         |         | T                 | 11          | 6         | 3                 | 10                       | 6          |
| 46               | III | 53                         |         | T                 | 16          | 7         | 4                 | 10                       | 4          |
| 62               | III | 42                         | 6       |                   | 11          | 10        | 7                 | 12                       | 9          |
| 63               | III | 42                         | 7       |                   | 9           | 11        | 9                 | 10                       | 8          |

T : u tragovima

Tinčasti minerali: vjerojatno sadrži illit i interstratificirani illit-smektit, s malim udjelom smektitnih slojeva, te možda muskovit.

Osim standardnog oblika bubrenja u laporu, zbog ovakvog mineraloškog sastava javlja se i proces stvaranja gipsa na stjenkama pukotina [59]. Gips ima oko 98% veću zapreminu od ulaznih sastavnica koje se izdvajaju iz lapora te se unutar pukotina u kojima se odvija proces stvaranja gipsa, stvara pritisak koji produžuje postojeće pukotine i stvara nove pukotine. Za ovaj proces također je potrebna voda. Izdvajanjem materijala iz strukture lapora u procesu stvaranja gipsa, povećava se poroznost te meke stijene, a time i dubina upijanja vode od površine, što ubrzava proces i povećava dubinu njegovog utjecaja od površine. Gips se, kao proizvod ovog procesa na analiziranim laporima, može uočiti kao bijela skrama koja se izlučuje na površini.

Ovisno o kemijskom sastavu vode kao i mineraloškom sastavu stijene, osim opisanih procesa razvijaju se i drugi oblici kemijske rastrošbe koji, u reakciji s vodom, izdvajaju materijal iz strukture stijene.

Osim XRD analize, relativna količina karbonatnih minerala sva 93 analizirana uzorka je određena standardnim postupkom kalcimetrije prema standardu ASTM (D4373-02, 2004). Ova metoda ispitivanja obuhvaća određivanje sadržaja karbonata u tlu i mekim stijenama koja se može lako usitniti mehaničkim putem. Postupak koji se provodi u kontroliranim laboratorijskim uvjetima, temelji se na reakciji solne kiseline i karbonata u uzorku te mjerenju količine glavnog proizvoda te reakcije, ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ). Točnost postupka je unutar 5% jer u uređaju nije predviđen odvajač ostalih plinova od  $\text{CO}_2$ . Potrebno je napomenuti da se udio karbonata koristi u većini geoloških klasifikacija, međutim nije mjerodavan bez odgovarajuće petrografske analize. U ovom radu korišten je zbog svoje jednostavne upotrebe, a uz vizualni pregled petrifikacije može poslužiti za ocjenu postojanosti materijala.

### 3.2.3. Indeksna svojstva meke stijene

Na osnovu pregleda literature, zapažanja autora i kriterija jednostavnosti i dostupnosti laboratorijskog postupka, odabrana su slijedeća svojstva kao indeksni pokazatelji:

- udio karbonata u mineraloškom sastavu lapora,
- upijanje vode,
- suha gustoća stijene,
- specifična gustoća stijene,
- indeks točkaste čvrstoće,
- indeks trajnosti (eng. "slake durability index" - SDI),
- modificirani indeks trajnosti (eng. "loss slake index" - LSI).

Svako od predloženih svojstava opisano je ukratko u ovom poglavlju s navedenim postupkom (načinom) određivanja, svrhom i nedostacima pokusa te eventualnim prilagodbama izvođenju u mekim stijenama. Indeksi trajnosti posebno su opisani u poglavlju 3.3.

#### **Upijanje vode**

Upijanje vode predstavlja težina vode, koju upije uzorak stijene, nakon što je 24 sata uronjen u vodu, najčešće izražena u postotku suhe mase uzorka. U ovom radu upijanje je određeno prema prilagođenom standardu ASTM (C97-02, 2004), budući većina uzoraka meke stijene ima svojstvo brzog raspadanja nakon ponovnog uranjanja u vodu. Iz tog razloga prvo je izvršeno uranjanje odabrane količine uzorka u vodu te je nakon eventualnog djelomičnog raspada izvršen odabir

većih preostalih komada koji su izvagani u vlažnom stanju. Odabrani komadi su zatim osušeni i izvagani u suhom stanju, čime je uklonjen dodatni utjecaj raspadanja koji bi se pojavio usljed prethodnog sušenja.

### **Suha gustoća stijene**

Suha gustoća stijene,  $\rho_d$ , je masa čvrstih čestica u jedinici zapremine stijene. Određena je prema preporukama ISRM-a [15], korištenjem metode istisnute žive. Osim što je potrebna za određivanje poroziteta stijenskog materijala, služi i za procjenu udjela glinovite komponente (manje vrijednosti ukazuju na veći udio minerala glina).

### **Specifična gustoća stijene**

Specifična gustoća,  $\rho_s$ , je masa jedinice zapremine čvrstih čestica stijene tj. potpuno zbijenog materijala bez pora i šupljina. Određena je prema preporukama ISRM-a [15], korištenjem metode piknometra. Osim što je potrebna za određivanje poroziteta stijenskog materijala, ukazuje na odnos karbonatnih i glinovitih komponenti meke stijene.

### **Indeks točkaste čvrstoće**

Budući je u laporima s područja Dalmacije vrlo često nemoguće pripremiti cilindrični uzorak te bi i provođenje takvog ispitivanja predstavljalo tezu samo za sebe, u ovom radu za procjenu čvrstoće stijene korišten je indeks točkaste čvrstoće (eng. "point load test") prema prijedlogu ISRM-a [15]. Pokus može poslužiti za procjenu drugih parametara čvrstoće s kojima se može povezati, npr. jednoosne tlačne i vlačne čvrstoće.

U ovom radu korišteni su uzorci približno oblika kvadra dimenzija poprečnog presjeka  $50 \pm 25$  mm ili valjkastog oblika ukoliko su pribavljeni sondažnim bušenjem te je izvršena korekcija na uzorak ekvivalentnog promjera od 50 mm. Kao i za sva ispitivanja čvrstoće na stijenama, indeks točkaste čvrstoće ovisi o sadržaju vode u uzorcima. Voda može omekšati veze ili interakciju s mineralnim površinama te se mijenjaju svojstva površine. Nadalje, putem pornog pritiska voda može izazvati nestabilnost duž područja oslabljenja. Iz tog razloga, svi uzorci su ispitani u laboratorijskim uvjetima i kontroliranom vlažnošću.

Ispitivanje na jednom uzorku se smatra potpunim ukoliko je obavljeno najmanje 5 do 10 pokusa. Reprezentativna vrijednost  $I_{S(50)}$  dobije se odbacivanjem najmanje i najveće vrijednosti, a od preostalih se izračunava kao prosjek.

U tablici 3.2. prikazani su rezultati laboratorijskih ispitivanja odabranih indeksnih svojstava. Rezultati indeksa trajnosti prikazani su u poglavlju 3.3.

Tablica 3.2. Rezultati laboratorijskih ispitivanja: udio karbonata, suha gustoća stijene, upijanje vode, porozitet i indeks točkaste čvrstoće

| Oznaka uzorka | Udio karbonata (%) | Suha gustoća $\rho_d$ (Mg/m <sup>3</sup> ) | Upijanje vode (%) | Porozitet (%) | Indeks točkaste čvrstoće $I_{S(50)}$ (MPa) |
|---------------|--------------------|--------------------------------------------|-------------------|---------------|--------------------------------------------|
| 1             | 63,18              | 2,39                                       | 7,72              | 11,80         | 1,05                                       |
| 2             | 46,03              | 2,21                                       | 7,79              | 18,19         | 0,35                                       |
| 3             | 74,20              | 2,45                                       | 4,15              | 10,39         | 1,93                                       |
| 4             | 76,52              | 2,52                                       | 2,50              | 7,88          | 3,85                                       |
| 5             | 87,40              | 2,56                                       | 1,88              | 6,28          | 2,27                                       |
| 6             | 89,41              | 2,64                                       | 2,07              | 3,29          | 3,09                                       |
| 7             | 69,57              | 2,43                                       | 7,51              | 12,10         | 0,80                                       |
| 8             | 54,62              | 2,55                                       | 2,60              | 7,33          | 1,80                                       |
| 9             | 60,18              | 2,40                                       | 5,33              | 10,05         | 1,14                                       |
| 10            | 77,23              | 2,54                                       | 3,00              | 5,40          | 2,05                                       |
| 11            | 76,30              | 2,53                                       | 3,10              | 6,41          | 1,91                                       |
| 12            | 67,70              | 2,46                                       | 4,72              | 9,53          | 1,72                                       |
| 13            | 56,53              | 2,33                                       | 9,11              | 14,68         | 0,69                                       |
| 14            | 59,33              | 2,34                                       | 7,55              | 11,90         | 1,32                                       |
| 15            | 75,91              | 2,51                                       | 3,21              | 5,29          | 1,64                                       |
| 16            | 47,90              | 2,43                                       | 2,88              | 10,07         | 0,94                                       |
| 17            | 51,60              | 2,48                                       | 2,27              | 8,07          | 0,82                                       |
| 18            | 40,20              | 2,34                                       | 7,50              | 13,54         | 0,58                                       |
| 19            | 51,80              | 2,45                                       | 3,34              | 9,35          | 2,22                                       |
| 20            | 65,60              | 2,36                                       | 4,59              | 12,79         | 1,82                                       |
| 21            | 65,00              | 2,37                                       | 4,33              | 12,41         | 2,01                                       |
| 22            | 58,80              | 2,25                                       | 9,91              | 16,68         | 2,19                                       |
| 23            | 52,08              | 2,33                                       | 8,71              | 13,73         | 0,83                                       |
| 24            | 66,49              | 2,37                                       | 5,76              | 12,90         | 1,75                                       |
| 25            | 78,63              | 2,62                                       | 0,98              | 3,25          | 6,33                                       |
| 26            | 74,13              | 2,50                                       | 4,82              | 7,39          | 1,93                                       |
| 27            | 79,77              | 2,66                                       | 0,71              | 2,86          | 5,98                                       |
| 28            | 73,45              | 2,71                                       | 0,73              | 1,04          | 9,78                                       |
| 29            | 68,66              | 2,70                                       | 0,58              | 0,76          | 6,14                                       |
| 30            | 91,77              | 2,58                                       | 2,12              | 4,95          | 3,92                                       |
| 31            | 71,42              | 2,51                                       | 3,29              | 7,05          | 2,27                                       |
| 32            | 70,29              | 2,49                                       | 3,30              | 7,73          | 3,18                                       |
| 33            | 66,92              | 2,50                                       | 3,40              | 7,43          | 4,12                                       |
| 34            | 70,85              | 2,57                                       | 3,07              | 4,30          | 2,50                                       |
| 35            | 78,16              | 2,45                                       | 3,94              | 9,50          | 2,77                                       |
| 36            | 68,04              | 2,37                                       | 4,70              | 12,22         | 2,12                                       |
| 37            | 69,17              | 2,49                                       | 3,38              | 7,69          | 1,84                                       |
| 38            | 68,04              | 2,37                                       | 5,70              | 12,75         | 2,86                                       |
| 39            | 71,42              | 2,49                                       | 4,05              | 7,88          | 2,01                                       |
| 40            | 70,85              | 2,47                                       | 3,27              | 8,63          | 2,25                                       |
| 41            | 63,82              | 2,19                                       | 17,31             | 18,03         | 1,79                                       |
| 42            | 59,18              | 2,34                                       | 11,35             | 12,78         | 3,29                                       |
| 43            | 58,70              | 2,16                                       | 9,29              | 18,99         | 2,28                                       |
| 44            | 57,03              | 2,43                                       | 8,09              | 9,66          | 2,64                                       |
| 45            | 58,14              | 2,42                                       | 7,38              | 10,00         | 2,00                                       |
| 46            | 54,51              | 2,37                                       | 10,11             | 12,26         | 0,76                                       |
| 47            | 57,31              | 2,41                                       | 8,74              | 10,57         | 3,00                                       |
| 48            | 58,00              | 2,39                                       | 7,03              | 10,69         | 2,15                                       |

Nastavak Tablice 3.2.

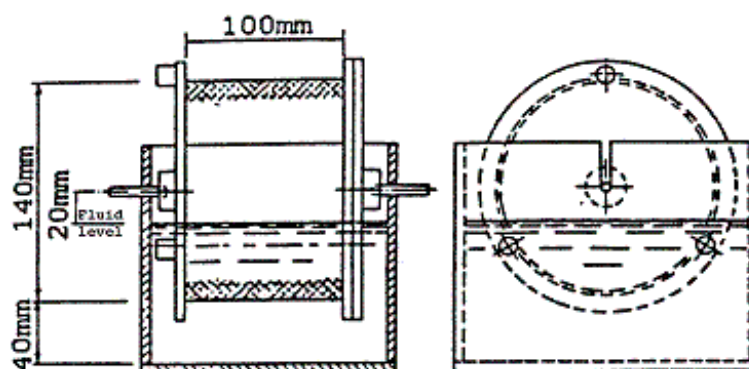
|                  |       |      |       |       |      |
|------------------|-------|------|-------|-------|------|
| 49               | 60,37 | 2,25 | 11,71 | 15,74 | 0,46 |
| 50               | 64,06 | 2,37 | 6,15  | 11,76 | 1,01 |
| 51               | 68,59 | 2,49 | 3,59  | 7,73  | 1,69 |
| 52               | 70,86 | 2,41 | 5,05  | 10,90 | 1,13 |
| 53               | 67,46 | 2,37 | 6,57  | 12,33 | 0,99 |
| 54               | 49,53 | 2,40 | 10,23 | 11,13 | 0,57 |
| 55               | 51,84 | 2,43 | 10,13 | 10,18 | 1,09 |
| 56               | 71,42 | 2,44 | 4,61  | 9,80  | 1,58 |
| 57               | 74,88 | 2,53 | 3,51  | 6,44  | 1,69 |
| 58               | 73,72 | 2,52 | 3,56  | 6,52  | 1,18 |
| 59               | 80,64 | 2,56 | 2,35  | 5,05  | 2,06 |
| 60               | 57,25 | 2,26 | 9,20  | 16,84 | 0,40 |
| 61               | 56,67 | 2,31 | 9,25  | 14,30 | 0,56 |
| 62               | 49,15 | 2,38 | 12,41 | 11,77 | 0,38 |
| 63               | 49,73 | 2,39 | 8,21  | 11,72 | 0,47 |
| 64               | 68,45 | 2,28 | 9,59  | 15,69 | 0,57 |
| 65               | 62,60 | 2,16 | 14,77 | 18,95 | 0,28 |
| 66               | 71,96 | 2,57 | 2,27  | 4,93  | 2,42 |
| 67               | 74,89 | 2,56 | 3,37  | 5,12  | 2,43 |
| 68               | 80,15 | 2,58 | 1,96  | 4,48  | 2,20 |
| 69               | 62,02 | 2,40 | 5,90  | 11,05 | 0,88 |
| 70               | 76,06 | 2,55 | 3,06  | 5,54  | 1,74 |
| 71               | 67,70 | 2,36 | 6,93  | 12,70 | -    |
| 72               | 81,12 | 2,49 | 3,42  | 7,36  | -    |
| 73               | 61,73 | 2,42 | 8,29  | 10,89 | -    |
| 74               | 59,05 | 2,29 | 8,78  | 14,80 | -    |
| 75               | 60,84 | 2,37 | 7,89  | 12,33 | -    |
| 76               | 80,52 | 2,49 | 4,13  | 7,73  | -    |
| 77               | 54,58 | 2,25 | 12,37 | 17,39 | -    |
| 78               | 99,75 | 2,65 | 0,88  | 2,76  | -    |
| 79               | 62,03 | 2,26 | 9,65  | 16,61 | -    |
| 80               | 74,37 | 2,50 | 3,15  | 7,30  | -    |
| 81               | 61,39 | 2,27 | 10,45 | 14,49 | -    |
| 82               | 80,28 | 2,52 | 2,85  | 6,39  | -    |
| 83               | 80,30 | 2,50 | 3,14  | 6,75  | -    |
| 84               | 64,93 | 2,29 | 9,61  | 13,87 | -    |
| 85               | 77,92 | 2,47 | 4,16  | 8,54  | -    |
| 86               | 67,29 | 2,42 | 4,80  | 10,00 | -    |
| 87               | 75,55 | 2,47 | 4,48  | 8,25  | -    |
| 88               | 99,75 | 2,55 | 1,38  | 6,70  | -    |
| 89               | 64,33 | 2,24 | 9,81  | 17,27 | -    |
| 90               | 49,79 | 2,14 | 20,78 | 20,37 | -    |
| 91               | 68,04 | 2,32 | 6,46  | 13,30 | -    |
| 92               | 77,32 | 2,51 | 3,28  | 7,40  | -    |
| 93               | 78,55 | 2,52 | 2,71  | 6,86  | -    |
| min.             | 40,20 | 2,14 | 0,58  | 0,76  | 0,28 |
| maks.            | 99,75 | 2,71 | 20,78 | 20,37 | 9,78 |
| $\bar{X}$        | 67,33 | 2,43 | 5,87  | 10,07 | 2,03 |
| $\sigma$         | 11,42 | 0,12 | 3,76  | 4,31  | 1,58 |
| $C_v = \sigma/X$ | 0,17  | 0,05 | 0,64  | 0,43  | 0,78 |

Napomena:  $\bar{X}$  -srednja vrijednost,  $\sigma$  - standardna devijacija,  $C_v$  - koeficijent varijacije

### 3.3. Analiza trajnosti meke stijene

Kako su uzroci rastrošbe vrlo različiti, trenutno ne postoji jedna mjerena veličina kojom bi se mogao obuhvatiti njihov cjelokupni opis, kao niti poopćenje na sve vrste mekih stijena. Mnogi autori uveli su različite pokuse te ih se generalno može podijeliti na statičke i dinamičke pokuse. Primjer statičkog pokusa je tzv. "Jar slake test" kojeg je osmislio i unaprijedio Santi [114]. Glavna mana statičkih pokusa je što su rezultati uglavnom opisni i ne vrednuju brožani stupanj podložnosti rastrošbi. Iz navedenog razloga u geotehničkim krugovima popularniji su dinamički pokusi kao što je Pokus trajnosti stijene (engl. "Slake durability test") te će se svi razmotreni indeksi trajnosti bazirati na varijantama ovog testa. Najčešće primjenjivani je Indeks trajnosti stijene  $I_d$  [26], dok će se u ovom radu derivirati nekoliko varijanti indeksa sa različitim brojem ponavljanja ciklusa, vremena vrtnje ili kombinacija istih.

Standardni indeks trajnosti stijene se određuje kao postotak ostatka suhe mase u odnosu na početnu masu, a nakon 10 minuta spore vrtnje u standardiziranom bubnju djelomično potopljenom u vodu (Slika 3.3.).



Slika 3.3. Presjek dinamičkog uređaja za određivanje indeksa trajnosti

Za normirano ispitivanje odabire se 10 odlomaka stijene, na način da je ukupna masa uzorka cca 500g. Odlomci trebaju biti približno oblika kocke, odnosno prilikom pripreme vrhovi uzorka trebaju biti zaobljeni. Nakon pripreme uzorak se smješta u standardizirani bubanj koji na vanjskom obodu ima sito s otvorima veličine 2 mm i suši se na temperaturi od 105°C do stalnosti mase (obično od 2 do 6 sati). Nakon sušenja bubanj s uzorkom se hladi i vaganjem utvrđuje masa suhog uzorka te se ugrađuje u posudu s nosačem bubnja, gdje je djelomično uronjen u vodu. Bubanj se vrti brzinom od 200 okretaja u minuti tijekom 10 minuta. Nakon vrtnje bubanj s uzorkom se suši i određuje masa preostalog uzorka. Postupak se može ponavljati po potrebi sve do potpunog gubitka mase. Također, može se varirati samo s vremenom trajanja ciklusa te kombinirano i s brojem ciklusa i vremenom trajanja.

### 3.3.1. Indeks trajnosti

Prethodno navedeni postupak se ponavlja željeni broj ciklusa ( $n$ ) te se indeks trajnosti  $I_{dn}$  nakon odabranog broja ciklusa izračunava prema (3.1):

$$I_{dn} = \frac{m_n}{m_0} \cdot 100 [\%] \quad (3.1)$$

gdje su:  $m_0$  – masa uzorka na početku pokusa i  $m_n$  – masa uzorka nakon  $n$ -tog ciklusa.

Prema Gamble-u [118] najbolji pokazatelj trajnosti kod većine stijena je indeks nakon dobiven nakon dva ciklusa vrtnje -  $I_{d2}$ . U tablici 3.3. prikazan je prijedlog razredbe na temelju  $I_{d2}$ . Pritom je moguće primjetiti da manje vrijednosti indeksa ukazuju na mekše - nisko postojeane stijene, dok veće vrijednosti indeksa ukazuju na tvrđe - postojanije stijene.

Tablica 3.3. Gamble-ova razredba na temelju  $I_{d2}$

| grupa stijene             | $I_{d2}$ (%) |
|---------------------------|--------------|
| izrazito visoko postojana | > 98         |
| visoko postojana          | 95 - 98      |
| srednje visoko postojana  | 85 - 95      |
| srednje postojana         | 60 - 85      |
| nisko postojana           | 30 - 60      |
| vrlo nisko postojana      | < 30         |

Međutim, trenutnim istraživanjima potvrđena je sumnja da ovako predložena razredba nije pogodna za sve vrste mekih stijena te se pojavila potreba za izmjenama ili dodatnim kriterijima. Jedan od načina je povećanje broja ciklusa na četiri ili više, pritom uzimajući jednu ili više vrijednosti kao mjerodavne [46]. Drugi način je produženje trajanja uz zadržavanje samo jednog ciklusa vrtnje, prema [53] najpovoljnije je odabrati 10, 25, 60 i 120 minuta. U ovom slučaju indeks trajnosti se izračunava u ovisnosti o vremenu trajanja prema (3.2):

$$SDI_{(vrijeme)} = \frac{m_{(vrijeme)}}{m_0} \times 100 [\%] \quad (3.2)$$

gdje su:  $m_0$  – masa uzorka na početku pokusa i  $m_{(vrijeme)}$  – masa uzorka nakon ciklusa vrtnje za zadano vrijeme vrtnje (npr.  $m_{60}$  je masa uzorka nakon ciklusa od 60 min).

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



Kao dodatni kriterij u ovom radu se koristi vizualni pregled ostatka u bubnju nakon dva ili četiri ciklusa vrtnje (prema ASTM, D4644-04, 2004) pojašnjen u tablici 3.4. i prikazan na slici 3.4.

Tablica 3.4. Prijedlog vizualne kategorizacije uzoraka nakon izvršena dva ciklusa vrtnje.

| Tip degradacije | Opis                                                                                                                                                                                          |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I               | Nakon dva ciklusa vrtnje uzorak je gotovo nepromijenjen (početnih 10 komada), s eventualno malo sitnih komadića (ukupno 10-15) i s visokom vrijednosti indeksa trajnosti $I_{d4}$ ( $>95\%$ ) |
| II              | Nakon dva ciklusa dio uzorka se značajno usitnio (ukupno 15-50 komadića) dok dio većih početnih komada ostaje nepromijenjen                                                                   |
| III             | Nakon dva ciklusa uzorak sadrži samo sitne komadiće (više od cca 200), svi početni komadi su u potpunosti usitnjeni                                                                           |



(a) Tip I



(b) Tip II



(c) Tip III

Slika 3.4. Primjer ostatka nakon četvrtog ciklusa vrtnje za tri tipa lapora: (a) Tip I; (b) Tip II; (c) Tip III

### 3.3.2. Modificirani indeks trajnosti

Ukoliko se usporede rezultati SDI-ja za različita trajanja pokusa, može se uočiti da je ostatak mase uzorka u uređaju za pojedini vremenski ciklus u funkcijskoj vezi s ostatkom nakon standardnog 10 minutnog testa. Štoviše, intezitet gubitka mase je obrnuto proporcionalan ostatku nakon 10 minutnog pokusa te se može zapisati na sljedeći način:

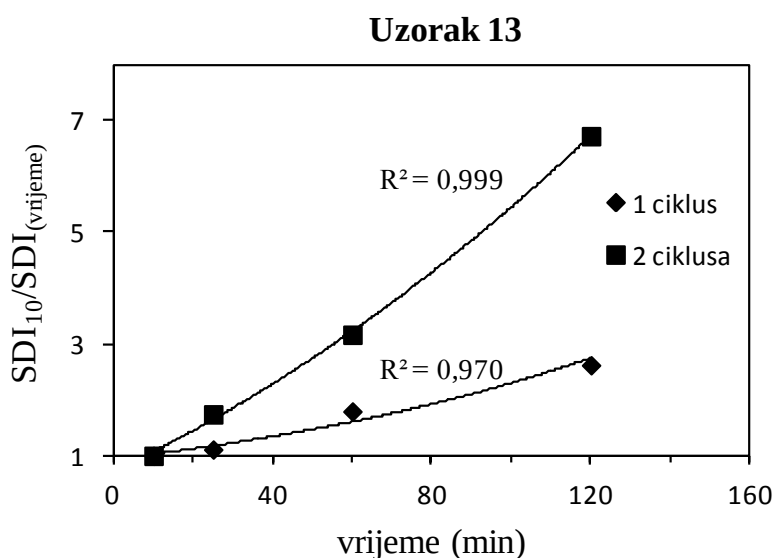
$$\frac{SDI_{10}}{SDI_{(vrijeme)}} = \frac{m_{10}}{m_{(vrijeme)}} \quad (3.3)$$

gdje su:  $m_{10}$  – masa suhog uzorka nakon 10 minutnog ciklusa; i  $m_{(vrijeme)}$  – masa suhog uzorka nakon ciklusa vrtnje za zadano promatrano vrijeme vrtnje.

Odnos  $SDI_{10}/SDI_{(vrijeme)}$  predstavlja količinu materijala koji je rastrošen u promatranom vremenskom ciklusu vrtnje te je jedinstven za pojedini uzorak obrađen u ovom radu. Kad se omjer  $SDI_{10}/SDI_{(vrijeme)}$  prikaže na vremenskoj skali može se primijetiti da je stupanj zakrivljenosti regresijske krivulje različit za svaki materijal, ali i još važnije, stupanj zakrivljenosti se povećava u funkciji smanjenja trajnosti stijene [52]. Dakle, pomoću regresijske analize odnos između gore navedenih vrijednosti može se opisati sljedećom logaritamskom funkcijom:

$$\log\left(\frac{SDI_{10}}{SDI_{(vrijeme)}}\right) = LSI(t - 10) \quad (3.4)$$

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



Slika 3.5. Odnos između  $SDI_{10}/SDI_{(vrijeme)}$  i trajanja ciklusa za uzorak 13. Prikazani su rezultati za 1 i 2 ponavljanja ciklusa vrtnje.

Ukoliko se rezultati iscrtaju u polulogaritamskoj skali, LSI predstavlja nagib linije koja prolazi kroz točku (10,0). Za razliku od SDI indeksa koji je izražen na skali od 0 do 100 gdje nisko postojani materijali preuzimaju manje vrijednosti, a visoko postojani veće, u ovom slučaju visoko postojani materijali uzimaju vrijednosti manje vrijednosti (teže prema nuli), dok nisko postojani materijali preuzimaju veće vrijednosti. Posebnost ovakvog iskaza je u tome što je rezultat prikazan u razlikama koje se broje u redu veličina (od 0.001 do 10) te su kao takve razumljivije i jednostavnije ih je interpretirati. Nažalost, bez obzira na relativno velik broj uzoraka korištenih u ovom radu (30 za LSI pokus), to još uvijek nije dovoljan broj uzoraka za prijedlog potpune razredbe kao što je Gambleova (Tablica 3.3.), budući osim lapora s područja Dalmacije nisu uključeni i drugi tipovi mekih stijena. U tablicama 3.5. i 3.6. prikazani su svi rezultati analiza trajnosti za uzorke 1 - 70.

Tablica 3.5. Rezultati laboratorijskih ispitivanja trajnosti mekih stijena za uzorke 1-30. (Napomena: LSI i SDI indeksi izračunati su nakon dva ciklusa vrtnje.)

| Oznaka uzorka | Udio karbonata (%) | Tip | Id <sub>4</sub> (%) | Id <sub>2</sub> =SDI <sub>10</sub> (%) | SDI <sub>25</sub> (%) | SDI <sub>60</sub> (%) | SDI <sub>120</sub> (%) | LSI   | SDI <sub>10</sub> /SDI <sub>60</sub> -1 |
|---------------|--------------------|-----|---------------------|----------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------|-----------------------------------------|
| 1             | 63,18              | III | 46,76               | 78,80                                  | 57,42                 | 37,82                 | 16,80                  | 0,619 | 1,084                                   |
| 2             | 46,03              | III | 33,60               | 73,79                                  | 53,86                 | 13,99                 | 5,08                   | 1,120 | 4,275                                   |
| 3             | 74,20              | I   | 97,41               | 98,51                                  | 97,11                 | 94,59                 | 89,82                  | 0,036 | 0,041                                   |
| 4             | 76,52              | I   | 97,68               | 98,61                                  | 97,38                 | 95,06                 | 90,21                  | 0,035 | 0,037                                   |
| 5             | 87,40              | I   | 98,33               | 99,09                                  | 97,96                 | 95,27                 | 93,36                  | 0,025 | 0,040                                   |
| 6             | 89,41              | I   | 97,88               | 98,71                                  | 97,49                 | 94,63                 | 90,04                  | 0,036 | 0,043                                   |
| 7             | 69,57              | III | 72,05               | 88,62                                  | 68,84                 | 44,50                 | 32,28                  | 0,609 | 0,991                                   |
| 8             | 54,62              | II  | 98,02               | 98,77                                  | 97,26                 | 92,91                 | 89,13                  | 0,092 | 0,063                                   |
| 9             | 60,18              | II  | 93,69               | 95,86                                  | 91,47                 | 81,30                 | 70,07                  | 0,124 | 0,179                                   |
| 10            | 77,23              | I   | 98,36               | 98,94                                  | 97,81                 | 95,78                 | 91,97                  | 0,029 | 0,033                                   |
| 11            | 76,30              | I   | 98,18               | 98,93                                  | 97,69                 | 94,83                 | 88,10                  | 0,044 | 0,043                                   |
| 12            | 67,70              | II  | 94,34               | 96,95                                  | 91,73                 | 84,38                 | 67,75                  | 0,124 | 0,149                                   |
| 13            | 56,53              | III | 73,26               | 90,86                                  | 52,14                 | 28,67                 | 13,51                  | 1,002 | 2,169                                   |
| 14            | 59,33              | II  | 90,73               | 95,45                                  | 85,09                 | 79,20                 | 84,20                  | 0,162 | 0,205                                   |
| 15            | 75,91              | I   | 97,54               | 98,67                                  | 97,36                 | 93,73                 | 89,33                  | 0,044 | 0,053                                   |
| 16            | 47,90              | II  | 94,80               | 96,84                                  | 92,43                 | 83,54                 | 63,30                  | 0,167 | 0,159                                   |
| 17            | 51,60              | II  | 95,84               | 97,43                                  | 95,26                 | 87,72                 | 75,37                  | 0,099 | 0,111                                   |
| 18            | 40,20              | III | 97,23               | 98,18                                  | 58,47                 | 50,80                 | 43,47                  | 1,501 | 0,933                                   |
| 19            | 51,80              | II  | 94,01               | 96,66                                  | 92,72                 | 83,79                 | 75,44                  | 0,082 | 0,154                                   |
| 20            | 65,60              | II  | 96,37               | 97,24                                  | 96,31                 | 91,88                 | 88,01                  | 0,089 | 0,058                                   |
| 21            | 65,00              | II  | 97,25               | 97,87                                  | 96,27                 | 92,57                 | 86,07                  | 0,050 | 0,057                                   |
| 22            | 58,80              | III | 84,25               | 91,76                                  | 78,86                 | 60,03                 | 25,89                  | 0,498 | 0,529                                   |
| 23            | 52,08              | III | 62,92               | 86,03                                  | 25,46                 | 37,68                 | 18,73                  | 0,622 | 1,283                                   |
| 24            | 66,49              | II  | 93,43               | 96,33                                  | 91,68                 | 84,32                 | 59,51                  | 0,177 | 0,143                                   |
| 25            | 78,63              | I   | 98,53               | 98,88                                  | 97,72                 | 96,14                 | 95,38                  | 0,016 | 0,028                                   |
| 26            | 74,13              | II  | 94,73               | 96,80                                  | 90,52                 | 77,61                 | 69,88                  | 0,140 | 0,247                                   |
| 27            | 79,77              | I   | 98,54               | 99,03                                  | 98,58                 | 96,92                 | 94,51                  | 0,018 | 0,022                                   |
| 28            | 73,45              | I   | 98,93               | 99,28                                  | 98,85                 | 97,57                 | 94,84                  | 0,017 | 0,018                                   |
| 29            | 68,66              | I   | 99,11               | 99,38                                  | 98,77                 | 98,15                 | 96,80                  | 0,011 | 0,013                                   |
| 30            | 91,77              | I   | 99,13               | 99,40                                  | 98,86                 | 97,64                 | 94,94                  | 0,018 | 0,018                                   |

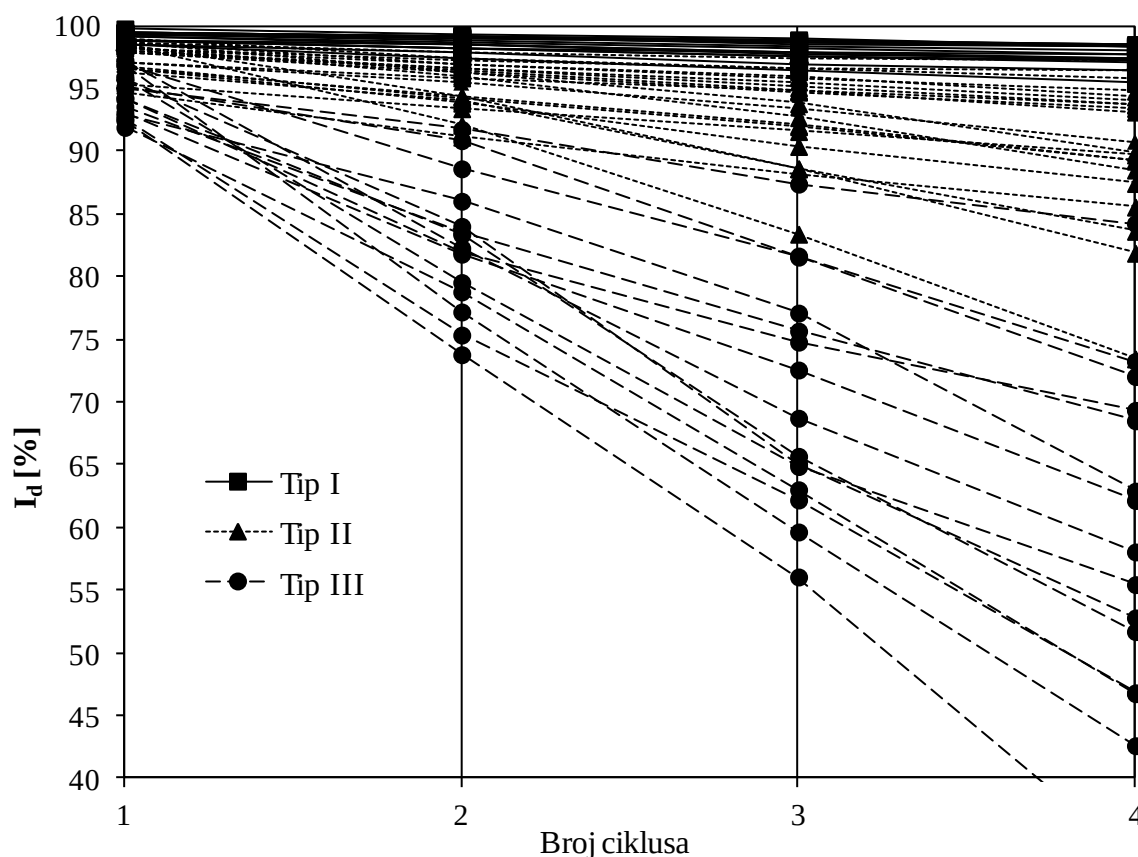
Tablica 3.6. Rezultati laboratorijskih ispitivanja trajnosti mekih stijena za uzorke 31-70, (Napomena: nije urađen LSI i SDI indeksi),

| Oznaka uzorka | Udio karbonata (%) | Tip | Id <sub>1</sub> (%) | Id <sub>2</sub> (%) | Id <sub>3</sub> (%) | Id <sub>4</sub> (%) | Id <sub>5</sub> (%) | Id <sub>6</sub> (%) |
|---------------|--------------------|-----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 31            | 71,42              | I   | 99,48               | 99,18               | 98,67               | 98,35               | 97,95               | 97,56               |
| 32            | 70,29              | I   | 98,87               | 98,52               | 97,88               | 97,46               | 96,97               | 96,48               |
| 33            | 66,92              | I   | 98,99               | 98,46               | 97,81               | 97,31               | 96,72               | 96,15               |
| 34            | 70,85              | I   | 99,41               | 99,17               | 98,78               | 98,45               | 98,13               | 97,80               |
| 35            | 78,16              | I   | 98,82               | 98,16               | 97,59               | 97,10               | 96,49               | 95,91               |
| 36            | 68,04              | II  | 98,04               | 96,45               | 94,79               | 93,14               | 91,51               | 89,88               |
| 37            | 69,17              | I   | 99,15               | 98,53               | 97,77               | 97,31               | 96,62               | 96,00               |
| 38            | 68,04              | II  | 96,59               | 93,84               | 90,39               | 87,44               | 84,34               | 81,25               |
| 39            | 71,42              | I   | 99,15               | 98,69               | 98,18               | 97,70               | 97,21               | 96,73               |
| 40            | 70,85              | I   | 98,57               | 97,78               | 96,99               | 96,38               | 95,59               | 94,85               |
| 41            | 63,82              | III | 92,59               | 75,36               | 62,21               | 46,84               | 31,64               | 16,60               |
| 42            | 59,18              | III | 93,10               | 81,81               | 72,57               | 62,16               | 51,90               | 41,70               |
| 43            | 58,70              | III | 94,24               | 81,97               | 74,79               | 69,36               | 59,64               | 51,45               |
| 44            | 57,03              | III | 97,19               | 82,29               | 68,73               | 58,07               | 43,83               | 30,74               |
| 45            | 58,14              | II  | 98,68               | 96,23               | 93,80               | 89,92               | 87,49               | 84,62               |
| 46            | 54,51              | III | 96,86               | 77,20               | 59,66               | 42,62               | 24,01               | 5,99                |
| 47            | 57,31              | II  | 98,42               | 92,10               | 83,40               | 73,45               | 65,94               | 57,58               |
| 48            | 58,00              | II  | 98,51               | 94,35               | 88,62               | 81,88               | 76,93               | 71,37               |
| 49            | 60,37              | III | 93,57               | 83,50               | 75,67               | 68,52               | 59,57               | 51,27               |
| 50            | 64,06              | II  | 97,87               | 96,59               | 95,08               | 93,72               | 92,32               | 90,93               |
| 51            | 68,59              | I   | 99,51               | 99,06               | 98,67               | 98,37               | 97,95               | 97,57               |
| 52            | 70,86              | I   | 98,43               | 97,31               | 96,36               | 95,42               | 94,39               | 93,39               |
| 53            | 67,46              | II  | 94,63               | 91,14               | 88,11               | 85,56               | 82,30               | 79,28               |
| 54            | 49,53              | II  | 95,28               | 93,41               | 91,58               | 89,71               | 87,86               | 86,01               |
| 55            | 51,84              | II  | 96,34               | 94,01               | 88,60               | 83,63               | 79,76               | 75,41               |
| 56            | 71,42              | I   | 98,79               | 98,21               | 97,54               | 97,22               | 96,59               | 96,05               |
| 57            | 74,88              | I   | 98,87               | 98,44               | 97,93               | 97,70               | 97,23               | 96,82               |
| 58            | 73,72              | I   | 99,49               | 99,08               | 98,57               | 98,29               | 97,83               | 97,42               |
| 59            | 80,64              | I   | 99,29               | 98,99               | 98,60               | 98,43               | 98,09               | 97,79               |
| 60            | 57,25              | II  | 96,73               | 94,20               | 91,97               | 89,33               | 86,95               | 84,51               |
| 61            | 56,67              | II  | 96,66               | 94,38               | 92,07               | 89,22               | 86,93               | 84,47               |
| 62            | 49,15              | III | 94,26               | 83,36               | 65,69               | 51,71               | 37,43               | 22,90               |
| 63            | 49,73              | III | 95,82               | 84,03               | 65,10               | 52,81               | 37,45               | 22,65               |
| 64            | 68,45              | III | 95,76               | 79,55               | 64,88               | 55,46               | 40,02               | 26,46               |
| 65            | 62,60              | III | 91,77               | 77,21               | 63,49               | 51,94               | 37,80               | 24,47               |
| 66            | 71,96              | I   | 99,37               | 99,08               | 98,84               | 98,53               | 98,27               | 97,99               |
| 67            | 74,89              | I   | 99,35               | 99,00               | 98,70               | 98,42               | 98,10               | 97,79               |
| 68            | 80,15              | I   | 99,77               | 99,29               | 98,90               | 98,42               | 97,98               | 97,54               |
| 69            | 62,02              | II  | 98,38               | 96,01               | 92,69               | 88,51               | 85,67               | 82,38               |
| 70            | 76,06              | I   | 99,44               | 99,10               | 98,75               | 98,40               | 98,06               | 97,71               |

Napomena: na uzorcima 71-93 nisu urađena laboratorijska ispitivanja trajnosti,

### 3.3.3. Usporedba rezultata

Prema Gamble-u [118] uz  $I_{d2}$  poželjno je koristiti indekse za veći broj ciklusa vrtnje. Ovisno o čimbenicima kao što su poroznost, propusnost i mineraloški sastav, učinci rastrošbe se ponekad neće pokazati unutar dva ciklusa vrtnje. Iz tog razloga prvi pristup u analizi trajnosti je upotreba najmanje 4 ciklusa vrtnje na svakom uzorku. Na slici 3.6. prikazani su rezultati za prva četiri ciklusa vrtnje na uzorcima 1-70.



Slika 3.6. Odnos između indeksa trajnosti  $I_d$  i broja ponavljanja ciklusa vrtnje.

Rezultati prikazani na slici 3.6. ne mogu se koristiti kako bi donijeli nove zaključke o trajnosti ispitanih uzoraka, bez uvođenja dodatnog kriterija.

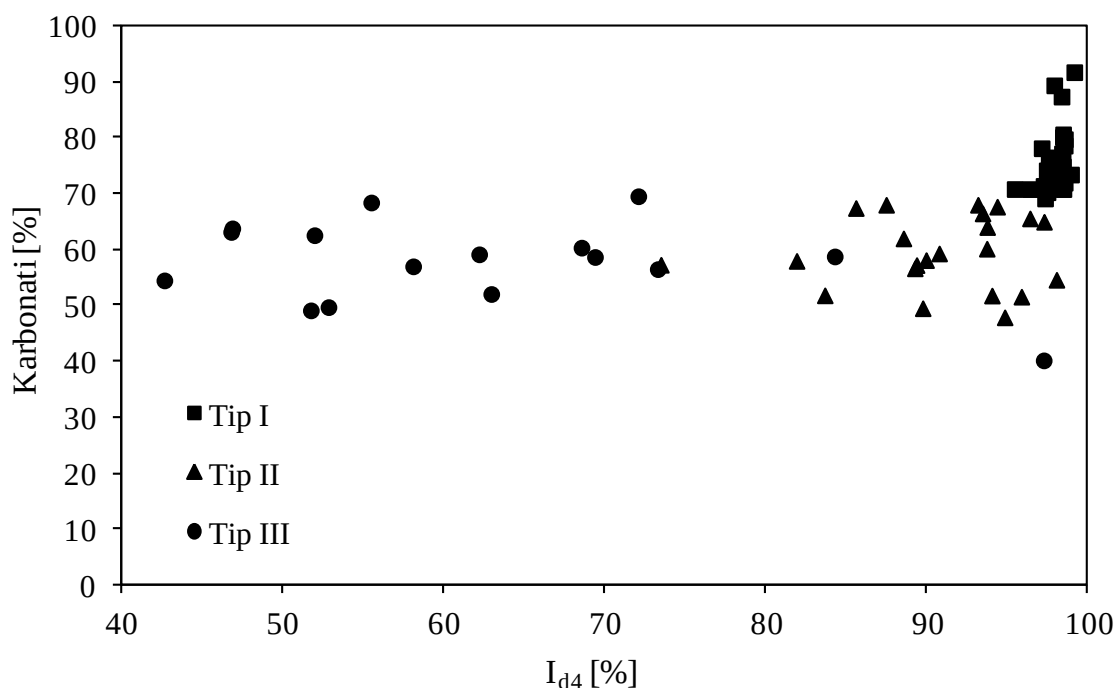
Na slici 3.4. prikazana je fotografija uzorka za tri navedena tipa degradacije lapora. Zanimljivo je primjetiti da su svi analizirani uzorci u ovom radu bili klasificirani kao isti Tip degradacije nakon dva i četiri ciklusa vrtnje.

Prema Gamble-ovoj klasifikaciji (Tablica 3.3.) uzorci Tipa I su klasificirani kao visoko do izrazito visoko postojani, što i odgovara vizualnom pregledu (Slika 3.4.a). Uzorci Tipa II imaju vrijednosti  $I_{d2}$  veće od cca 85% što ih prema Gamble-u čini srednje visoko postojane, dok je prema pregledu i stvarnom stanju stanje bliže srednje postojanom (Slika 3.4.b). Uzorci Tipa III

prema Gamble-u su u rasponu od srednje do srednje visoko postojana, dok je prema pregledu jasno da su, bez obzira na ostatak mase na situ, nisko postojani (Slika 3.4.c).

Površnim pregledom slike 3.4. i 3.6. moglo bi se zaključiti da je vrlo jednostavno odrediti tip uzorka na temelju vizualne procjene, budući su grupe relativno jasno razdvojene. Međutim, ta procjena nije jednoznačna i granice između pojedinih tipova nisu jasne pa su stoga podložne subjektivnoj procjeni ispitivača. Prema ASTM-u izvještaj ispitivanja mora sadržavati i fotografije uzoraka, što podrazumijeva potrebu za dodatnim kriterijima koji bi zamijenili vizualni pregled ostatka. U potrazi za jasnijim kriterijima izvršena je korelacija sa indeksnim pokusima predloženim u poglavlju 3.2.3.

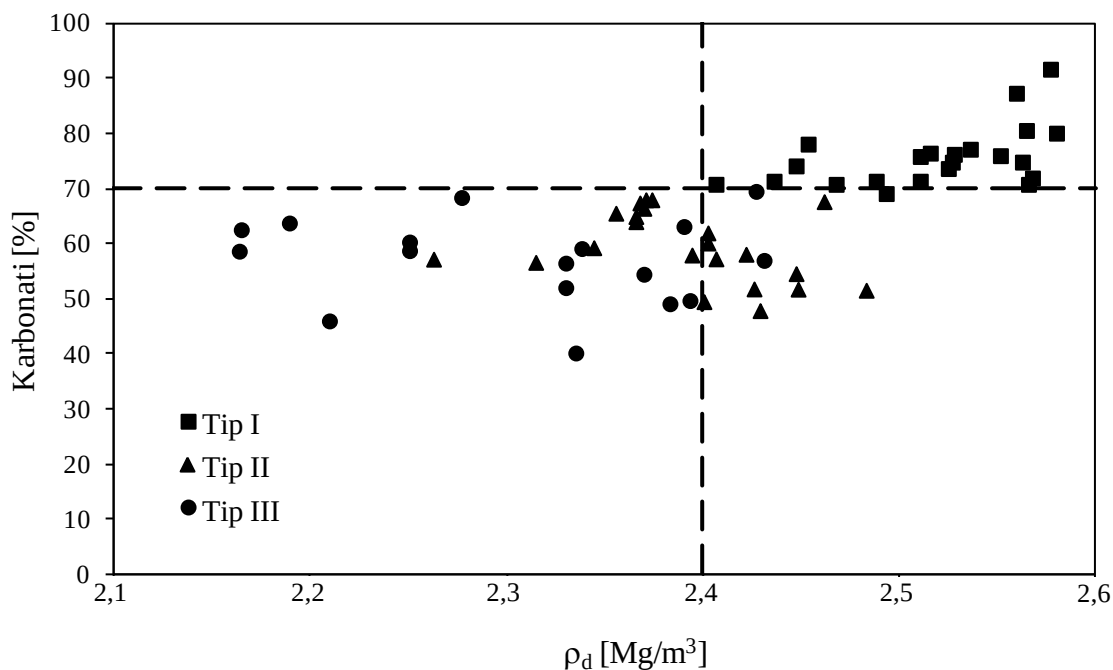
Visoke vrijednosti trajnosti obično se podudaraju s visokim udjelom karbonatnih minerala, dok je niža postojanost uglavnom svojstvo glinovitijih stijena. Na slici 3.7. prikazan je odnos udjela karbonata i indeksa trajnosti nakon 4 ciklusa vrtnje. Rezultati ne prikazuju smislene korelacije između trajnosti i sadržaja karbonata, međutim grupiranje uzoraka je očito, posebno za Tip I gdje se nameće granica od 70%  $\text{CaCO}_3$  pri odvajanju ove skupine od Tipa II i III.



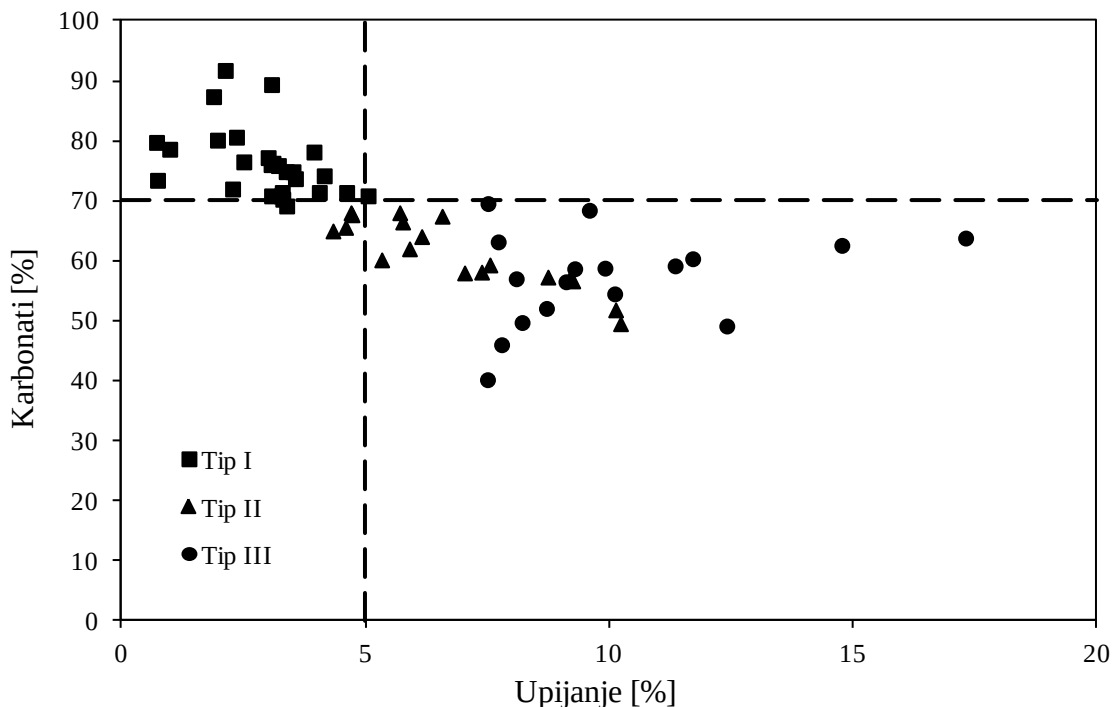
Slika 3.7. Odnos između udjela karbonata u stijeni i indeksa trajnosti nakon 4 ciklusa vrtnje

Na slici 3.8. prikazan je odnos udjela karbonata i suhe gustoće stijene, a na slici 3.9. udjela karbonata i upijanja vode. Može se primjetiti da su uzorci Tipa I sa sadržajem karbonata većim od

70%, suhe gustoće veće od  $2,4 \text{ Mg/m}^3$  i upijanja vode manjeg od 5%. Između Tipa II i Tipa III nema jasne granice upotrebom ovog kriterija.



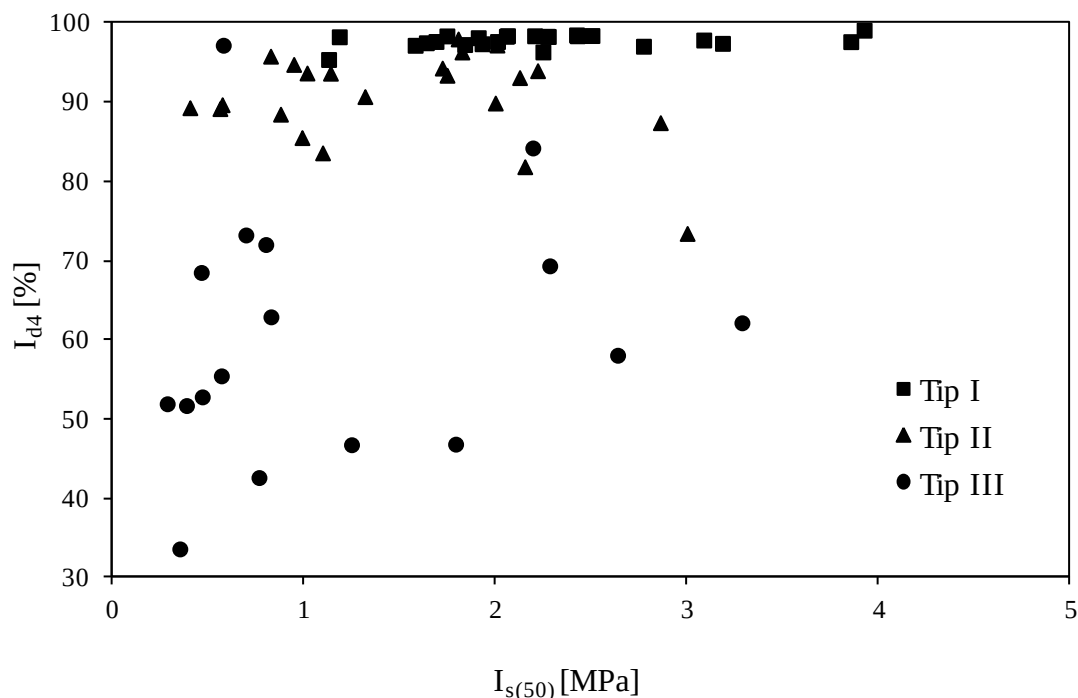
Slika 3.8. Odnos između udjela karbonata u stijeni i suhe gustoće stijene



Slika 3.9. Odnos između udjela karbonata u stijeni i upijanja vode

Iako je mnogo istraživanja u svijetu usmjereno k određivanju čvrstoće i trajnosti stijene, onih koja ih međusobno uspoređuju vrlo je malo. U mekim stijenama ih gotovo pa nema (npr.

[43]), posebice ne u laporima. U ovom radu upotrebljen je PLT test kao indeks čvrstoće. Nažalost, na 70 uzoraka meke stijene s područja dalmacije nije ustanovljena nikakva značajna korelacija između rezultata PLT-a i standardnog indeksa trajnosti  $I_{d4}$ , kao što se može vidjeti na slici 3.10.



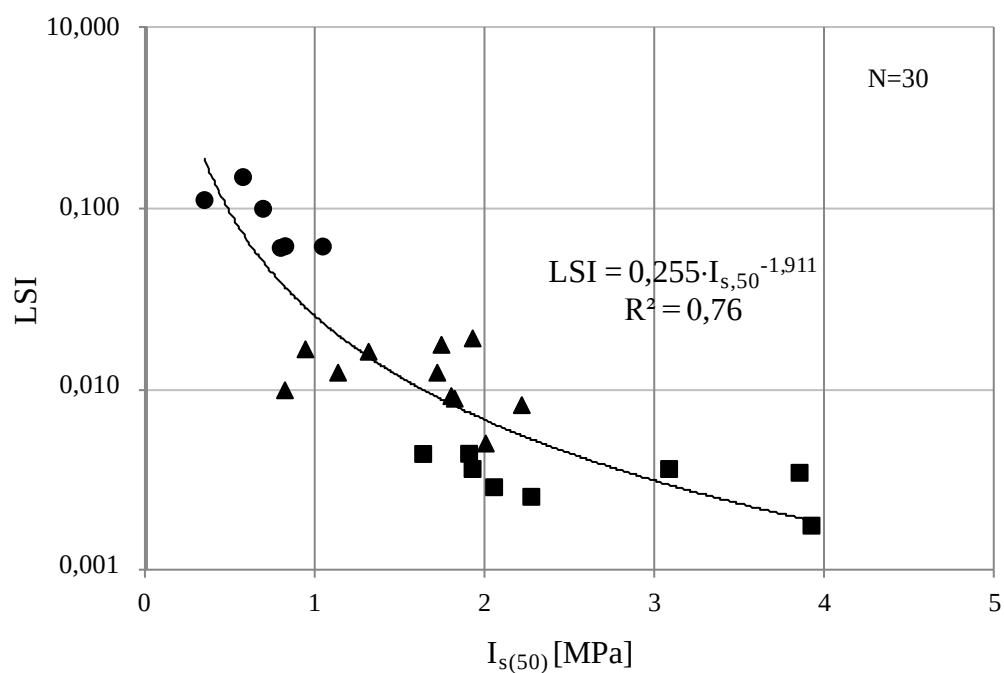
Slika 3.10. Odnos indeksa trajnosti nakon četiri ciklusa vrtnje i indeksa točkaste čvrstoće

Iz tog razloga, ali i činjenice da na slikama 3.7.-3.10. nije utvrđena mjerljiva granica između uzoraka Tipa II i Tipa III uveden je modificirani indeks trajnosti LSI prikazan u poglavlju 3.3.2. Analiza je urađena na 30 uzoraka s rezultatima prikazanim u tablici 3.5.

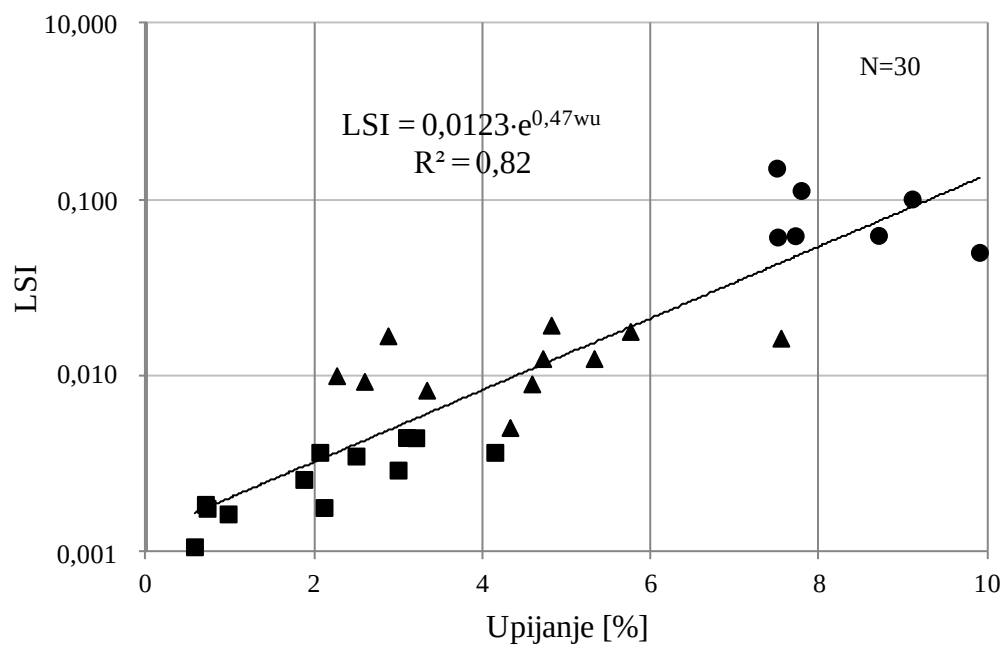
Počevši od usporedbe s indeksom točkaste čvrstoće, LSI pokazuje mogućnost koreliranja trajnosti s parametrima čvrstoće (Slika 3.11.). Iako je veza relativno slaba ( $R^2=0,76$ ) imajući u vidu preciznost provedbe PLT testa ovaj rezultat ohrabruje te motivira na daljnja istraživanja u smjeru povezivanja drugih preciznijih ispitivanja čvrstoće lapora (npr. jednoosnu tlačnu čvrstoću) s ispitivanjem trajnosti materijala putem LSI indeksa.

Već je prethodno spomenuto da brzina pojava rastrošbe u standardnom 10-minutnom pokusu može ovisiti o čimbenicima kao što su poroznost, propusnost i mineraloški sastav te se učinci rastrošbe možda i neće pokazati unutar dva ciklusa vrtnje. Čak i ako se poveća broj ciklusa vrtnje u konačnici nema suvisle funkcionalne veze između indeksa  $I_{dn}$  i navedenih parametara. S druge strane u usporedbi s LSI-em poroznost (Slika 3.12.) i upijanje (Slika 3.13.) ukazuju na značajnu vezu s koeficijentom determinacije  $R^2=0,82$  odnosno  $R^2=0,86$ .

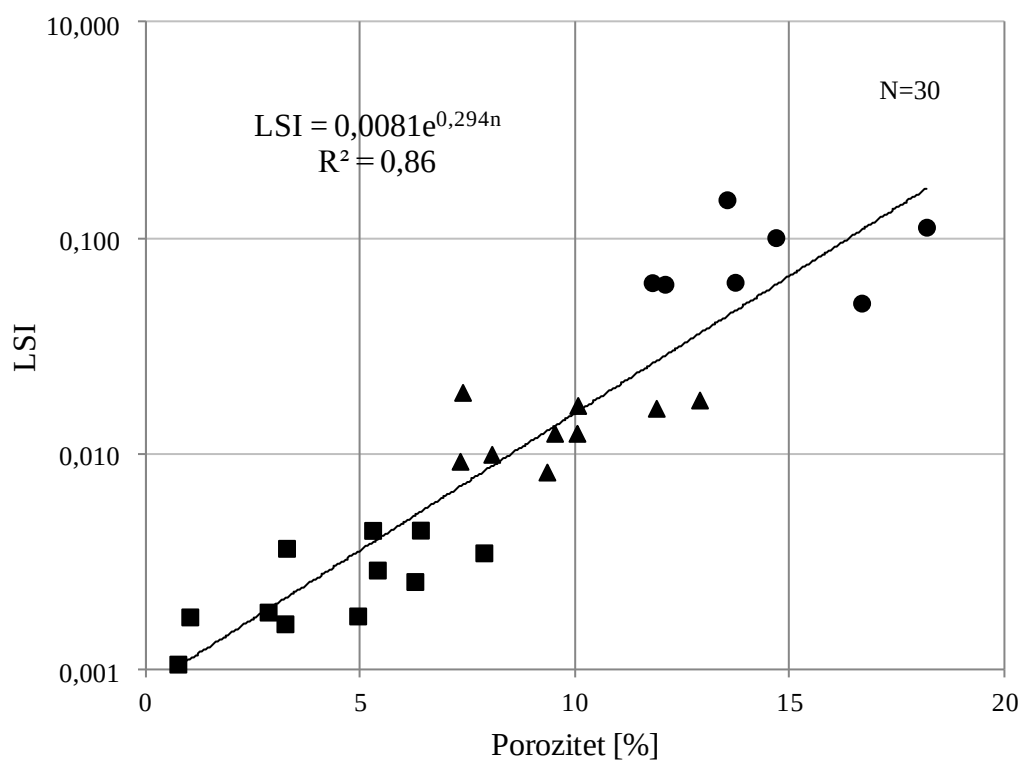




Slika 3.11. Odnos modificiranog indeksa trajnosti nakon dva ciklusa vrtnje LSI i indeksa točkaste čvrstoće  $I_{s,50}$

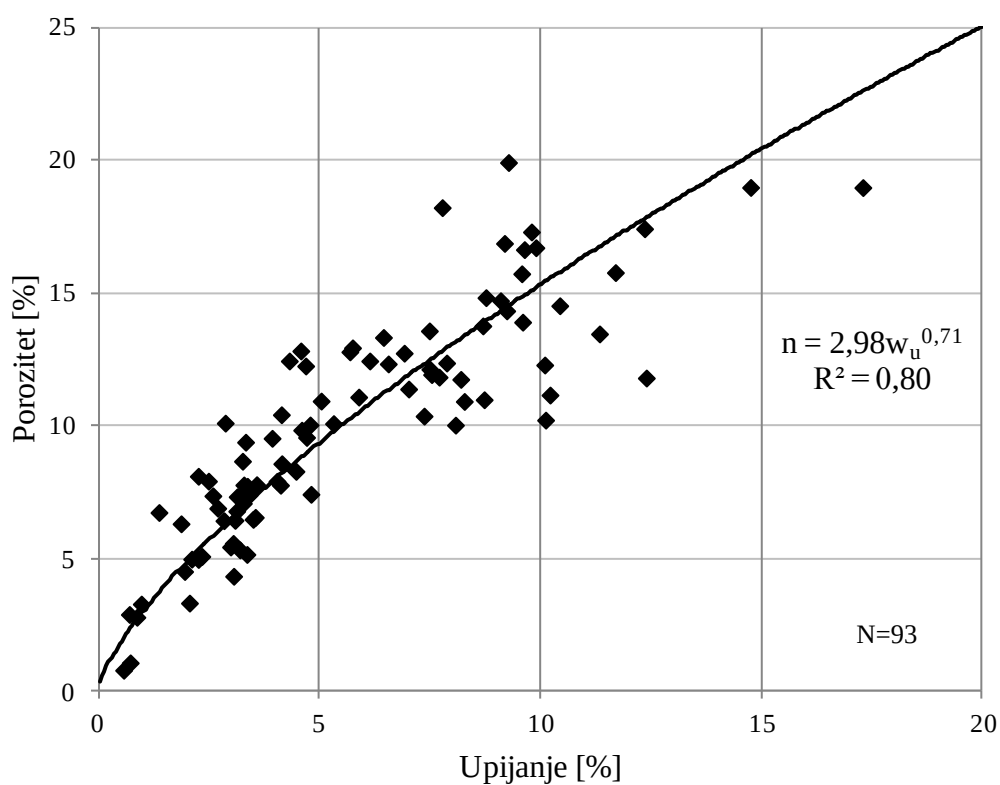


Slika 3.12. Odnos modificiranog indeksa trajnosti nakon dva ciklusa vrtnje LSI i upijanja  $w_u$



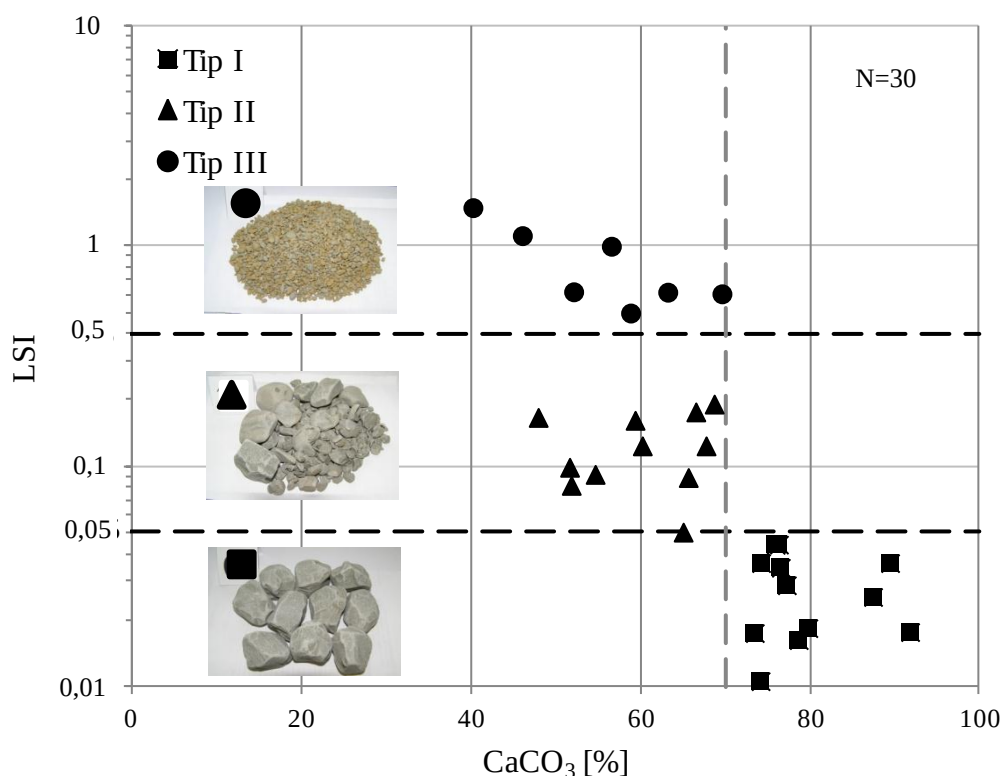
Slika 3.13. Odnos modificiranog indeksa trajnosti nakon dva ciklusa vrtnje LSI i poroziteta  $n$

Dijagrami sa slike 3.12. i 3.13. navode na moguću vezu između upijanja i poroziteta koja je potvrđena na slici 3.14. s relativno visokim koeficijentom determinacije od  $R^2=0,80$ .



Slika 3.14. Odnos poroziteta  $n$  i upijanja  $w_u$

Iako je prvotna ideja upotrebe modificiranog indeksa trajnosti bila potražiti njegovu funkcijsku ovisnost s nekim od indeksnih svojstava meke stijene, u prvom redu mineraloškim sastavom (najpoželjnije s jednostavnim pokusom kalcimetrije), pokazalo se da složene odnose između udjela glina i njihovog veziva (u ovom slučaju najviše  $\text{CaCO}_3$ ) nije moguće jednostavno opisati. Bez obzira na to, rezultat ovog pokusa je polučio uspjeh u određivanju granice između različitih tipova meke stijene, kao što se može vidjeti na slici 3.15.



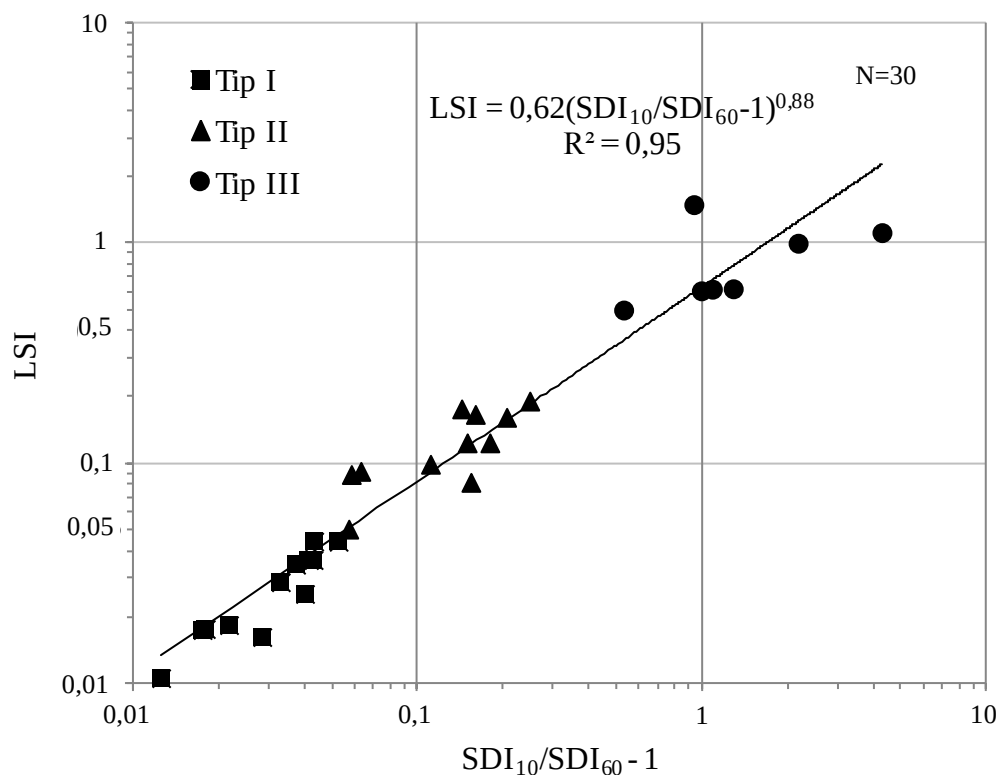
Slika 3.15. Odnos modificiranog indeksa trajnosti nakon dva ciklusa vrtnje LSI i udjela karbonata u stijeni

Logaritamska skala na kojoj je prikazan LSI jasno ukazuje da su rezultati na uzorcima Tipa I u redu veličina  $10^{-2}$ , Tipa II u redu veličina  $10^{-1}$  i Tipa III u redu veličina  $10^0$ . Na uzorku veličine  $N=30$  granice su postavljena na 0,05 između Tipa I i Tipa II, te 0,5 između Tipa II i Tipa III. Pritom valja uočiti da je granica koja odvaja Tip I, od 70%  $\text{CaCO}_3$  utvrđena i prethodnim istraživanjem i u ovom slučaju aktualna.

Kao glavnu manu LSI-a može se navesti povećanu količinu potrebnog uzorka. Naime, budući se pokus provodi sa četiri različita trajanja ciklusa potrebno je četiri puta više uzorka nego za standardno ispitivanje, što kod ograničenih istražnih radova može predstavljati problem. S

druge strane u pokus se može provesti u okviru 3 radna dana, dok je za npr.  $I_{d4}$  potrebno 5 radnih dana te pritom ne polučuje zadovoljavajuće rezultate.

Ukoliko količina uzorka ne dopušta izvođenje svih vremenskih ciklusa (10, 25, 60 i 120 min), potrebno je provesti najmanje dva (uz standardni 10 minutni, autor predlaže 60 minutni ciklus). Na slici 3.16. prikazana je usporedba LSI indeksa i indeksa  $SDI_{10}/SDI_{60}-1$ , oba određena nakon dva ciklusa vrtnje.



Slika 3.16. Odnos modificiranog indeksa trajnosti nakon dva ciklusa vrtnje LSI i  $SDI_{10}/SDI_{60}-1$

### 3.4. Posmična čvrstoća meke stijene

Najčešće korišteni postupak za određivanje posmične čvrstoće stijene je postupak direktnim smicanjem. Prema napatku ISRM-a [15] postupak se provodi na neporemećenim uzorcima stijene pomoću prijenosnog uređaja za direktno smicanje. Međutim, za meke stijene uočena je podložnost smanjenju posmične čvrstoće nakon što je stijena izložena atmosferskim uvjetima. Glavni uzrok tog smanjenja je raspadanje stijene uslijed rastrošbe, odnosno njenog dominantnog utjecaja u mediteranskom području: vlaženja i sušenja stijene. U svrhu određivanja stupnja raspadanja predlaže se postupak simulacije tog procesa u laboratorijskim uvjetima, te modificirani postupak smicanja pri različitim stupnjevima raspadanja uzoraka.

Lapor s prirodnom vlažnošću neposredno nakon iskopa ima posmičnu čvrstoću koja odgovara veličini koju prema klasifikacijama imaju meke stijene. Kao primjeri reda veličine vrijednosti posmične čvrstoće, u tablici 3.7. prikazani su rezultati ispitivanja uzoraka lapora sa šireg područja Splita.

Tablica 3.7. Primjeri mjerenih vrijednosti posmične čvrstoće uzoraka lapora sa šireg područja Splita.

| Udio karbonata (%) | Vlažnost pri ispitivanju (%) | $I_{d2}$ (%) | $c$ (MPa) | $\varphi$ (°) | Normalno naprezanje pri ispitivanju (MPa) | Napomena                                                        |
|--------------------|------------------------------|--------------|-----------|---------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 44,44              | 5,48                         | 89,7         | 1,36      | 29,7          | 0,5–5,0                                   | Kompaktan uzorak izvađen između slojnih pukotina                |
| 51,35              | 2,41                         | 73,4         | 1,24      | 20,1          | 0,5–5,0                                   | (=) Smicanje po međuslojnoj pukotini                            |
| 51,35              | 2,41                         | 73,4         | 1,00      | 35,4          | 0,5–5,0                                   | (  ) Smicanje okomito na međuslojne pukotine                    |
| 54,63              | 5,05                         | 76,0         | 3,89      | 29,6          | 1,0–7,5                                   | Kompaktan uzorak izvađen između slojnih pukotina                |
| 59,68              | 1,82                         | 84,4         | 1,48      | 44,1          | 0,5–3,5                                   | (=) Smicanje po međuslojnoj pukotini                            |
| 59,68              | 1,91                         | 87,8         | 1,45      | 30,9          | 0,5–3,5                                   | (  ) Smicanje okomito na međuslojne pukotine                    |
| 58,12              | 6,25                         | 96,4         | 1,93      | 31,9          | 0,5–6,0                                   | (=) Smicanje po međuslojnoj pukotini                            |
| 58,12              | 6,25                         | 96,4         | 1,72      | 41,9          | 0,5–3,5                                   | (  ) Smicanje okomito na međuslojne pukotine                    |
| 69,87              | 4,25                         | 98,6         | 6,33      | 40,0          | 1,5–7,0                                   | Kompaktan uzorak izvađen između slojnih pukotina                |
| 71,59              | 5,71                         | 98,7         | 5,50      | 40,9          | 1,5–7,5                                   | Kompaktan uzorak izvađen između slojnih pukotina                |
| 45,02              | Saturated                    | N/A          | 0,014     | 25,9          | 0,1–0,8                                   | Laporovita glina (ispitano na uređaju za direktno smicanje tla) |

Ispitivanja su provedena na uzorcima s prirodnom vlažnošću na prijenosnom uređaju za direktno smicanje. Ispitivanja su izvršena na uzorcima izvađenim s površine, a koji su obrađeni piljenjem bez korištenja vode.

Prikazani su rezultati ispitivanja provedenih na kompaktnim uzorcima bez uočljivih međuslojnih pukotina (uzorci izvađeni između dvije međuslojne pukotine koji nisu sadržavali uočljive pukotine na svojoj površini) te rezultati ispitivanja uzoraka koji su sadržavali međuslojne pukotine (smicanje po međuslojnoj pukotini i okomito na međuslojne pukotine). Procjenu maksimalnog naprezanja okomitog na kliznu plohu izvršena je pomoću udjela karbonata, indeksa rastrošbe  $I_{d2}$  nakon drugog ciklusa ispitivanja i indeksa točkaste čvrstoće. Posmična čvrstoća analizirana je prema Mohr-Coulombovom kriteriju posmične čvrstoće (3.5):

$$\tau_f = c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (3.5)$$

pri čemu su:  $\tau_f$  – posmično naprezanja pri slomu;  $c$  – kohezija;  $\sigma_n$  – naprezanje okomito na kliznu plohu;  $\varphi$  – kut unutarnjeg trenja. Efektivna naprezanja su jednaka totalnim budući je porni pritisak  $u=0$  za vrijeme izvođenja pokusa.

Dobivene vrijednosti su prikazane s porastom udjela karbonatne sastavnice, koja predstavlja dominantnu, ali ne i jedinu, veličinu koja utječe na čvrstoću ovog materijala. To uostalom potvrđuju i dobivene vrijednosti posmične čvrstoće, koje ne rastu proporcionalno s porastom udjela karbonatne komponente. Raspon uspravnog pritiska na uzorku pri ispitivanju, prilagođen je čvrstoći uzoraka kako bi se dobilo što šire područje primjenjivosti dobivenih vrijednosti posmične čvrstoće.

Ako se analiziraju prikazani podaci s osvrtom na dobivene vrijednosti čvrstoća za smicanje okomito i usporedno s međuslojnim pukotinama, ne dobivaju se očekivani rezultati da je čvrstoća uzduž pukotina manja od čvrstoće u smjeru okomito na slojeve. Pregledom uzoraka nakon loma ustanovljeno je da se u takvim situacijama lom desio po sekundarnom sustavu pukotina koje su često gotovo okomite na slojeve, a koje se uočavaju po tamnije smeđoj skrami na njihovoj površini (slika 3.17.).

Prikazani su rezultati mjerenja za uzorke lapora s udjelom karbonatne sastavnice do približno 70%. U pravilu, s povećanjem udjela karbonata u ovim materijalima se povećava čvrstoća, a smanjuje podložnost rastrošbi. Po principu najslabije karike u lancu, prikazani su rezultati ispitivanja uzoraka s manjim udjelom karbonata. Oni su relevantniji za analize stabilnosti kosina iskopanih u naslazi fliša u kojoj su lapori pretežno dominantna komponenta.

U tablici 3.7. je prikazan i rezultat smicanja laporovite gline, koja se javlja kao pokrovni sloj naslage fliša, a predstavlja potpuno rastrošeni osnovni materijal. Rezultat je prikazan kao referentna veličina najmanje čvrstoće koju materijal ima na kraju procesa rastrošbe. Ispitivanje je izvršeno u uređaju za direktno smicanje tla za potpuno zasićeni uzorak.



Slika 3.17. Uzorak s tri međusobno gotovo okomita pukotinska sustava (1. i 3. - sekundarne pukotine; 2. - međuslojna pukotina). Na sekundarnim pukotinama uočava se tamno smeđa skrama.

Ako se s pomoću parametara posmične čvrstoće, izmjerenih za laporovitu glinu, izvede povratna analiza stabilnog pokosa građenog od laporovite gline, dobiveni nagibi imaju vrijednosti koje odgovaraju nagibima odloženog, rastrošenog materijala izmjerenim na terenu. Mjerenjima na terenu izmjeren je nagib pokosa deponiranog rastrošenog lapora na dnu kosina u rasponu  $\alpha = 31^\circ$  do  $38^\circ$ , [119] (primjer je prikazan na slici 3.18.). Rastrošeni materijal na dnu pokosa poprima oblik materijala sa svojstvima laporovite gline.



Slika 3.18. Izmjereni nagib pokosa deponiranog rastrošenog lapora na dnu kosina (strelica), u rasponu  $\alpha = 31^\circ$  do  $38^\circ$

Vrijednosti prikazane u tablici 3.7. pokazuju da neposredno nakon iskopa glinovite stijene (meke stijene) imaju čvrstoću koja omogućava da se i zasjeci relativno velikih visina mogu iskopati s dostatnom stabilnošću i s gotovo uspravnim pokosima. Međutim, iskustvo je pokazalo da tijekom korištenja tih konstrukcija dolazi do pojave klizanja i odrona. Klizanja su posljedica smanjenja čvrstoće uslijed djelovanja vanjskih utjecaja, i to kako širenja utjecaja rastrošbe od površine u unutrašnjost pokosa, tako i utjecaja rastrošbe kroz međuslojne i ostale pukotine. U ovom radu promjena čvrstoće prikazat će se na laporima iz naslage fliša na širem području Splita.

### 3.4.1. Laboratorijsko oponašanje rastrošbe

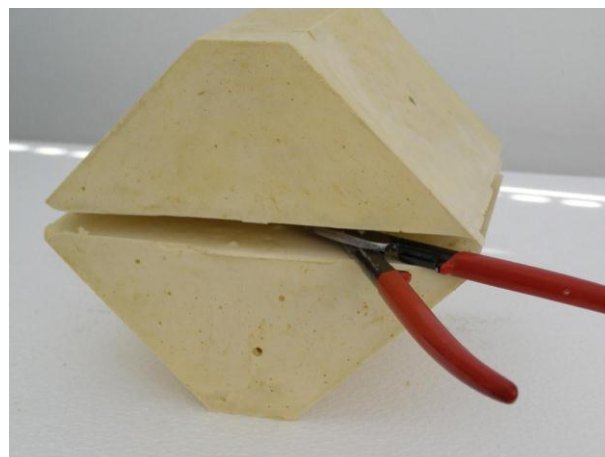
Iz procesa koji dovode do rastrošbe opisanih u poglavlju 2. može se zaključiti da bitan utjecaj na razvoj procesa, s posljedicom slabljenja svojstava ovog materijala, ima voda. Iz tog je razloga analiza smanjenja čvrstoće izvedena za utjecaj procesa sušenja i vlaženja.

Osnovni problem u takvoj analizi je to da se procesom rastrošbe, razvijenog kao posljedica intenzivnih promjena vlažnosti, ispitivani uzorak vrlo brzo raspadne [98]. Da bi se ispitivanje moglo provesti, primijenjen je postupak ispitivanja koji predstavlja preoblikovanje standardnog postupka ispitivanja posmične čvrstoće prijenosnim uređajem za direktno smicanje stijena.

Uzorci za ispitivanje su vađeni sa svježe iskopanih površina, te obrađeni piljenjem bez upotrebe vode kako bi se onemogućio proces dezintegracije prije ispitivanja. Uzorci su obrađeni na dimenzije približno 10 x 10 x 8 cm. Prije ugradnje u plaster za ispitivanje, uzorci su obavijeni metalnom mrežom koja se lako obavlja oko uzorka (slika 3.19.a.).



(a)



(b)

Slika 3.19. Priprema uzoraka za ispitivanje: a) uzorak obavljen mrežom prije ugradnje u plaster, b) primjer rezanja mreže ugrađenog uzorka u plaster za ispitivanje



Odabrana je mreža s otvorom oka od 2 mm. Pokusima je utvrđeno da kroz taj otvor plaster za ugradnju uzorka može prodrijeti do uzorka, a istovremeno je otvor dovoljno mali da se kod simuliranog procesa sušenja i vlaženja ne gubi znatna količina uzorka. Po unaprijed određenoj plohi smicanja kod uzorka ugrađenog u uređaj za direktno smicanje, mreža se reže neposredno prije ispitivanja (slika 3.19.b) kako bi se uklonio utjecaj čvrstoće mreže na rezultate ispitivanja.

Simulacija procesa rastrošbe u laboratoriju vrši se sušenjem i vlaženjem uzorka u ciklusima. Jedan ciklus se sastoji od sljedećih faza (Slika 3.20.):

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



(a)



(b)



(c)



(d)

*Slika 3.20.* Simulacija procesa rastrošbe u laboratoriju sušenjem i vlaženjem uzorka u ciklusima: a) sušenja uzorka u sušioniku 24 sata, b) hlađenje uzorka pri laboratorijskoj temperaturi zraka, c) uranjanja uzorka u vodu na 24 sata, d) nakon odabranog broja ponavljanja a-c i ugradnje uzorka u plaster za ispitivanje vrši se smicanje u prijenosnom uređaju za direktno smicanje

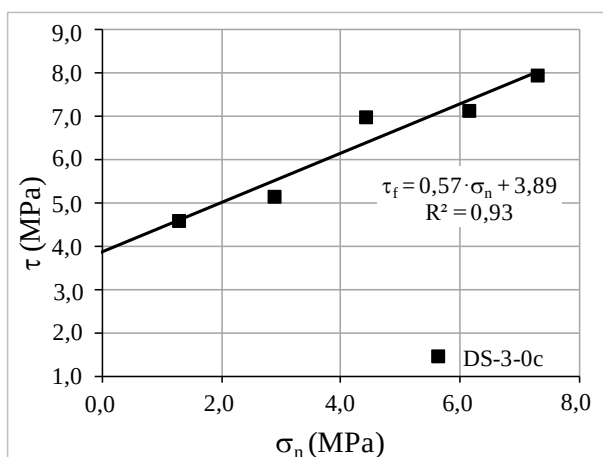
Nakon svakog ciklusa vrši se vaganje uzoraka i uspoređuje s početnom masom. Neke meke stijene se mogu toliko oslabiti ovim postupkom, da se nakon samo par ciklusa raspadnu u prašinasti materijal koji jednostavno prolazi kroz otvore mrežice. Stoga, gubitak mase zabilježen vaganjem nebi smio prelaziti 5% početne mase uzorka. Materijale koji imaju veći gubitak mase nije moguće testirati ovom metodom.

Broj ciklusa ovisi o vrsti materijala, odnosno o njegovoj podložnosti rastrošbi. U tu svrhu može se koristiti jednoosna tlačna čvrstoća materijala kao jedan od pokazatelja podložnosti rastrošbi, ali i kao mjerilo na temelju kojeg se utvrđuje raspon uspravnog opterećenja korištenog pri ispitivanju. Određivanje jednoosne tlačne čvrstoće je nepraktično za ove materijale te se za njenu procjenu u ovom radu koristi Indeks točkaste čvrstoće. Osim Indeksa točkaste čvrstoće, često se koristi i podatak o količini karbonata u stijeni.

Jedno ispitivanje sastoji se od 4 serije uzoraka, pritom svaka serija sadrži najmanje 5 ispitnih primjeraka. Prva serija se testira pri prirodnoj vlažnosti materijala, dok se kod svake sljedeće serije povećava broj ciklusa sušenja i vlaženja. Za lapore svrstane u Tip I koriste se dva, četiri, osam, pa i više ciklusa. Za Tip II pokazalo se dovoljnim (mogućim) primijeniti jedan, dva i tri ciklusa. Za Tip III ispitivanje na rastrošenim uzorcima nije moguće provesti u uređaju za direktno smicanje stijena, osim za granične slučajeve s većim udjelom karbonata. Za Tip III lapora preporučuje se upotreba uređaja za direktno smicanje tla [119] na uzorcima podvrgnutim laboratorijski simuliranom rastrošbom.

### **3.4.2. Rezultati**

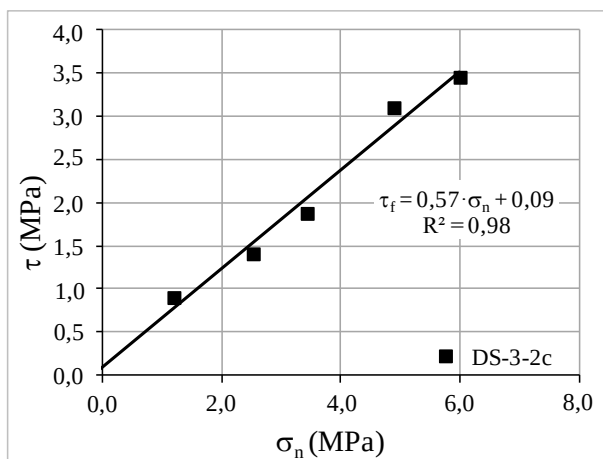
Ispitivanje čvrstoće je izvršeno na uzorcima nakon faze uranjanja u vodu (u vlažnom stanju) jer se na taj način dobivaju manje čvrstoće. Dobiveni rezultati parametara posmične čvrstoće izraženi prema Mohr-Coulombovom zakonu čvrstoće prikazani su u tablici 3.8., dok je primjer analize rezultata prikazan na slici 3.21. Parametri su određeni primjenom metode najmanjih kvadrata pomoću pravca kroz izmjerene vrijednosti posmičnog otpora pri lomu uzoraka iz serije. Odabir najvećeg broja ciklusa sušenje-vlaženje ovisio je o trenutku kada su se uzorci počeli u potpunosti raspadati, odnosno nije se mogla zadržati njihova cjelovitost ni uz pomoć korištenih mrežica. Veličina promjene prikazanih vrijednosti kohezije, koja nije konzistentna s brojem ciklusa ispitivanja, posljedica je točnosti korištenog mjernog uređaja, točnosti primijenjenog postupka interpolacije kroz dobivene rezultate te činjenice da iako su svi uzorci uzeti iz jednog sloja nisu nužno potpuno jednaki.



(a)



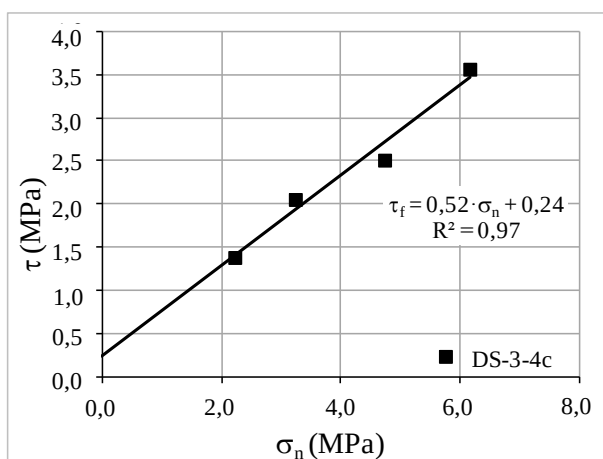
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Slika 3.21. Rezultati direktnog smicanja za uzorak DS-3, lokacija Trstenik, Split: a) za prirodnu vlažnost – 0 ciklusa, b) primjer plohe loma iz seta za prirodnu vlažnost, c) nakon dva ciklusa simulirane rastrošbe, d) primjer plohe loma iz seta nakon dva ciklusa simulirane rastrošbe, e) nakon četiri ciklusa simulirane rastrošbe, f) primjer plohe loma iz seta nakon četiri ciklusa simulirane rastrošbe

Tablica 3.8. Parametri posmične čvrstoće lapora u uvjetima laboratorijski simulirane rastrošbe (ispitano u uređaju za direktno smicanje stijena).

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

N/A - ispitivanje nije provedeno prema planu ispitivanja zbog kvara hidraulike na opremi i/ili pucanja platera za imobilizaciju uzorka u ćeliji na više od 75% uzoraka u seriji

"Naliježe" - gornja kutija se naslanja na donju te su rezultati odbačeni

U tablica 3.9. prikazani su rezultati direktnog smicanja degradiranog lapora u uređaju za direktno smicanje tla, za ugradnju pri optimalnoj vlažnosti dobivenu Proctorovim pokusom i upotrebom sedimenta iz uređaja za pokus trajnosti stijene. Sediment je formiran uz produženi rad uređaja za pokus trajnosti stijene, sve dok nije formirana dovoljna količina uzorka za ugradnju u ćeliju za direktno smicanje tla gdje je, nakon što se uzorak konsolidirao pod vlastitom težinom 24 sata, provedeno ispitivanje prema standardnom postupku za direktno smicanje tla [119].

Tablica 3.9. Rezultati direktnog smicanja degradiranog lapora u uređaju za direktno smicanje tla, za ugradnju pri optimalnoj vlažnosti i upotrebom sedimenta iz uređaja za pokus trajnosti stijene, preuzeto iz [119]

| Oznaka uzorka     | CaCO <sub>3</sub><br>(%) | I <sub>d2</sub><br>(%) | Upijanje<br>(%) | Optimalna<br>vlažnost (%) | c<br>(kPa) | φ<br>(°) | Napomena:                      |
|-------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|---------------------------|------------|----------|--------------------------------|
| DSS-20 (Proctor)  | 64,3                     | 72,8                   | 9,8             | 14,2                      | 17,7       | 25,2     | prosijano kroz<br>sito 0,85 mm |
| DSS-20 (Sediment) |                          |                        |                 |                           | 3,8        | 23,7     | sediment u SDI<br>pokus        |
| DSS-21 (Proctor)  | 49,8                     | 26,4                   | 20,8            | 14,3                      | 1,5        | 26,3     | prosijano kroz<br>sito 0,85 mm |
| DSS-21 (Sediment) |                          |                        |                 |                           | 0,2        | 18,6     | sediment u SDI<br>pokus        |

U rezultatima prikazanim u tablici 3.8. za uzorke DS-1, DS-2, DS-4 i DS-5, s rasponom udjela karbonata 70-77%, koji se prema analizama trajnosti mogu svrstati u Tip I, vidljivo je da su rezultati bez simulirane rastrošbe konzistentni s rezultatima prethodno provedenih istražnih radova i ispitivanja. Npr. Šestanović i dr. [120] kod Geotehničkih radova za temeljenje naselja "Pujanke" u Splitu navode prosječne vrijednosti parametara posmične čvrstoće za lapore (Tablica 3.10.) s udjelom CaCO<sub>3</sub>>75% u iznosu φ=48° i c=3 MPa odnosno φ=40° i c=2 MPa za lapore s udjelom CaCO<sub>3</sub> u rasponu od 65-75%.

Tablica 3.10. Naprezanje pri slomu monolitnih uzoraka lapora kod Geotehničkih radova za temeljenje naselja "Pujanke" u Splitu, preuzeto iz [120]

| Parametar:                                        | Količina CaCO <sub>3</sub> komponente (%) |        |         |         |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------|---------|---------|
|                                                   | > 75                                      | 75 -65 | 65 - 50 | 50 - 35 |
| Kohezija c (kPa)                                  | 3000                                      | 2000   | 1100    | 100     |
| Kut unutarnjeg<br>trenja φ (°)                    | 48                                        | 40     | 28,5    | 20      |
| Prostorna težina<br>lapora γ (kN/m <sup>3</sup> ) | 24,0                                      | 24,0   | 24,0    | 18,5    |

Napomena: parametri posmične čvrstoće dobiveni su na temelju laboratorijskih ispitivanja vlačne i tlačne čvrstoće lapora.

Uzorci tipa I s manjim udjelom CaCO<sub>3</sub> (DS-1 i DS-2) ukazuju na trend smanjenja posmične čvrstoće pri dva ciklusa simulirane rastrošbe, dok kod uzoraka s većim udjelom CaCO<sub>3</sub> značajnije promjene nema. Štoviše, zbog velike čvrstoće lapora kod većeg broja uzoraka dolazi do sloma



plastera s kojim je uzorak imobiliziran te su serije u kojima najmanje 3 ispitivanja nisu prihvaćena odbačene (oznaka N/A).

Za uzorke DS-6 i DS-9 s udjelom karbonata 44,4% odnosno 65,6%, koji se prema analizama trajnosti mogu svrstati u Tip II, vidljivo je da su rezultati bez simulirane rastrošbe konzistentni s podacima iz literature [120].

Kod uzorka DS-6 je može se primjetiti da s povećanjem broja ciklusa sušenja i vlaženja nije dobiven očekivani konzekventni pad čvrstoće. Vizualnim pregledom raspadnutog uzorka nakon ispitivanja u takvim slučajevima se uočava da sadrži više ili manje sekundarnih pukotina (vidi prikaz na slici 3.17.) koje prolaze pojedinim uzorkom, a koje se prije ispitivanja nisu mogle uočiti na površini uzorka. Ovisno o tome kako je uzorkovan, pojedini uzorak iste serije može i ne mora sadržavati ove pukotine, te nastaju razlike u dobivenim rezultatima izmjerene čvrstoće na istoj seriji. Ovaj nedostatak se može ukloniti jedino ispitivanjem serije s velikim brojem uzoraka kod koje će više uzoraka biti ispitano s istim normalnim opterećenjem.

Svojstveno za ovakve uzorke je i porast vrijednosti kuta trenja nakon prvog ciklusa sušenja i vlaženja. Vizualni pregled takvih uzoraka nakon ispitivanja pokazuje da se uzorak raspao na niz krupnih komada (Slika 3.22.a), ali i da oslabljenje (raspadanje) nije zahvatilo materijal u dubini (Slika 3.22.b).



(a)



(b)

Slika 3.22. a) Raspucalost uzorka DS-6 (prije ugradnje) prilikom vlaženja kod drugog ciklusa rastrošbe, b) Primjer plohe loma nakon dva ciklusa rastrošbe

Dio fragmenta s površine prikazanog uzorka otpao je uslijed smicanja i rastavljanja dijelova uzorka te se ne uočava kontinuirana ploha loma. Uzorak se pri smicanju ponaša kao dobro građuirani zbijeni šljunak, što je mogući uzrok prividnog porasta vrijednosti kuta trenja.

Kod uzorka DS-9 se može primjetiti da s povećanjem broja ciklusa sušenja i vlaženja nije dobiven očekivani konzekventni pad kuta unutarnjeg trenja te da se njegovo ponašanje može opisati na sličan način kao i kod uzoraka DS-1 i DS-2, što s obzirom da je njegov udio karbonata od 65.6% ima smisla, bez obzira što je prema trajnosti svrstan u Tip II.

Za uzorke DS-3, DS-7, DS-8 i DS-10, s udjelom karbonata u rasponu od 40,2% do 63,2%, koji se prema analizama trajnosti mogu svrstati u Tip III, također je vidljivo da su rezultati bez simulirane rastrošbe konzistentni s podacima iz literature [120]. Kod uzoraka DS-3 i DS-10, s udjelom karbonata 54,63% odnosno 63,18%, zanimljivo je uočiti da se kut unutarnjeg trenja gotovo ne mijenja s primijenjenim ciklusima sušenje-vlaženje, a dobivena veličina odgovara vrijednostima koje su dobivene ispitivanjem niza drugih uzoraka lapora s približno istim udjelom karbonata (Tablice 3.7. i 3.10.). Komponenta kohezije se značajno mijenja nakon prvih nekoliko ciklusa sušenja-vlaženja, dok nakon toga nema promjene u redu veličine s obzirom na primijenjeni broj ciklusa. Pri većem broju ciklusa pojavljuje se problem nalijezanja ćelije kod većeg iznosa naprezanja okomitog na kliznu plohu, te su serije u kojima najmanje 3 ispitivanja nisu prihvaćena odbačene (oznaka "Naliježe"). Kod uzoraka DS-7 i DS-8, s udjelom karbonata 49,32% odnosno 40,20%, problem nalijezanja očituje se kod provođenja ispitivanja bez simulirane rastrošbe, dok ispitivanja na uzorcima sa simuliranom rastrošbom ispitivanje nije bilo moguće provesti u uređaju za direktno smicanje stijena.

Uzorci koji su još uvijek dovoljno cjeloviti da se na njima mogu provoditi mjerenja nakon simulirane rastrošbe, pokazuju rezultate posmične čvrstoće koje se približavaju vrijednostima dobivenim za laporovitu glinu (Tablica 3.7.) i degradiranog lapora ispitanog u uređaju za direktno smicanje tla (Tablica 3.9.).

### 3.5. Diskusija i zaključci

Primarna svrha prikazanog istraživanja je određivanje dodatnih kriterija ili izmjena standardiziranih postupaka trajnosti, kako bi se uklonile uočene nepouzdanosti u procjeni trajnosti lapora, odnosno nedostaci kod njihove primjene u izučavanju zasjeka u mekim stijenama.

Na uzorcima sa šireg područja Splita uočeno je da standardni laboratorijski pokusi, preporučeni od strane ISRM-a i ASTM-a, koji koriste dva ciklusa vrtnje u standardiziranom uređaju nisu u skladu s vizualnim pregledom uzoraka nakon izvršenog pokusa (materijal je često izrazito usitnjen što, bez obzira na veliki ostatak mase, nije prihvatljivo s aspekta trajnosti). Stoga je, s ciljem pronalaska odgovarajućeg rješenja provedeno ispitivanje s povećanim brojem ciklusa

vrtnje, kao i s izmjenjenim vremenom trajanja ciklusa vrtnje, te ostali indeksni pokusi (udio karbonata u mineraloškom sastavu lapora, upijanje vode, suha gustoća stijene, specifična gustoća stijene, indeks točkaste čvrstoće, indeks trajnosti i modificirani indeks trajnosti).

U skladu s rezultatima ispitivanja uočeno je da se rezultati grupiraju u tri skupine prema opisu u tablici 3.4. i prema vizualnoj procjeni prikazanoj na slici 3.4. Granica između materijala označenog s Tip I i Tip II je jasno određena (na uzorku obima  $N=70$ ) te se preporučuje koristiti podatke o udjelu  $\text{CaCO}_3$ , suhe gustoće i upijanja, kao što je prikazano u tablici 3.11. Granicu između Tipa II i Tipa III materijala nije moguće odrediti uz upotrebu istih indeksa, već je potrebno primijeniti modificirani indeks trajnosti LSI. Ispitivanje je obavljeno na uzorku obima  $N=30$ , gdje je jasno određena granica između materijala Tipa II i Tipa III, prikazana na slici 3.15.

Zanimljivo je primjetiti neke učinke povećanja vremena trajanja ciklusa. Npr. za uzorke 7, 13 i 22, koji bi i nakon četiri ciklusa vrtnje prema Gamble-u bili klasificirani kao "srednje postojani", LSI indeksom su svrstani u Tip III, što i odgovara vizualnoj procjeni. Nadalje, za uzorak 18 (identičan s DS-8)  $I_{d4}$  je iznosio 97.23% te bi i vizualnom procjenom bi bio svrstan čak u Tip I. Upotrebom dodatnih ispitivanja u svrhu određivanja LSI indeksa, uzorak se u 25, 60 i 120 minutnom ciklusu značajno raspao i poprimio svojstva Tipa III, što je kasnije i potvrđeno njegovim ponašanjem u laboratorijski simuliranoj rastrošbi i direktnom smicanju.

*Tablica 3.11.* Prijedlog razredbe prema trajnosti za potrebe analiza trajnosti zasjeka u laporima

|         | $\text{CaCO}_3$ | Upijanje | Suha gustoća $\rho_d$ | LSI                       | Postojanost |
|---------|-----------------|----------|-----------------------|---------------------------|-------------|
| Tip I   | > 70%           | < 5%     | > 2.4 $\text{Mg/m}^3$ | < 0.05                    | Visoka      |
| Tip II  | < 70%           | > 5%     | < 2.4 $\text{Mg/m}^3$ | $0.05 < \text{LSI} < 0.5$ | Srednja     |
| Tip III |                 |          |                       |                           |             |
|         |                 |          |                       | > 0.5                     | Niska       |

Zanimljivo je primjetiti relativno visoku korelaciju između LSI indeksa i PLT testa prikazanu na slici 3.11. Imajući u vidu preciznost provedbe PLT testa ovaj rezultat ohrabruje te motivira na daljnja istraživanja u smjeru povezivanja drugih preciznijih ispitivanja čvrstoće lapora (npr. jednoosnu tlačnu čvrstoću) s ispitivanjem trajnosti materijala putem LSI indeksa.

Važno je napomenuti da mineraloški sastav i tekstura glinovitih stijena svakako utječu na trajnost, te u kombinaciji s rasporedom čestica na čvrstoću tih stijena. Međutim, budući je određivanje istog dugotrajno i skupo, a često ne pruža mogućnost kategorizacije, u ovom radu je



odabran smjer procjene trajnosti uvriježenim laboratorijskim postupcima prihvaćenim u geotehnici. Uostalom, predloženi indeksi se indirektno i oslanjaju na mineraloški sastav stijene.

Osim PLT indeksa na jednom dijelu uzoraka provedeno je direktno smicanje, nedovoljno za koreliranje s indeksnim svojstvima, ali s druge strane dovoljno za utvrđivanje prijedloga smjernica za ispitivanje posmične čvrstoće mekih stijena. Određivanje parametara posmične čvrstoće intaktnog uzorka izvršilo se na grupama uzoraka u različitim stupnjevima rastrošbe, uz primjenu dodatka propisanom postupku i simuliranjem razvoja mehaničke rastrošbe u laboratoriju.

Rezultati ispitivanja ukazuju na grupiranje uzoraka konzekventno s prijedlogom kategorizacije prikazane u tablici 3.4., uz određena ograničenja u graničnim slučajevima koji su opisani kroz napomene u tablici 3.12. U konačnici se može zaključiti da je predloženi postupak simulacije rastrošbe u laboratoriju provediv i unutar vremenski prihvatljivih okvira, uz ograničenja za Tip III, gdje se za testiranja na degradiranom materijalu preporučuje upotreba uređaja za direktno smicanje tla.

Tablica 3.12. Smjernice za primjenu postupka laboratorijski simulirane rastrošbe u mekim stijenama

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

\* - Za lapore Tipa II koji graniče s Tipom III (generalno sa manjim udjelom  $\text{CaCO}_3$  ili  $\text{LSI} \approx 0,5$ ) preporučuje se max. 4 ciklusa laboratorijski simulirane rastrošbe

\*\* - Za direktno smicanje intaktne stijene koristiti DS stijena, dok se za laboratorijski simuliranu rastrošbu preporučuje maksimalno jedan ciklus, odnosno upotreba uređaja za DS tla

\*\*\* - Kao dodatni kriterij pri odabiru postupka koristiti informacije o udjelu  $\text{CaCO}_3$ , upijanju i LSI indeksu stijene. Ukoliko se prema tome može zaključiti da je lapor na granici dvije kategorije, preporuča se usvojiti postupak za kategoriju više, te ga po potrebi korigirati u toku postupka.

## **4. UPOTREBA VIS-NIR SPEKTROMETRIJE U ANALIZI SVOJSTAVA MEKIH STIJENA**

U ovom poglavlju prikazane su osnove VIS-NIR spektrometrije kroz analizu mineralnih spojeva u mekoj stijeni. Na primjeru lapora s područja Dalmacije izvršena je analiza mogućnosti procjene udjela vezivnih minerala (u ovom slučaju kalcijevog karbonata) i udjela minerala glina. Urađena je i analiza mogućnosti provedbe kvalitativne procjene tipa gline za primjere mekih stijena s područja Dalmacije i Medvednice, kao moguće osnove za procjenu trajnosti meke stijene upotrebom predložene tehnologije.

### **4.1. Uvod**

Tehnologija kao što je spektrometrija u vidljivom i blisko-infracrvenom području spektra (VIS-NIR), u okviru geoznanosti, može značajno unaprijediti identifikaciju i razredbu gradiva „in-situ“. Senzori ovakve vrste koriste refleksiju elektromagnetskog zračenja s podloge u određivanju mineralnog sastava gradiva koji je sačinjava. Kvantitativna ili kvalitativna analiza mineraloškog sastava stijene upotrebom VIS-NIR spektrometrije, zbog preklapanja spektralnih odgovora pojedinih minerala, može biti vrlo složen i zahtjevan zadatak. Jedno od rješenja je svakako upotreba multivarijantnih kalibracijskih algoritama, u literaturi često nazivanih kemometrijske

metode, putem kojih se modelira veza između spektralnog odgovora i kemijskih ili fizičkih svojstava kalibracijskog seta uzoraka.

Cilj spektrometrijske analize najčešće jest identifikacija jedne ili više valnih duljina (često i raspona valnih duljina) u VIS-NIR dijelu elektromagnetskog spektra koji je jedinstven za pojedinu kemijsku ili mineralnu sastavnicu gradiva, odnosno na kojoj se kod promjene udjela ili koncentracije iste detektira promjena u spektralnom otisku uzorka. Pritom je važno naglasiti da je zabilježeni spektar rezultat interakcije korištenog instrumenta i optičkih odnosno kemijskih svojstava uzorka [121], stoga je potrebno biti oprezan prilikom usporedbe spektara dobivenih u različitim okolišnim uvjetima ili uređajima različite rezolucije.

Spektralni otisak sadrži informacije o specifičnim vibracijama pojedinih molekula, međutim za njihovu interpretaciju je potrebno prethodno poznavanje molekularnih (kemijskih ili mineraloških) i fizičkih svojstava gradiva. Iz tog razloga spektralnoj analizi uvijek prethodi analiza gradiva provjerenim „klasičnim“ metodama, te se povezivanjem promjena u spektru s zabilježenim promjenama u gradivu definiraju korelacije svojstava spektra i gradiva. Te korelacije, dobivene na ograničenom setu uzoraka (kalibracijski set), omogućavaju da se budući spektralni otisci mogu interpretirati prema poznatim uzročno-posljedičnim vezama spektra dobivenog spektrometrom i molekularnih svojstava uzoraka. Kod provođenja kalibracije putem kemometrijske analize model je, statistički gledano, definiran ukoliko postoji analitička veza između X (promjene u spektralnom zapisu) i Y (referentne analize). Međutim, ako uzročno-posljedična veza između X i Y nije uočena ili ne postoji fizikalno objašnjenje, tada dobiveni analitički izrazi nemaju potrebnu prediktivnu vjerodostojnost.

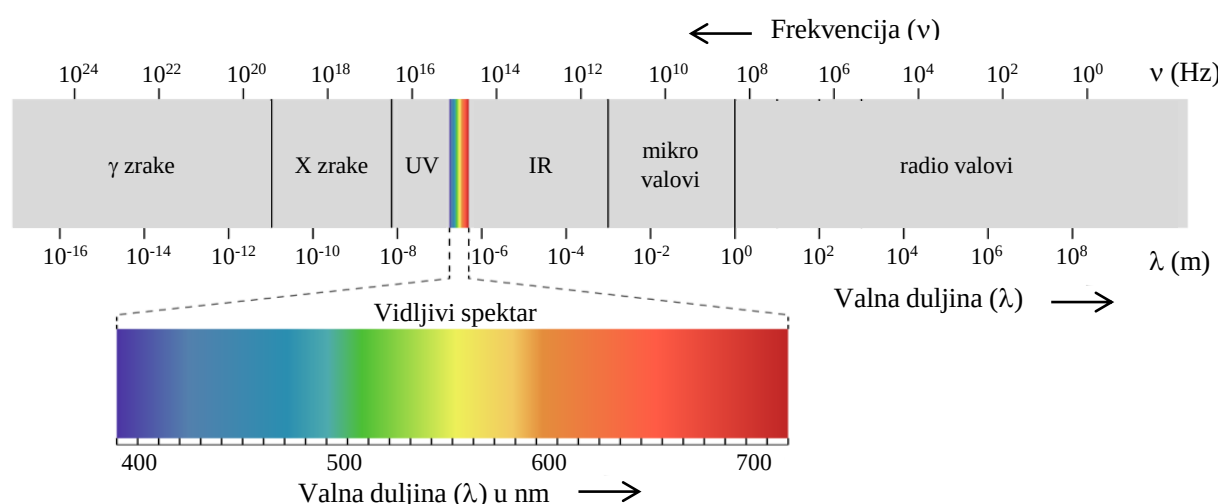
Postavlja se pitanje: zašto koristiti VIS-NIR spektrometriju, kada je ionako potrebno izvršiti prethodna ispitivanja klasičnim metodama? Nakon prethodnih ispitivanja (kalibracije) i validacije modela do izražaja dolazi glavne prednosti ove tehnologije, a to su: brzina, kvantitet te vremenska i prostorna rezolucija mjerenja. Naime, očitavanja spektra su trenutna i nerazorna, oprema je prijenosna i omogućuje dosad nezamislivu količinu mjerenja „in-situ“, praktično bez materijalnih troškova, uz značajnu prostornu i vremensku rezoluciju provedenih mjerenja. S time je znanstvenicima omogućena provedba istraživanja koja zbog financijskih ograničenja dosad nisu bila provediva.

Kod zasjeka u mekim stijenama, mineraloški sastav značajno utječe na trajnost istih, što su uostalom indirektno pokazala i laboratorijska ispitivanja trajnosti. Određivanjem udjela kalcijevog karbonata i minerala glina, postavlja se osnova za daljnje analize trajnosti već postojećih zasjeka, ali i prognoze promjene morfologije budućih zasjeka uslijed rastrošbe površine. Osim udjela

minerala gline važna informacija je i vrsta gline. U mješavini čestica koje čine meku stijenu, za fizičko-mehaničke osobine bitnu ulogu može imati i već mali udio „nepoželjnog“ tipa gline. Npr. kaolinit sa specifičnom površinom  $5\text{--}20\text{ m}^2/\text{g}$  i čvrstim vezama molekula u dodiru s vodom ne bubri, dok montmorilonit sa specifičnom površinom  $700\text{--}800\text{ m}^2/\text{g}$  značajno bubri. Pritom može povećati svoj volumen i do 10 puta, izrazito je osjetljiv na promjene vlažnosti, što se očituje kroz cikličko bubrenje ili skupljanje te ovisno o njegovom udjelu u mekoj stijeni može značajno doprinijeti mehaničkoj rastrošbi stijene. Stoga je od iznimnog značaja istražiti svaku mogućnost dodatne kvalitativne ili kvantitativne procjene udjela mineraloškog sastava in situ, koju između ostalog omogućava upotreba prijenosnih varijanti VIS-NIR spektrometra.

## 4.2. Osnove VIS-NIR spektrometrije

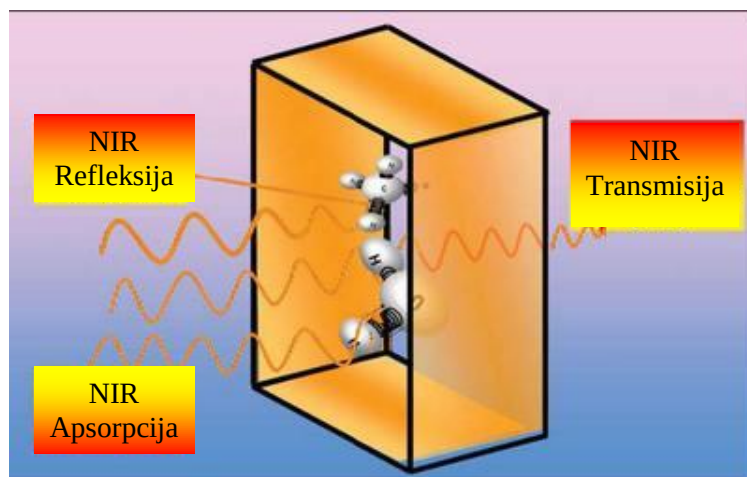
VIS-NIR spektrometrija zasniva se na analizi vidljivog (eng. „visible“ - VIS) i manjeg dijela infracrvenog (eng. „near infrared“ - NIR) područja elektromagnetskog spektra (Slika 4.1.).



Slika 4.1. Elektromagnetski spektar [122]

Da bi shvatili kako funkcionira VIS-NIR spektrometar dovoljno je prisjetiti se kako funkcionira ljudsko oko, budući je ono u osnovni „primitivni“ spektrometar. Kada pogledamo površinu stijene vidimo boju. Ljudsko oko i mozak procesiraju raspršenje fotona na različitim valnim duljinama vidljivog spektra svjetla pa npr. razlučujemo zelenkastu boju serpentina ili crvenu boju „terra rosse“. S druge strane upotrebom „modernih“ spektrometara na širem rasponu frekvencija i s povećanom preciznošću, uz sofisticirane statističke metode analize podataka uz pomoć računala, možemo uočiti mnoge procese koji nisu vidljivi golom oku.

Uzročnik tih procesa je izlaganje minerala izvoru elektromagnetskog zračenja. U slučaju vidljivog dijela spektra riječ je o svjetlosti, a koje tvore čestice koje nazivamo fotoni. Prema definiciji foton je elementarna čestica, kvant elektromagnetskog zračenja, koji se u vakumu giba brzinom svjetlosti  $c$  [68]. U interakciji fotona s pojedinim mineralom dio se odbije (reflektira) od strukture minerala, dio prolazi kroz strukturu, dok je ostatak apsorbiran (Slika 4.2.).



Slika 4.2. Shematski prikaz interakcije fotona s mineralom. Elektromagnetsko zračenje se može apsorbirati (NIR Apsorpcija), reflektirati (NIR Refleksija) ili proći kroz uzorak (NIR transmisija)

Niz procesa uvjetuje absorpciju fotona kod pojedinog minerala i to za svaki mineral na specifičan način. Upravo ova spoznaja nam služi kao osnova da, analizirajući ukupnu absorpciju nekog gradiva na širem rasponu frekvencija, saznamo više o kemijskom i mineraloškom sastavu gradiva kao cjeline. U tablici 4.1. prikazani su osnovni tipovi spektrometrije prema analiziranom području elektromagnetskog spektra i promatranim procesima. U nastavku će se ukratko objasniti osnovni procesi koji su od interesa za područje predmetne disertacije.

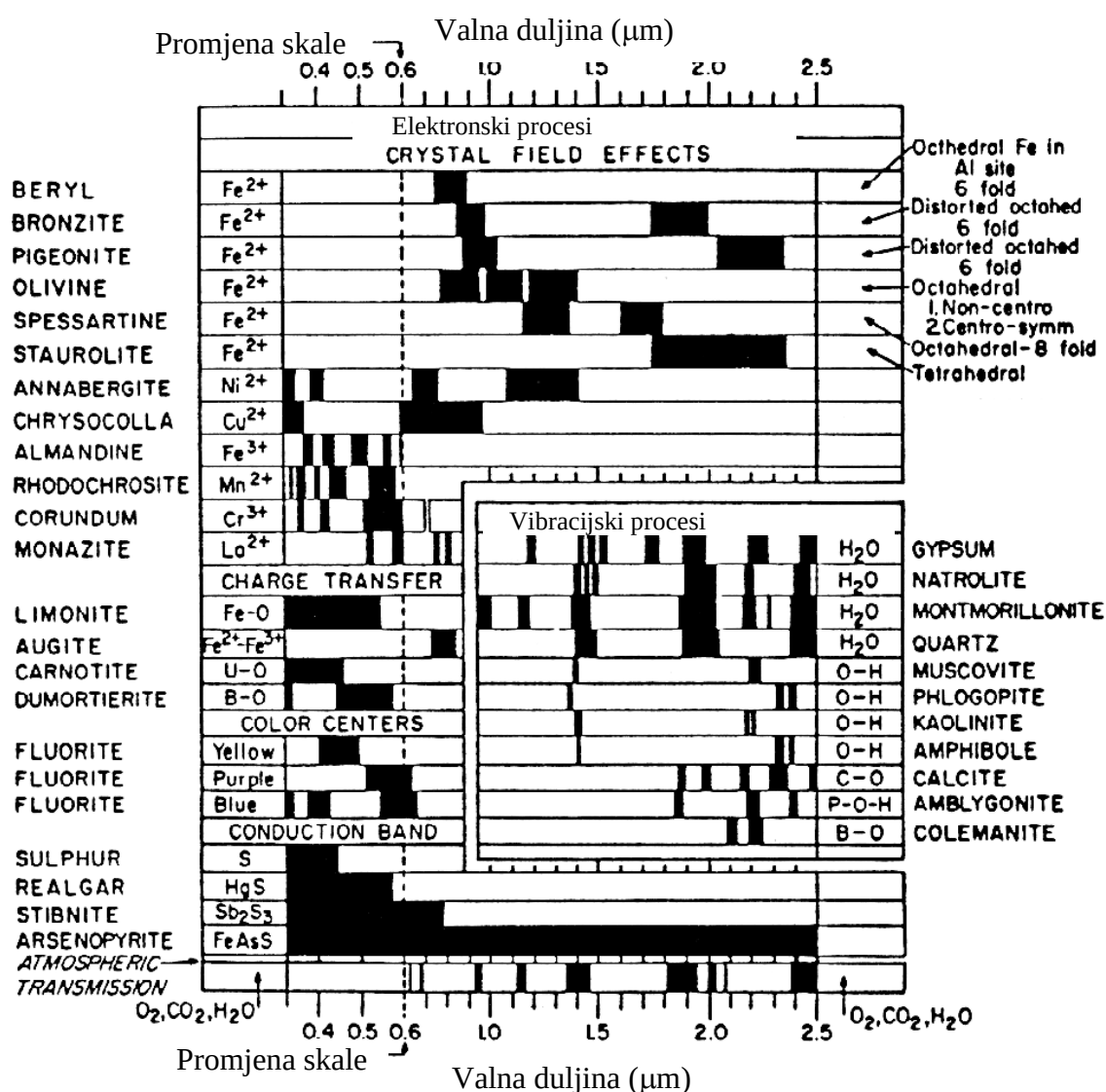
Tablica 4.1. Tipovi spektrometrije prema području elektromagnetskog spektra i promatranim procesima [123]

| Područje                  | Valna duljina (Valni broj)                     | Opaženo svojstvo                                                   |
|---------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Vidljivo                  | 360-780 nm<br>(27778-12821 $\text{cm}^{-1}$ )  | Elektronski prijelazi: definiranje boje                            |
| Blisko infracrveno (NIR)  | 780-2500 nm*<br>(12821-4000 $\text{cm}^{-1}$ ) | Gornji tonovi i kombinacije osnovnih tonova molekularnih vibracija |
| Srednje infracrveno (MIR) | 2500-25000 nm<br>(4000-400 $\text{cm}^{-1}$ )  | Osnovni tonovi molekularnih vibracija                              |

\* Službena definicija prema ASTM-u (ASTM E1655 - 05(2012)).

Prema [124] dva osnovna uzročnika apsorpcije u VIS-NIR spektralnom pojasu su: elektronski i vibracijski procesi.

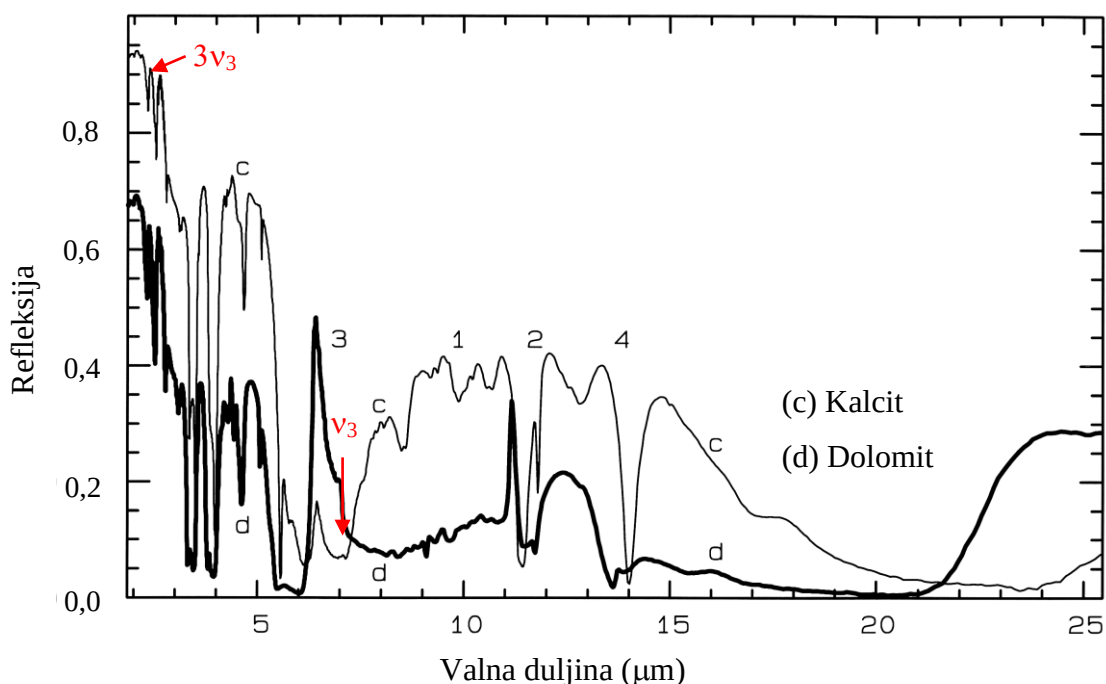
Elektronski procesi se očituju kroz promjene diskretnog energetskog stanja atoma ili iona iz nižeg u više, odnosno kroz promjenu raspodjele elektrona između atoma [68]. Apsorpcija fotona se u ovom slučaju najčešće ne emitira na istoj valnoj duljini već su „premazani“ na širem pojasu valnih duljina koji se tada nazivaju „energijski rasponi“ (eng. „energy bands“) [123]. Na slici 4.3. prikazani su energetski rasponi za neke tipične atome i minerale. Valja uočiti da se valne duljine na kojima se manifestiraju određeni elektronski procesi često preklapaju s valnim duljinama vibracijskih procesa.



Slika 4.3. Prikaz energetskih raspona kod elektronskih i vibracijskih procesa za neke tipične spojeve u pojasu koji pokriva VIS-NIR spektrometar [125]

Vibracijski procesi mogu se pojasniti upotrebom sljedeće analogije. Veze između molekula ili kristalne rešetke su poput opruga povezanih s utezima, što znači da cijeli sistem izložen djelovanju fotona može vibrirati prema modelu harmonijskog oscilatora [68]. Frekvencija pri kojoj pojedina molekula vibrira ovisi o krutosti opruge (jačini molekularne veze) i njenoj masi (odnosno masi svakog pojedinog elementa). Za molekule s  $N$  atoma postoji  $3N-6$  načina vibracija koji se nazivaju osnovni tonovi (fundamentalni tonovi ili frekvencije, engl. „fundamental modes“) i označavaju se grčkim slovom  $\nu_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$ . Svaka vibracija se može ponoviti i na nekom od višekratnika frekvencije osnovnog tona  $n \cdot \nu_i$  (npr.  $2\nu_1, 3\nu_2, \dots$ ) koje se nazivaju gornjim tonovima (harmonicima, engl. „overtones“) ili njihovim kombinacijama (npr.  $\nu_1 + \nu_2, \nu_2 + \nu_3, \nu_1 + \nu_2 + \nu_3$ ). Nakon osnovnog tona svaki sljedeći gornji ton ili kombinacija je obično 30 do 100 puta slabija od prethodne, što posljedično cijeli spektar pojedinog minerala čini poprilično kompleksnim. U spektrometrijskim analizama najčešće je moguće detektirati i izmjeriti apsorpciju za druge i treće gornje tonove i neke njihove kombinacije.

Npr. na slici 4.4. prikazan je infracrveni spektar minerala kalcita i dolomita. Oznake 1, 2, 3 i 4 označavaju položaj osnovnih tonova  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  i  $\nu_4$ .



Slika 4.4. Puni infracrveni spektar Kalcita ( $\text{CaCO}_3$ ) i dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) (Oznake 1,2,3 i 4 označavaju frekvencije osnovnih tonova  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  i  $\nu_4$ . [68])

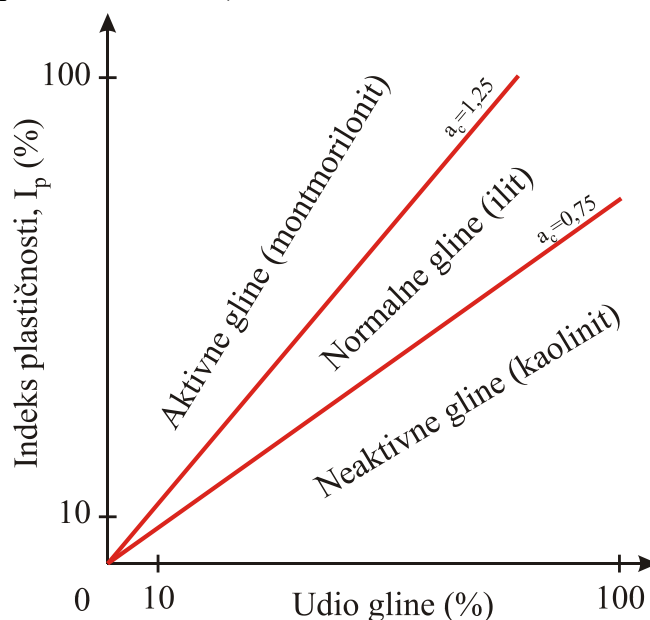
Najznačajniji za određivanje udjela kalcijevog karbonata u mekoj stijeni je treći osnovni ton  $\nu_3$ , odnosno njegov drugi gornji ton  $3\nu_3$  koji je unutar spektralnog raspona VIS-NIR spektrometra (do  $2.5\mu\text{m}$ ).

### 4.3. Kvalitativna analiza mineraloškog sastava meke stijene upotrebom baze spektralnih otisaka

Lapor kao primjer meke stijene s područja Dalmacije, za potrebe ove analize, možemo definirati kao smjesu gline i kalcita. S aspekta trajnosti, važno je definirati tip gline budući njena aktivnost značajno utječe na mogućnost mehaničkog trošenja uslijed bubrenja i skupljanja. Prema [126] aktivnost glinovite frakcije definira se kao odnos indeksa plastičnosti,  $I_p$ , i sadržaja frakcije promjera manjeg od 0,002 mm u postocima.

S obzirom na aktivnost gline dijelimo na (sl. 4.5.):

- neaktivne gline, (npr. kaolinit)
- normalne gline (npr. ilit)
- aktivne gline (npr. montmorilonit)

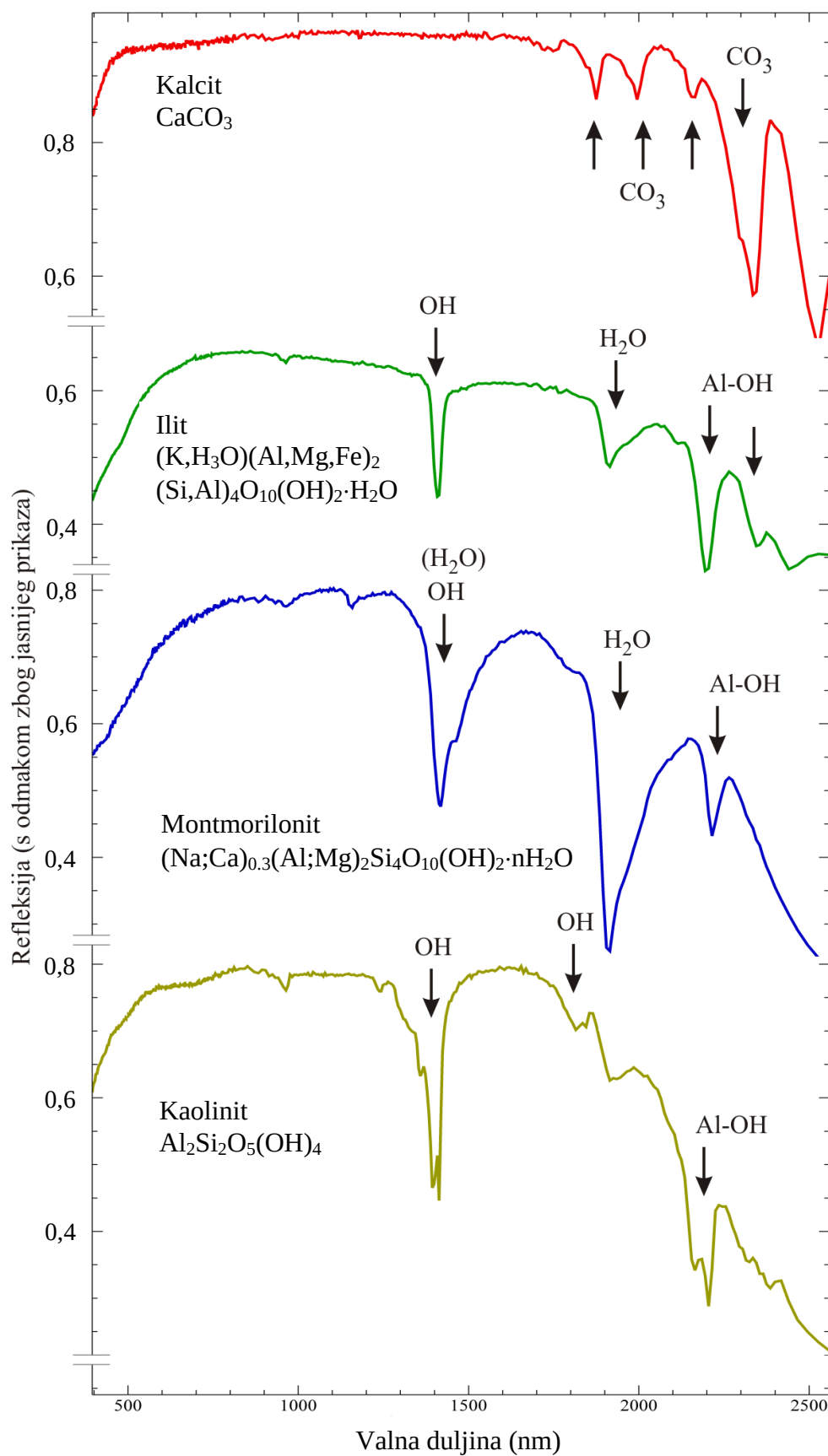


Slika 4.5. Dijagram aktivnosti gline [126]

Dok je u tlima jednostavno definirati indeksne pokazatelje (granicu plastičnosti i tečenja te udjele glinovite frakcije), u sedimentnim stijenama, posebice visokokalcitiziranim, zbog relativno malog udjela gline te potrebe za usitnjavanjem, taj postupak nije prihvatljiv. Stoga je svako istraživanje usmjereno k upotrebi spektralnih indikatora od velikog značaja. Naime, odziv spektra u vidljivom i infracrvenom području pokazuje prisutnost apsorpcijskih područja koji omogućavaju identifikaciju pojedinih minerala glina u tlima i stijeni.

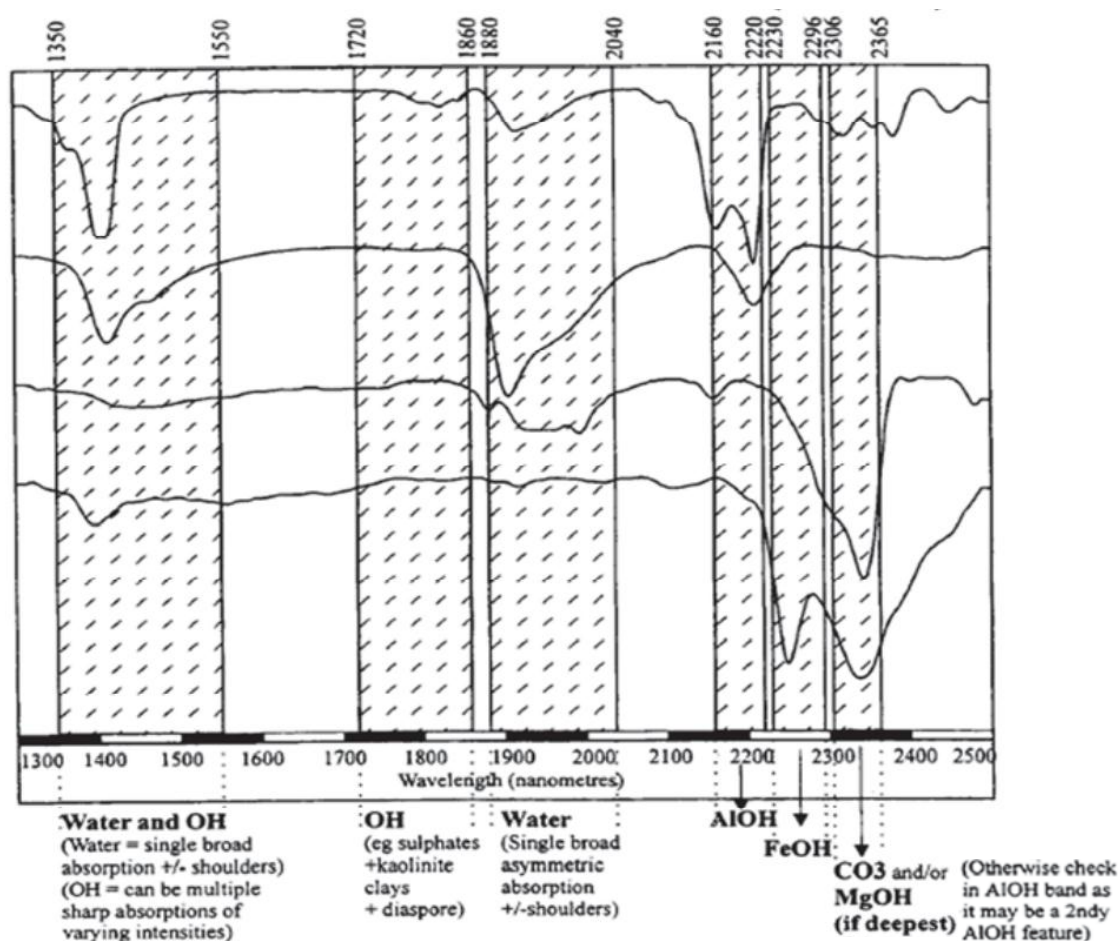
Na slici 4.6. prikazani su spektralni otisci kaolinita, ilita i montmorilonita (preuzeto iz spektralne biblioteke USGS-a [69]).





Slika 4.6. Spektralni otisci Kalcita, Ilita, Montmorilonita i Kaolinita (USGS spectral library) [69]  
(Kemijske formule preuzete iz [127 i 128])

Na slici 4.6. može se primjetiti da istovremena prisutnost pojaseva povećane apsorpcije oko 1400 i 1900 nm je karakteristična za montmorilonit (uslijed vibracije vezane vode -  $H_2O$ ), dok je istovremena povećana apsorpcija na 1400 i 2200 karakteristika kaolinita (uslijed vibracije hidroksida - OH) [129]. Prisutnost snažnog apsorpcijskog pojasa na 1900 nm je ključan za određivanje potencijala bubrenja budući ukazuje na molekularno vezanu vodu (karakteristika 2:1 glina, kao što su ilit i montmorilonit), dok njegov izostanak te istovremena prisutnost snažnog pojasa na 1400 nm indicira prisutnost samo hidroksida (karakteristika 1:1 glina, kaolinit). [130] Apsorpcijski pojas oko 2200 nm karakterističan je za sve gline (uslijed vibracija aluminijevog hidroksida - Al-OH u rešetki), pri čemu je moguće primjetiti određene razlike. Kaolinitu je svojstven dvostruki apsorpcijski vrh na 2163 i 2208 nm (isto vrijedi i za raspon oko 1400 nm gdje je prisutan na 1395 i 1415 nm), dok montmorilonit i ilit imaju sličan apsorpcijski vrh. Ilit za razliku od montmorilonita posjeduje dodatne apsorpcijske vrhove u području iznad 2300 nm, što kod lapora s većim udjelom ilita može uzrokovati poteškoće u procjeni udjela karbonata pri malim koncentracijama istih [131] (Slika 4.7.).



Slika 4.7. Identifikacija mineraloških svojstava temeljem spektralnih otisaka u blisko infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra [131]

Kalcitu je svojstven izraženi apsorpcijski vrh oko 2340 nm, dok ostali vrhovi (1900, 2000 i 2160 nm [132]) u laporu nisu vidljivi (dolaze do izražaja tek kod visokokalcitiziranih lapora ili pješčenjaka). Na temelju spektralnih zapisa najčešćih sastavnica lapora (Slika 4.6.) može se zaključiti da je blisko infracrveni dio spektra pogodan za njihovu diferencijaciju, ne samo kada je riječ o kvalitativnim procjenama, već i kvantitativnim. Za kalibraciju kvantitativnih analiza uputno je koristiti kemometrijske metode, po mogućnosti na što većem broju uzoraka ( $N > 100$ ).

#### 4.3.1. Kvalitativna analiza spektralnih otisaka lapora s područja Dalmacije

Prema OGK [30] lapori dalmatinskog područja predstavljaju završne članove sekvenci u flišnoj seriji s utvrđenom pojavnošću minerala kalcita, dolomita, kvarca, ilita, muskovita, plagioklasa, mikrolina i montmorilonita. Za kvantitativnu analizu spektra odabrana su četiri uzorka lapora, dva s područja splitskog poluotoka i dva iz mjesta Duće (15 km jugoistočno od Splita), ciljano s manjim udjelom karbonatnih minerala. Ispitivanje mineralološkog sastava rendgenskom difrakcijom (XRD) provedeno je pri Hrvatskom geološkom institutu (Tablica 4.2.).

Tablica 4.2. Mineraloški sastav odabranih uzoraka lapora iz naslage fliša sa Splitskog poluotoka i iz mjesta Duće, općina Dugi rat

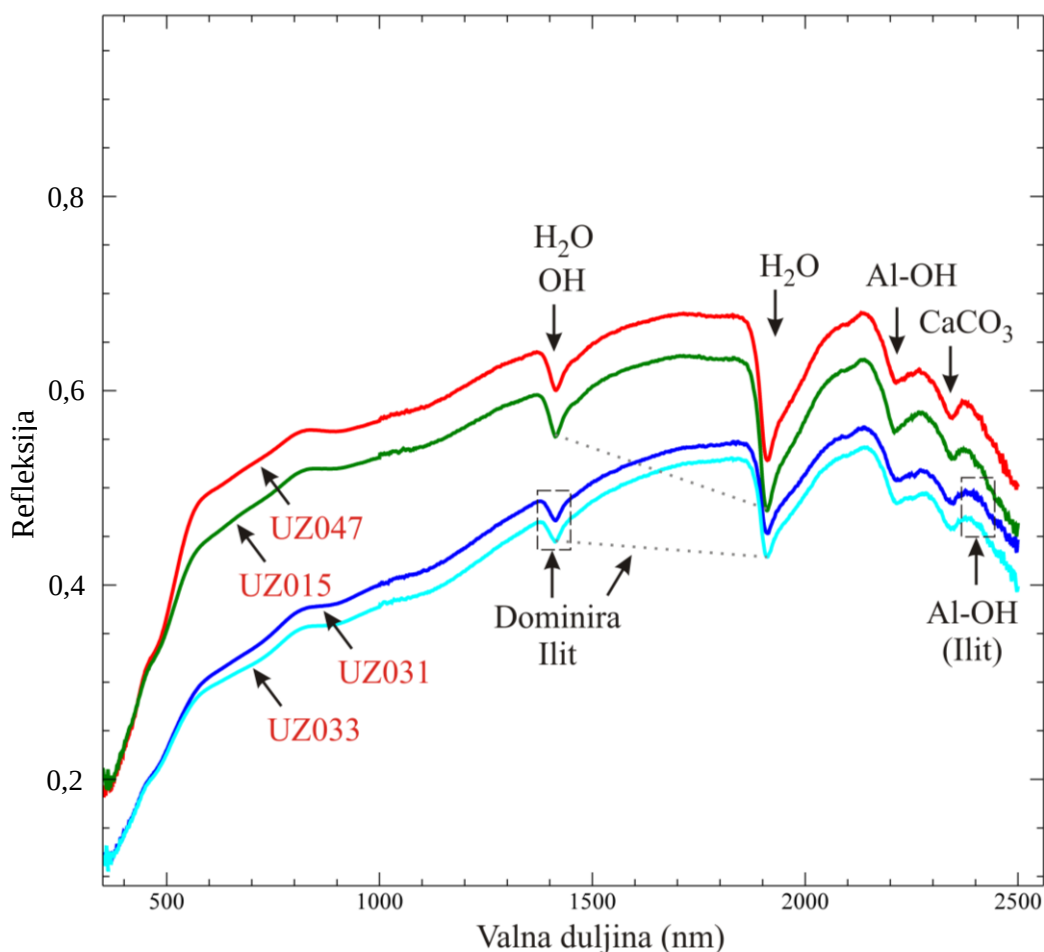
| Oznaka uzorka | Karbonatni minerali (%) |         | Minerali glina (%) |          |               | Kvarc (%) | Mjesto uzorkovanja |
|---------------|-------------------------|---------|--------------------|----------|---------------|-----------|--------------------|
|               | Kalcit                  | Dolomit | Ilit               | Kaolinit | Montmorilonit |           |                    |
| UZ031         | 38,7                    | 5,0     | 23,8               | 3,2      | 22,1          | 7,4       | Duće               |
| UZ033         | 35,4                    | 3,8     | 30,5               | 3,8      | 18,8          | 7,5       | Duće               |
| UZ015         | 52,1                    |         | 12,2               |          | 31,6          | 4,2       | Split              |
| UZ047         | 52,1                    |         | 9,0                |          | 34,2          | 4,9       | Split              |

\* Plagioklas i muskovit u tragovima

Kvalitativna analiza provedena je na spektralnim otiscima prikazanim na slici 4.8. Zbog male količine dostupnog uzorka, koji su često i izrazito nepravilnog oblika, svi uzorci su usitnjeni te je izdvojena frakcija veličine zrna od 0,7 do 1,18 mm. Kod sitinijih frakcija može doći do značajnije promjene oblika spektralnog otiska [132], posebice u zonama povećane apsorpcije, stoga ih za praktičnu upotrebu nije potrebno niti poželjno koristiti. Usporedbom spektralnih otisaka neporemećenih i usitnjenih uzoraka frakcije od 0,7 do 1,18 mm nije utvrđena razlika

promatranom infracrvenom području elektromagnetskog spektra, dok su eventualni učinci translacije spektra, u daljnjoj statističkoj obradi, eliminirani upotrebom relativnih odnosa u zonama povećane apsorpcije ili upotrebom prve derivacije spektralnog otiska.

Na svim uzorcima jasno su uočljivi pojasevi povećane apsorpcije koji svojim položajem odgovaraju dominantnim vrhovima ulaznih sastavnica (slika 4.6. i 4.7.). Kvarc nema apsorpcijske karakteristike u VIS-NIR području stoga nije analiziran njegov utjecaj na spektralni otisak lapora. Prisustvo kalcita ( $\text{CaCO}_3$ ) očituje se na 2340 nm. Iako je za čisti kalcit apsorpcija u ovom pojasu izrazita (oko 1/3 ukupne - Slika 4.6.) u mješavini koja čini lapor je relativno diskretna. Kod uzoraka UZ031 i UZ033 moguće je primjetiti da je ovaj vrh intezitetom sličan uzorcima UZ015 i UZ047, što je posljedica u manjem dijelu pojavnosti dolomita  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  (dolomit iskazuje apsorpciju u istom području, budući je u pitanju apsorpcijski pojas svih karbonata - općenito  $\text{CO}_3$ ), ali i većem udjelu Ilita koji u većim količinama iskazuje dodatni utjecaj Al-OH.

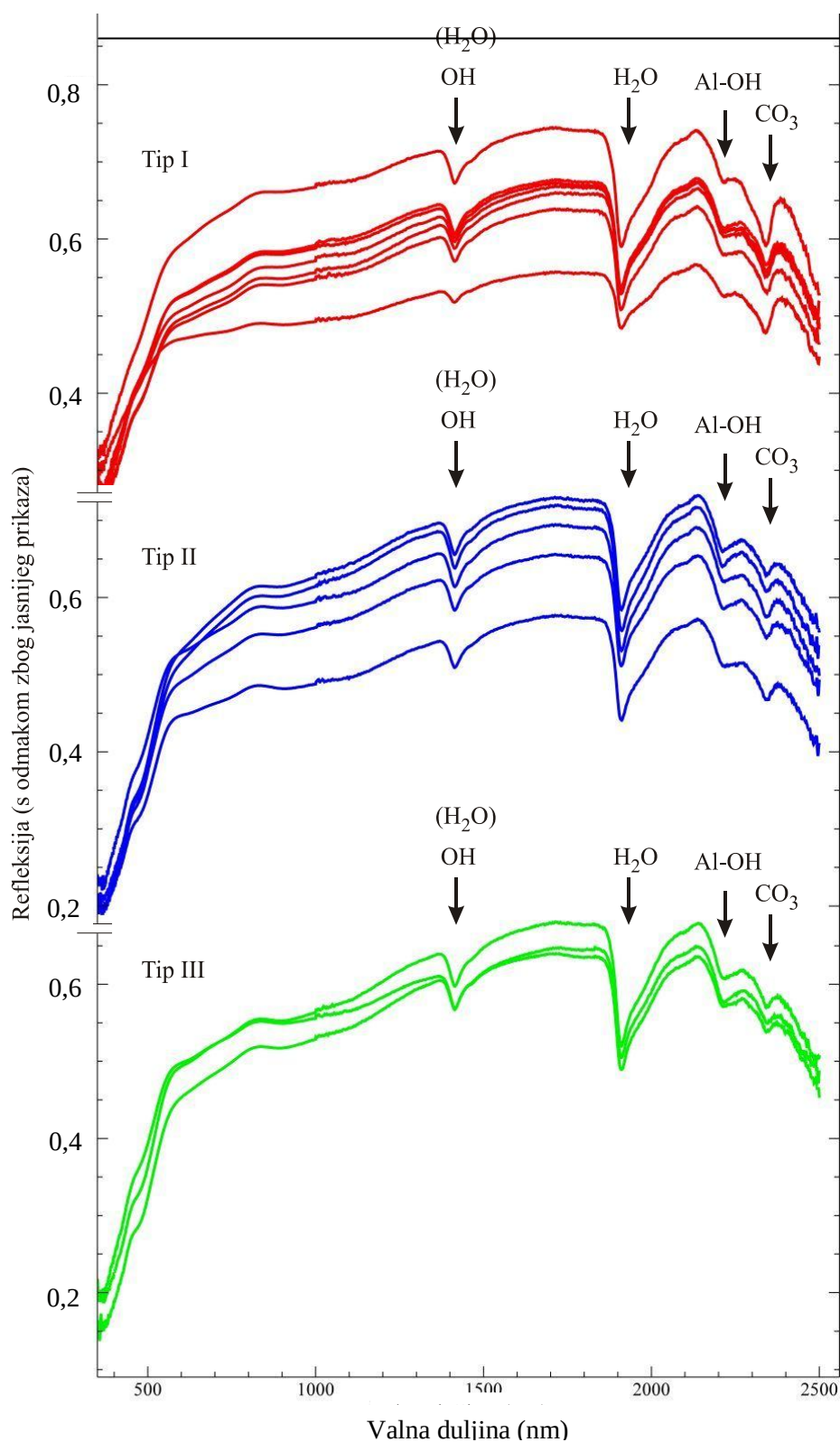


Slika 4.8. Spektralni otisci odabranih lapora s područja Dalmacije

Apsorpcijski pojas oko 2200 nm karakterističan je za sve gline te ga nije uputno interpretirati bez sagledavanja odnosa vrhova u pojasevima oko 1400 i 1900 nm [130]. Odnos apsorpcija na tim valnim duljinama, koji se zamjećuje kod čistih minerala, može poslužiti i za kvalitativnu procjenu udjela tipa gline. Za uzorke UZ031 i UZ033 s većim udjelom ilita može se primjetiti manja razlika ukupne apsorpcije, za razliku od UZ015 i UZ047 kod kojih dominira montmorilonit gdje je razlika izraženija, što u konačnici odgovara odnosima apsorpcijskih vrhova osnovnih minerala (Slika 4.6.). Osim toga oblik apsorpcijskog pojasa oko 1400 nm za uzorke UZ015 i UZ047 slijedi oblik nesimetričnog pojasa montmorilonita, dok kod UZ031 i UZ033 teže prema simetričnom obliku apsorpcijskog pojasa ilita.

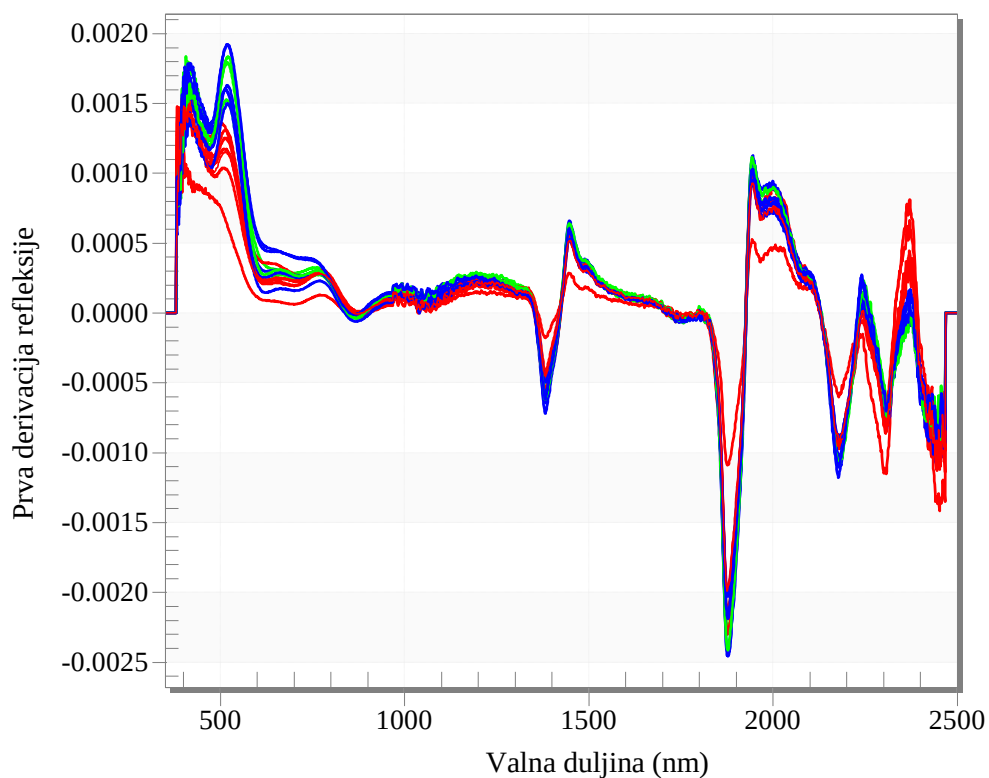
Na slici 4.9. prikazani su spektralni otisci 15 uzoraka na kojima je određen modificirani indeks trajnosti opisan u poglavlju 3.3.2. te im je pridodjeljen odgovarajući tip degradacije prema tablici 3.4. Svi uzorci sadržavaju osnovne karakteristike spektralnih otisaka lapora prethodno opisanih na slici 4.8. Za navedenih 15 uzoraka udio  $\text{CaCO}_3$  iznosi: Tip I >70%, Tip II 54-70% i Tip III 46-63%. Na spektralnim otiscima se može primjetiti povećana apsorpcija u području oko 2340 nm kod uzoraka Tipa I, u odnosu na Tipove II i III. Budući je to pojas karakterističan za kalcit za pretpostaviti je da spektralni zapisi mogu poslužiti kao osnova za određivanje udjela  $\text{CaCO}_3$  u laporima. Osim udjela  $\text{CaCO}_3$ , kvalitativnom analizom izvornih spektralnih otisaka lapora nije moguće kvantificirati razlike između različitih tipova uzoraka, budući spektralni otisak ovisi isključivo o mineraloškom sastavu, a trajnost (iako je značajan utjecaj mineraloškog sastava) ovisi i o drugim faktorima.

U tu svrhu za statističkih analiza umjesto „sirovih“ podataka izraženih putem relativne refleksije najčešće se koriste derivacije spektra [133]. Derivacijama spektra uklanjaju se efekti translacije i/ili rotacije spektralnog zapisa uslijed geometrije uzorka, hrapavosti površine, finoće mliva uzorka, kao i za lociranje položaja pojedinih značajki spektra. Pri tome prva derivacija uklanja efekt translacije spektra, dok druga derivacija uklanja efekt translacije i rotacije spektra.

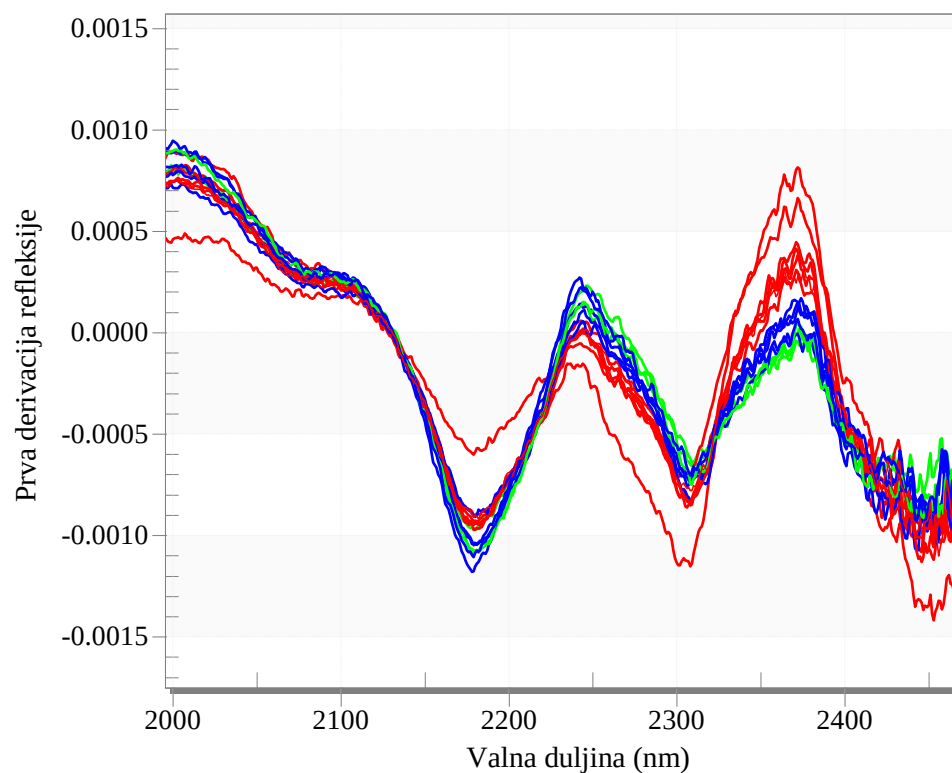


Slika 4.9. Spektralni otisci uzoraka lapora, grupirani prema trajnosti (Tip I - crvena, Tip II - modra i Tip III - zelena boja)

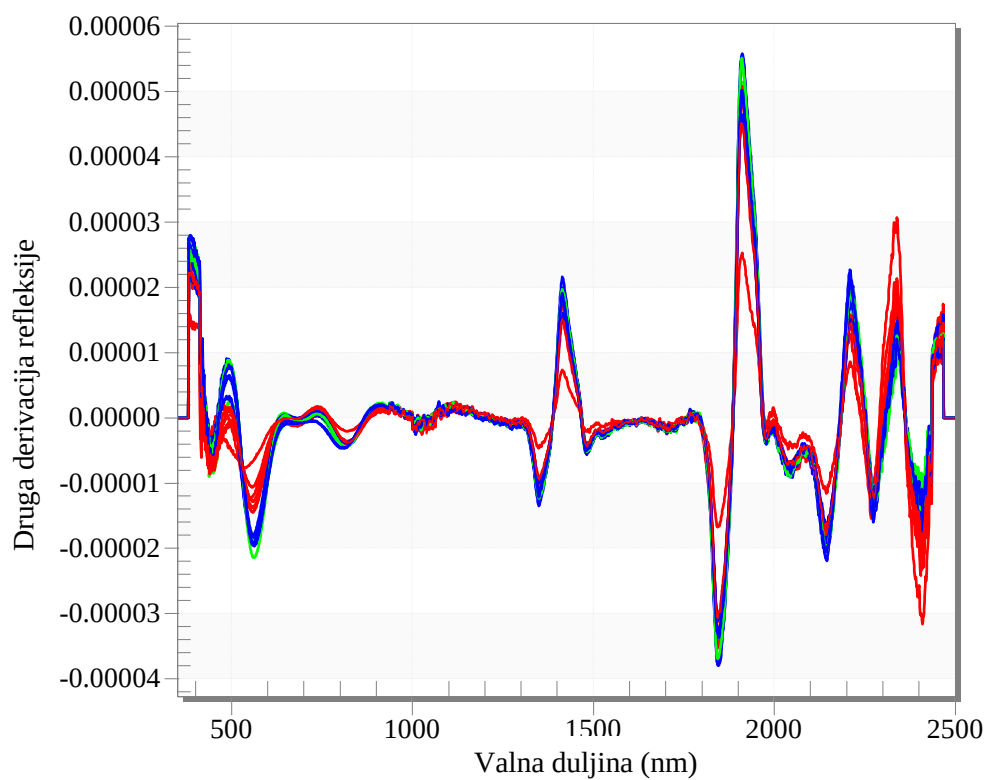
Na slikama 4.10. - 4.12. prikazane su prva odnosno druga derivacija spektra. Moguće je primjetiti grupiranje Tipa I (utjecaj CaCO<sub>3</sub>) u vidljivom spektru 500-600 nm i infracrvenom 2300-2400 nm (detaljnije na slici 4.11.)



Slika 4.10. Prva derivacija spektralnih otisaka uzoraka lapora sa slike 4.9.



Slika 4.11. Prva derivacija spektralnih otisaka uzoraka lapora sa slike 4.9. (uvećano područje 2000-2450 nm)



Slika 4.12. Druga derivacija spektralnih otisaka uzoraka lapora sa slike 4.9.



### 4.3.2. Kvalitativna analiza spektralnih otisaka lapora s područja Medvednice

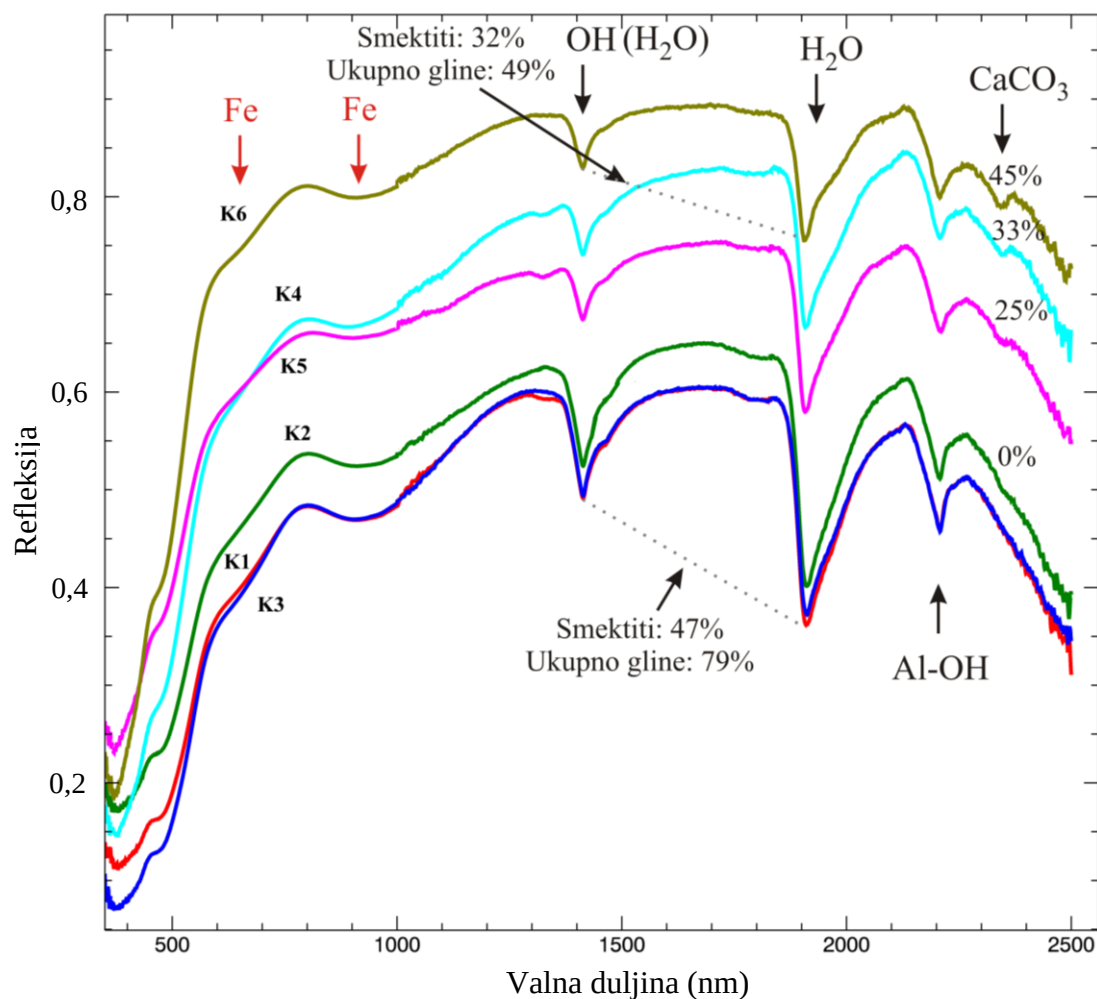
U okviru japansko-hrvatskog projekta „Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda od klizišta i poplava u Hrvatskoj“ izvršeno je uzorkovanje kvartarnih naslaga i lapora gornjeg Panona na području klizišta Kostanjek [134]. Za kvantitativnu analizu spektra odabrano je šest uzorka; tri uzorka kvartarnih naslaga (K1 - K3) i tri uzorka lapora s manjim udjelom karbonatnih minerala (K4 - K6), dostupnih za paralelnu analizu VIS-NIR spektrometrom. Ispitivanje mineraloškog sastava rendgenskom difrakcijom (XRD) provedeno je pri Hrvatskom geološkom institutu (Tablica 4.3.).

Tablica 4.3. Mineraloški sastav odabranih uzoraka s klizišta Kostanjek, Medvednica

| Uzorak | Kvarc (%) | Kalcit (%) | Aragonit (%) | Dolomit (%) | Albit (%) | Anortit (%) | Muscovit (%) | Ilit (%) | Klorit (%) | Kaolinit (%) | Smektit (%) | Ukupno gline (%) | Ukupno kalcitne komp. (%) |
|--------|-----------|------------|--------------|-------------|-----------|-------------|--------------|----------|------------|--------------|-------------|------------------|---------------------------|
| K1     | 13        |            |              |             | 8         |             | 9            | 16       |            | 7            | 47          | 79               |                           |
| K2     | 22        |            |              |             | 5         | 8           | 7            | 16       |            | 6            | 36          | 65               |                           |
| K3     | 20        | 3          |              |             | 7         | 8           | 10           | 9        |            | 6            | 37          | 62               | 4                         |
| K4     | 10        | 19         | 14           |             |           |             | 12           | 11       |            | 4            | 30          | 57               | 33                        |
| K5     | 8         | 18         | 7            |             | 5         |             | 14           | 14       | 1          | 6            | 27          | 62               | 25                        |
| K6     | 3         | 45         |              |             | 3         |             | 7            | 6        |            | 4            | 32          | 49               | 45                        |

Kvalitativna analiza provedena je na spektralnim otiscima prikazanim na slici 4.13. Na svim uzorcima jasno su uočljivi pojasevi povećane apsorpcije koji svojim položajem odgovaraju dominantnim vrhovima glinovitih sastavnica (slika 4.6. i 4.7.). Prisustvo kalcita i aragonita (oba su prirodni polimorfni oblici kalcijevog karbonata -  $\text{CaCO}_3$ ) i u ovom slučaju očituje se kroz povećanu apsorpciju oko 2340 nm. Kod uzoraka K1 - K3 ovaj apsorpcijski pojas gotovo u potpunosti isčezava, što doprinosi tezi o malom utjecaju ilita (u ovom slučaju njegov udio je 16%) u odnosu na karbonate, te se postepeno produbljuje s povećanjem ukupnog udjela  $\text{CaCO}_3$  u uzorcima K5, K4 i K6.

Apsorpcijski pojas oko 2200 nm, karakterističan za sve gline, u ovom slučaju je značajno izraženiji nego na uzorcima s područja Dalmacije (Slika 4.8.) na temelju čega se može potvrditi dominacija smektita i ukupne količine gline u odnosu na kalcitno vezivo.



Slika 4.13. Spektralnih otisci odabranih uzoraka s klizišta Kostanjek, Medvednica

Odnos apsorpcijskih vrhova na valnim duljinama 1400 i 1900 nm, koji se može primjetiti kod čistih minerala, može poslužiti i za kvalitativnu procjenu udjela tipa gline. Oblik apsorpcijskog pojasa oko 1400 nm za sve uzorke slijedi oblik nesimetričnog pojasa montmorilonita, što potvrđuje dominaciju smektita u odnosu na ilit i kaolinit.

Zanimljivo je primjetiti pojaseve pojačane apsorpcije od 800-1000 nm, koji nisu primjetni kod uzoraka s područja dalmacije, što je karakteristika pojavnosti kationa željeza  $\text{Fe}^{2+}$  u mineralnom sastavu. Ovakav oblik spektralnog zapisa karakterističan je za minerale Hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) i Getit ( $\text{FeOOH}$ ) te oni mogu biti uzrok iste iako nisu detektirani prikazanom XRD analizom. Jednako je tako moguće i da katione željeza sadržavaju minerali ilita ili smektita (npr. saponit, nontronit, itd.), što je prema [135] poznato svojstvo glina koje pripadaju montmorilonitnoj (smektitnoj) skupini glina.

#### 4.4. Određivanje udjela karbonata u mekoj stijeni

Pojavnost karbonata u području Dalmacije se uglavnom manifestira kroz dva osnovna minerala: kalcit i dolomit. U širem području grada Splita, kao jedan od glavnih minerala koji tvore stijene flišne serije, prevladava kalcit naspram dolomita (Tablica 3.1.). Ovo je bitno naglasiti za predmetnu studiju, budući spektralnom analizom nije moguće na jednostavan način odvajati minerale sličnog kemijskog sastava, stoga upravo relativna čistoća meke stijene, s aspekta udjela karbonatne skupine, omogućava brzu i jednostavnu interpretaciju rezultata.

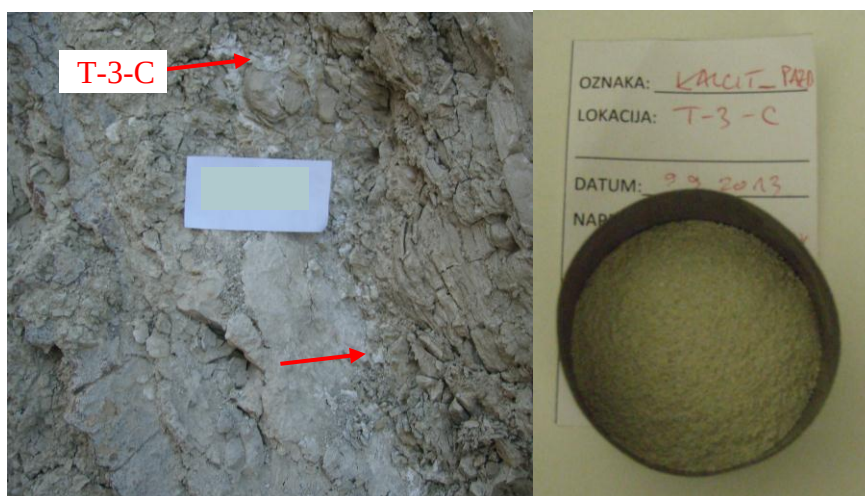
Karbonatnu skupinu karakterizira apsorpcija ravninskog  $\text{CO}_3^{2-}$  iona [68] uslijed vibracijskih procesa, stoga su i rasponi frekvencija na kojima se ona manifestira relativno uski i pogodni kvantifikaciji. U tablici 4.4. prikazani su položaji osnovnih tonova za kalcit (oni su izvan obuhvata NIR spektrometra) koji se mogu pronaći u literaturi te njihovi gornji tonovi i kombinacije vidljive u NIR području spektra.

Tablica 4.4. Osnovni vibracijski tonovi i njihove kombinacije koje je moguće uočiti u NIR spektru (modificirano prema [68] i [129])

| Oznaka                                            | Ton         | Opis                                       | Valni broj<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | Valna duljina<br>(nm) |        |
|---------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|--------|
| $\nu_1$                                           | osnovni     | simetrično istezanje                       | 1063                               | 9407                  |        |
| $\nu_2$                                           | osnovni     | savijanje izvan ravnine                    | 879                                | 11400                 | M      |
| $\nu_3$                                           | osnovni     | nesimetrično istezanje                     | 1415                               | 7067                  | I      |
| $\nu_4$                                           | osnovni     | savijanje u ravnini                        | 680                                | 14700                 | R      |
| $\nu_1 + 2\nu_3$                                  | kombinacija | kombinacija prvog i trećeg osnovnog tona   | 4000-3900<br>$\text{cm}^{-1}$      | 2500-2550             |        |
| $3\nu_3$                                          | gornji      | drugi gornji ton<br>trećeg osnovnog tona   | 4350-4250                          | 2300-2350             |        |
| $\nu_1 + 2\nu_3 + \nu_4$<br>ili $3\nu_1 + 2\nu_4$ | kombinacija | kombinacija prvog, trećeg i četv. osnovnog | 4720-4630                          | 2120-2160             | N<br>I |
| $2\nu_1 + 2\nu_3$                                 | kombinacija | kombinacija prvog i trećeg osnovnog tona   | 5080-5000                          | 1970-2000             | R      |
| $\nu_1 + 3\nu_3$                                  | kombinacija | kombinacija prvog i trećeg osnovnog tona   | 5400-5350                          | 1850-1870             |        |

Kvalitativnom analizom spektralnog otiska zapaženo je da za kalcit svojstven izraženi apsorpcijski vrh oko 2340 nm što odgovara položaju drugog gornjeg tona trećeg osnovnog tona, dok ostale vrhovi u laporima nije moguće izdvojiti osim pri visokim koncentracijama  $\text{CaCO}_3$  (dolaze do izražaja tek kod visokokalcitiziranih lapora).

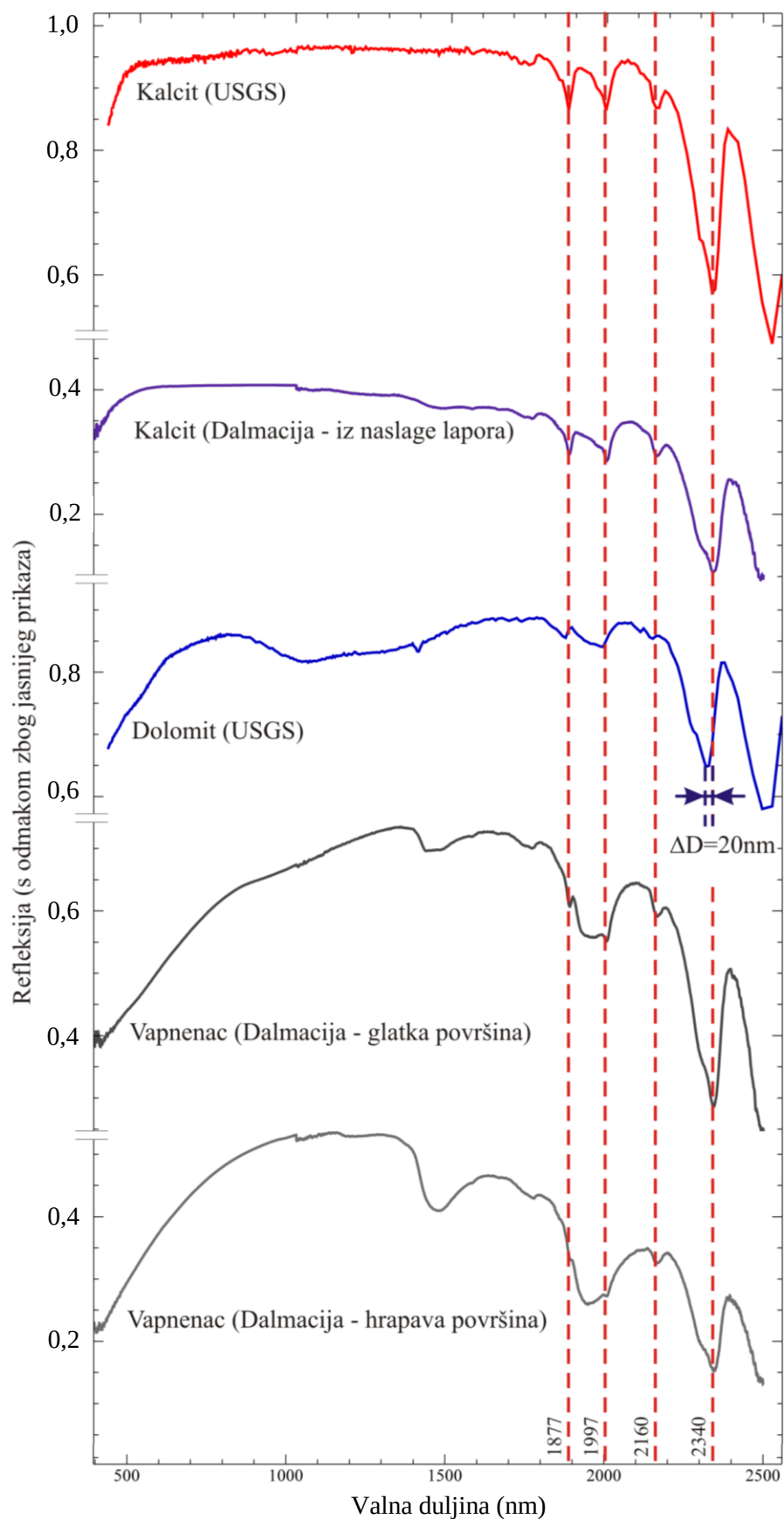
Na slici 4.15. prikazani su spektralni otisci kalcita preuzetog iz biblioteke USGS-a i kalcita izoliranog iz naslage lapora s područja grada Splita (Slika 4.14. udio  $\text{CaCO}_3$  u uzorku je 90%). Moguće je primjetiti da se oblici spektralnih otisaka u potpunosti preklapaju, osim u iznosu reflektance (zbog 10% udjela nečistoće).



Slika 4.14. Kalcit izoliran iz naslage lapora s lokacije Pazdigrad, Split

Na slici 4.15. prikazan je i spektralni otisak dolomita. Moguće je primjetiti da u promatranom području oko 2340 nm dolomit karakterizira također izražena apsorpcija, međutim uz otklon vrha od 20 nm prema lijevo. Ovo svojstvo je od velikog značaja za diferencijaciju dolomitnih i vapnenačkih stijena, međutim za procjenu udjela kalcijevog karbonata u sedimentnim stijenama može predstavljati problem, ukoliko se spektralni otisci baždare isključivo s kalcimetrijom. Pri malim udjelima dolomita njihov utjecaj će se manifestirati kroz povećano raspršenje rezultata, dok će pri većim udjelima procjena udjela  $\text{CaCO}_3$  značajno odstupati. Iz tog razloga preporučuje se uvijek kvalitativno razmotriti cijeli spektralni otisak, posebice položaj vrha povećane apsorpcije na kojem se vrši procjena.

Posljednja dva spektralna otiska na slici 4.15. odnose se na uzorak vapnenca dalmatinskog krša. Dominantni apsorpcijski vrh je moguće jednostavno kvantificirati, dok su ostala tri označena kombinancijska „zamaskirana“ s primjesama, ali ih je moguće primjetiti. Važno je napomenuti da VIS-NIR spektrometrija ima veliki potencijal u analizama „čistoće“ vapnenca, kao i praćenju procesa dolomitizacije, definiranju kristalne modifikacije, klasifikaciji vapnenih stijena, itd.



Slika 4.15. Spektralni otisci kalcita, dolomita i vapnenaca s označenim karakterističnim valnim duljinama za drugi gornji ton trećeg osnovnog tona i tri kombinacije vidljive u NIR spektru

#### 4.4.1. Analiza reflektance dijela NIR spektra

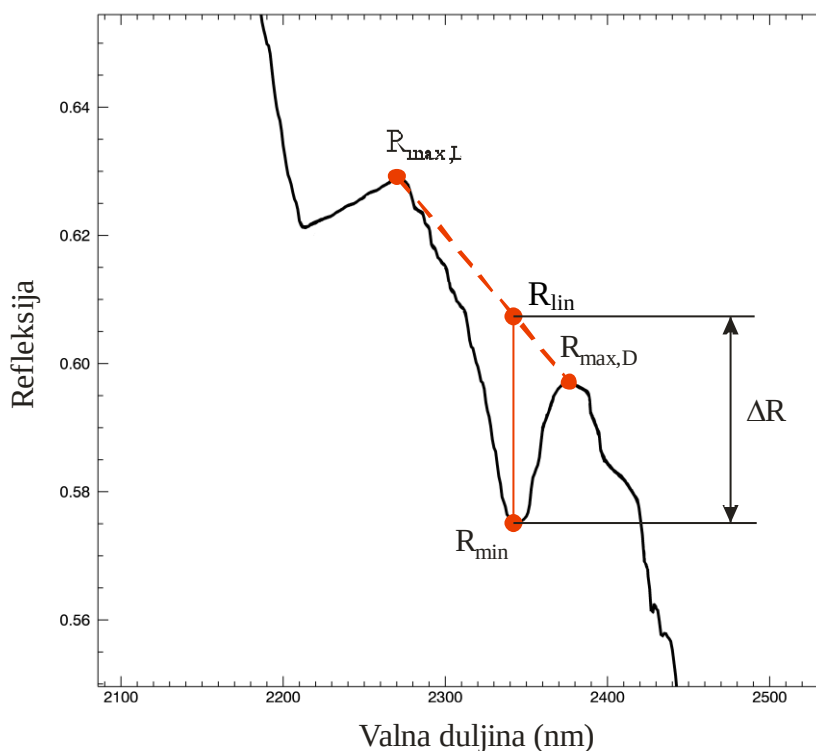
Analizom reflektance svakog uzorka utvrđen je iznos povećanja relativne apsorpcije elektromagnetskog zračenja u pojasu oko 2340 nm prema sljedećem izrazu:

$$A \equiv \Delta R = R_{\text{lin}} - R_{\text{min}} \quad (4.1)$$

gdje su:  $A$  - apsorpcija el. zračenja;  $\Delta R$  - smanjenje refleksije (budući nema transmisije povećanje apsorpcije  $A \equiv \Delta R$ );  $R_{\text{min}}$  - minimalni iznos refleksije na 2300 - 2350 nm;  $R_{\text{lin}}$  - iznos refleksije dobiven linearnom interpolacijom između susjedna dva refleksijska vrha definiran izrazom (grafički prikaz na slici 4.16.):

$$R_{\text{lin}} = R_{\text{max,L}} + \frac{R_{\text{max,D}} - R_{\text{max,L}}}{\nu_{\text{max,D}} - \nu_{\text{max,L}}} \cdot (\nu_{\text{min}} - \nu_{\text{max,L}}) \quad (4.2)$$

gdje su:  $R_{\text{max,L}}$  - maksimalni iznos refleksije 2200 - 2300 nm;  $R_{\text{max,D}}$  - maksimalni iznos refleksije 2350 - 2400 nm;  $\nu_{\text{max,D}}$ ,  $\nu_{\text{max,L}}$  i  $\nu_{\text{min}}$  - pripadajuće valne duljine zabilježenih maksimalnih odnosno minimalnih iznosa refleksije.



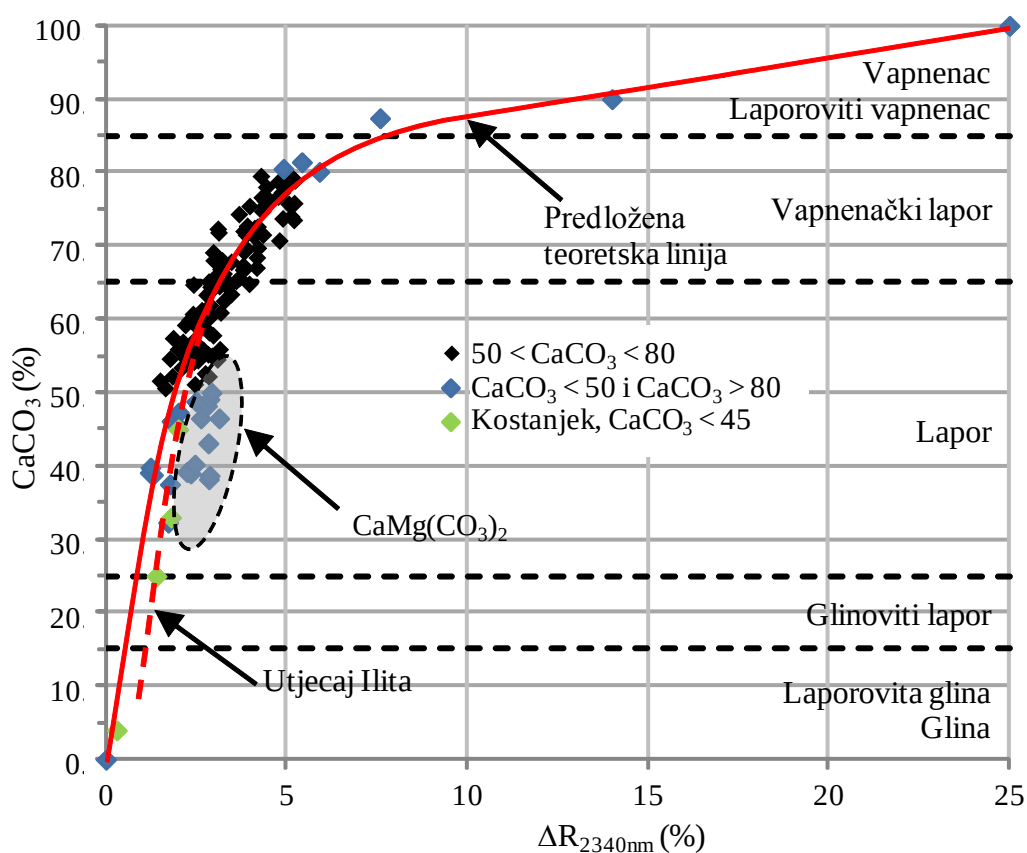
Slika 4.16. Prikaz smanjenja refleksije -  $\Delta R$  dobiven linearnom interpolacijom između dva susjedna refleksijska vrha

Prikupljanje spektralnih otisaka i udjela  $\text{CaCO}_3$  provedeno je na ukupno 149 uzoraka lapora s područja Dalmacije. Uzorci su grupirani u tri kategorije prema udjelu  $\text{CaCO}_3$ . Rasponi udjela  $\text{CaCO}_3$  i očitavanja apsorpcije za pojedinu kategoriju prikazani su u tablici 4.5.

Tablica 4.5. Raspon očitavanja apsorpcije u pojasu oko 2340 nm grupiran prema udjelu  $\text{CaCO}_3$ 

| $\text{CaCO}_3$ | Broj uzoraka (N=149) | $\Delta R_{\min}$ (%) | $\Delta R_{\max}$ (%) |
|-----------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| < 50%           | 19                   | 1,04                  | 3,15                  |
| 50 - 80%        | 125                  | 1,70                  | 5,42                  |
| > 80%           | 5                    | 5,04                  | 14,01                 |

Na slici 4.17. prikazan je odnos između udjela kalcita ( $\text{CaCO}_3$ ) i povećane apsorpcije u pojasu oko 2340 nm -  $\Delta R_{2340\text{nm}}$  za uzorke iz tablice 4.5. (potpuni rezultati u prilogu 8.3). Ukoliko razmotrimo razredbu karbonatnih stijena prema udjelu sadržaja kalcita i glinovitih sastavnica prema [15], moguće je primjetiti da se upotrebom očitavanja apsorpcije u pojasu oko 2340 nm jasno može razlučiti podjela na glinovita građiva (glinoviti lapor, laporovitu glinu i glinu), lapore, vapnenačke lapore i vapnence (uključujući laporovite vapnence). Jasno je uočljiv trend porasta apsorpcije s povećanjem udjela  $\text{CO}_3$  koji prati oblik logaritamske krivulje, osim pri malim i velikim koncentracijama kada uzima linearni oblik.

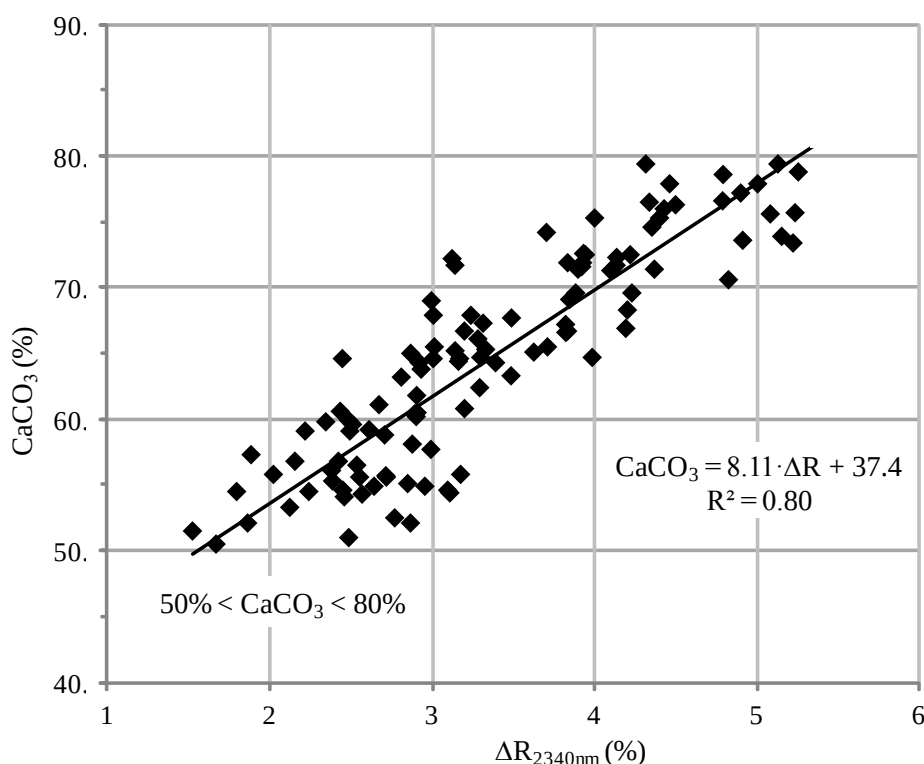


Slika 4.17. Odnos između udjela kalcita ( $\text{CaCO}_3$ ) i povećane apsorpcije u pojasu oko 2340 nm - ( $\Delta R_{2340\text{nm}}$ ). Prikazana je i razredbu karbonatnih stijena prema udjelu sadržaja kalcita i glinovitih sastavnica prema [15] (Tablica 1.1.)

Budući u ovom radu nisu razmatrani vapnenci za maksimalni iznos apsorpcije uzet je podatak za čisti kalcit iz baze USGS-a, koji je potvrđen na primjeru spektralnog otiska vapnenca iz Dalmacije prikazanog na slici 4.15.

Za lapore s udjelom  $\text{CaCO}_3$  manjim od 50% primjetno je značajnije raspršenje rezultata koje se pripisuje povećanom udjelu dolomita -  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  odnosno utjecaju ilita na spektralni otisak u ovom području. U zoni raspršenja odabrana su četiri uzorka na kojima je provedena mineraloška analiza prikazana u tablici 4.2. te je potvrđena prisutnost dolomita kao i veći udio minerala ilita u uzorcima UZ031 i UZ033 koji se nalaze u označenoj zoni raspršenja na slici 4.17. Dolomit se manifestira kroz vertikalni translatorsni pomak točke (budući nije registriran u udjelu karbonata zajedno s kalcitom), dok se ilit manifestira kroz blagi horizontalni translatorsni pomak točke. Iz tog razloga se uvijek preporučuje sagledati cjelokupni spektralni otisak prije procjene samo jedne sastavnice.

Na slici 4.18. prikazan je odnos između udjela kalcita i povećane apsorpcije u pojasu oko 2340 nm za uzorke s udjelom  $\text{CaCO}_3$  u rasponu od 50 - 80%. Linearna veza u ovom području definirana je s koeficijentom determinacije  $R^2=0,80$  i dok je logaritamska (prema slici 4.17.) definirana s koeficijentom determinacije  $R^2=0,79$ . Modeli i pripadne informacije prikazani su u tablici 4.6 i na slici 4.19.

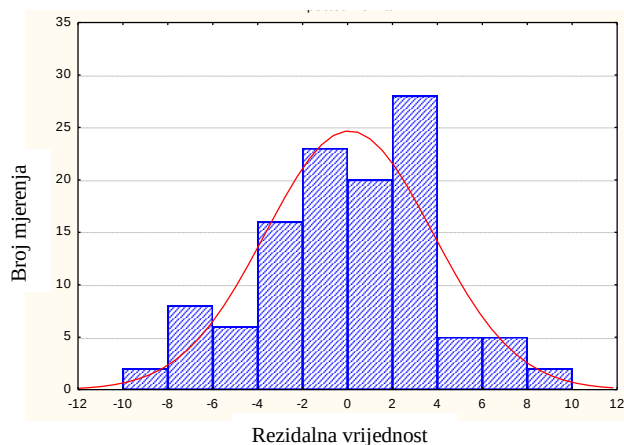


Slika 4.18. Odnos između udjela kalcita ( $\text{CaCO}_3$ ) i povećane apsorpcije u pojasu oko 2340 nm - ( $\Delta R_{2340\text{nm}}$ ) za uzorke s udjelom  $\text{CaCO}_3$  u rasponu od 50 - 80%.

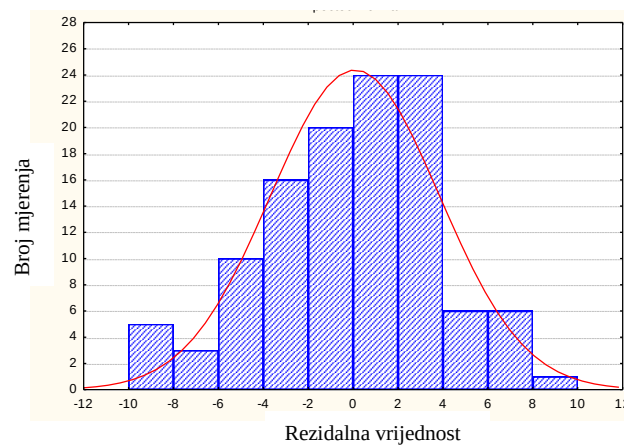


Tablica 4.6. Predviđene i rezidualne vrijednosti  $\text{CaCO}_3$  prema dva odabrana modela

|                       | Opazene<br>vrijednosti | Predviđene<br>vrijednosti | Rezidualna<br>vrijednost | Standardna dev.<br>predv. vrij. | Standardna<br>dev. rez. vrij. | Model                                              |
|-----------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------|
| Minimum               | 50,50                  | 49,54                     | -8,53                    | -1,95                           | -2,24                         | $\text{CaCO}_3 = 8,11 \cdot \Delta R + 37,4$       |
| Maksimum              | 79,90                  | 80,73                     | 9,45                     | 2,26                            | 2,48                          |                                                    |
| Srednja<br>vrijednost | 64,45                  | 64,45                     | -                        | -                               | -                             |                                                    |
| Medijan               | 64,70                  | 63,07                     | 0,37                     | -0,18                           | 0,10                          |                                                    |
| Minimum               | 50,50                  | 44,67                     | -9,42                    | -2,59                           | -2,44                         | $\text{CaCO}_3 = 26,38 \cdot \log \Delta R + 33,7$ |
| Maksimum              | 79,90                  | 78,50                     | 8,40                     | 1,84                            | 2,17                          |                                                    |
| Srednja<br>vrijednost | 64,45                  | 64,45                     | -                        | -                               | -                             |                                                    |
| Medijan               | 64,70                  | 64,13                     | 0,41                     | -0,04                           | 0,11                          |                                                    |



(a)



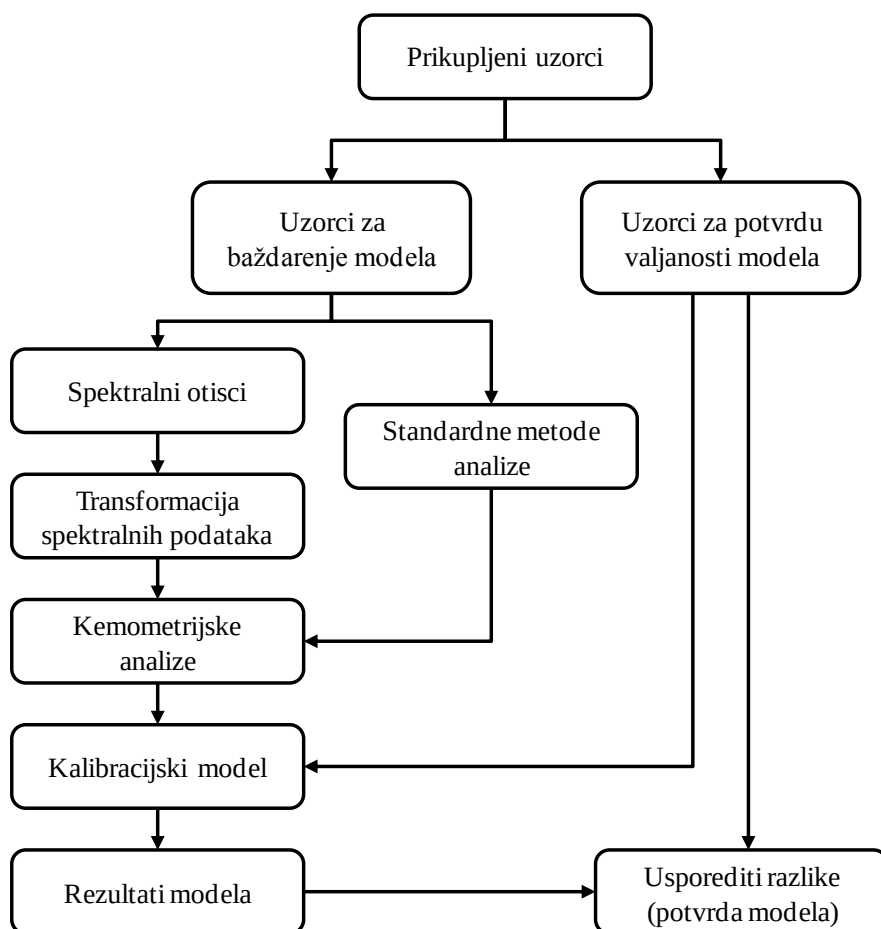
(b)

Slika 4.19. Distribucija rezidualnih vrijednosti u usporedbi s normalnom razdiobom: a) linearni model, b) logaritamski model.

#### 4.4.2. Analiza reflektance VIS-NIR spektra upotrebom kemometrijskih metoda

Kemometrija je disciplina nastala upotrebom statističkih i matematičkih metoda u kemiji 70-tih, koje u današnje vrijeme opisujemo kao kemometrijske metode. Razvoj kemometrije kao discipline počinje širom primjenom računala, koja predstavljaju novo doba u prikupljanju, obradi i tumačenju rezultata mjerenja u kemiji. Jedna od osnovnih uloga kemometrije je pojednostaviti složene matematičke modele i naći njihovu praktičnu primjenu. Odvojeno od statističkih i matematičkih metoda kemometrija se primjenjuje u automatizaciji laboratorija, na metode za upravljanje analitičkim i spektralnim bazama podataka i metodama umjetne inteligencije. [136]

Iako u ovom slučaju na raspolaganju imamo samo jednu zavisnu varijablu (udio  $\text{CaCO}_3$ ), spektralni zapis sadrži 2151 zapis u rasponu valnih duljina 350-2500 nm koje sve redom predstavljaju nezavisne varijable. Cilj ovog postupka jest ustanoviti model veza za prognozu udjela  $\text{CaCO}_3$  temeljem spektralnog otiska, a ista metodologija se može upotrebiti, po saznavanju reprezentativnog broja podataka, za bilo koju drugu zavisnu varijablu (npr. udio pojedinog minerala glina). Ilustracija korištenog postupka modeliranja prikazana je na slici 4.20.



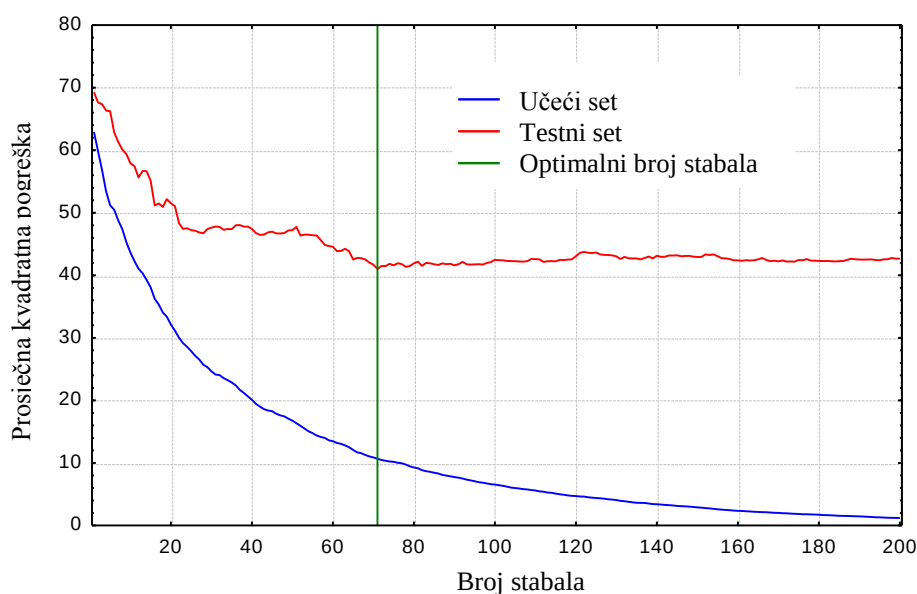
Slika 4.20. Koncept kreiranja modela temeljenog na spektralnoj analizi (izmijenjeno [137])

Za ustanovljavanje multivarijantnih relacijskih veza prethodno je potrebno izvršiti transformaciju spektralnih podataka. U ovom slučaju korištena je prva derivacija uz upotrebu Savitzky-Golay algoritma [138]. Savitzky-Golay algoritam temelji se na umetanju polinoma nižeg reda oko svake točke u spektru metodom najmanjih kvadrata, pri čemu se povećava omjer signala i šuma, bez velikog iskrivljenja signala. Derivacije spektralnog otiska se koriste za smanjenje posljedica raspršenja zračenja uslijed geometrije uzorka, hrapavosti površine i za lociranje pojaseva apsorpcije koji ne bi bili primjetni na originalnim otiscima. Spektralna područja do 400 nm i iznad 2480 nm uklonjena su zbog velikog utjecaja šuma instrumenta. U analizama je korištena svaka peta valna duljina kako bi se smanjila količina podataka te se na taj način olakša složena statistička analiza.

U nastavku su prikazani rezultati analize mogućnosti procjene udjela  $\text{CaCO}_3$  koristeći tehnike regresijskih stabala (eng. „Boosted regression trees“) [139] uz upotrebu modela prema Friedmanu [140 i 141] i neuralnih mreža (eng. „Artificial neural network“) [142] izrađeni u statističkom paketu Statistica 8 (StatSoft, Inc., SAD).

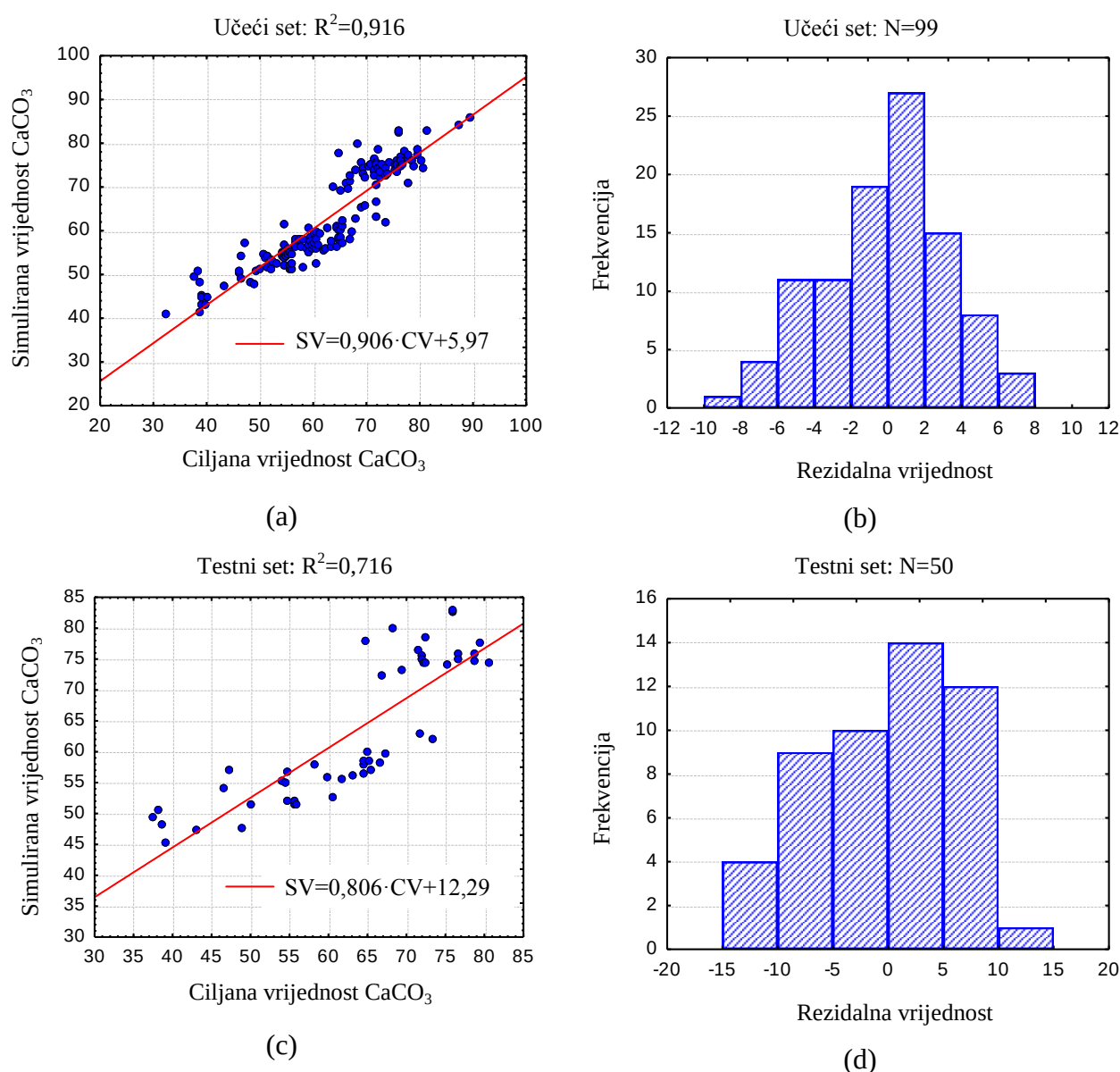
### Regresijska stabla (eng. „Boosted regression trees“)

Regresijsko stablo se dobiva „učanjem“ na podacima, na način da se vrši grananje izvornog skupa podataka u podskupove na temelju testiranja vrijednosti varijabli. Proces se ponavlja na svakom izvedenom podskupu na rekurzivni način. Rekurzija je završena kada podskup određenog čvora ima sve iste vrijednosti izlazne varijable ili kada daljnje grananje više ne pridonosi poboljšanju rezultata [143].



Slika 4.21. Odnos između kvadrata prosječne pogreške i broja stabala korištenih za definiranje modela

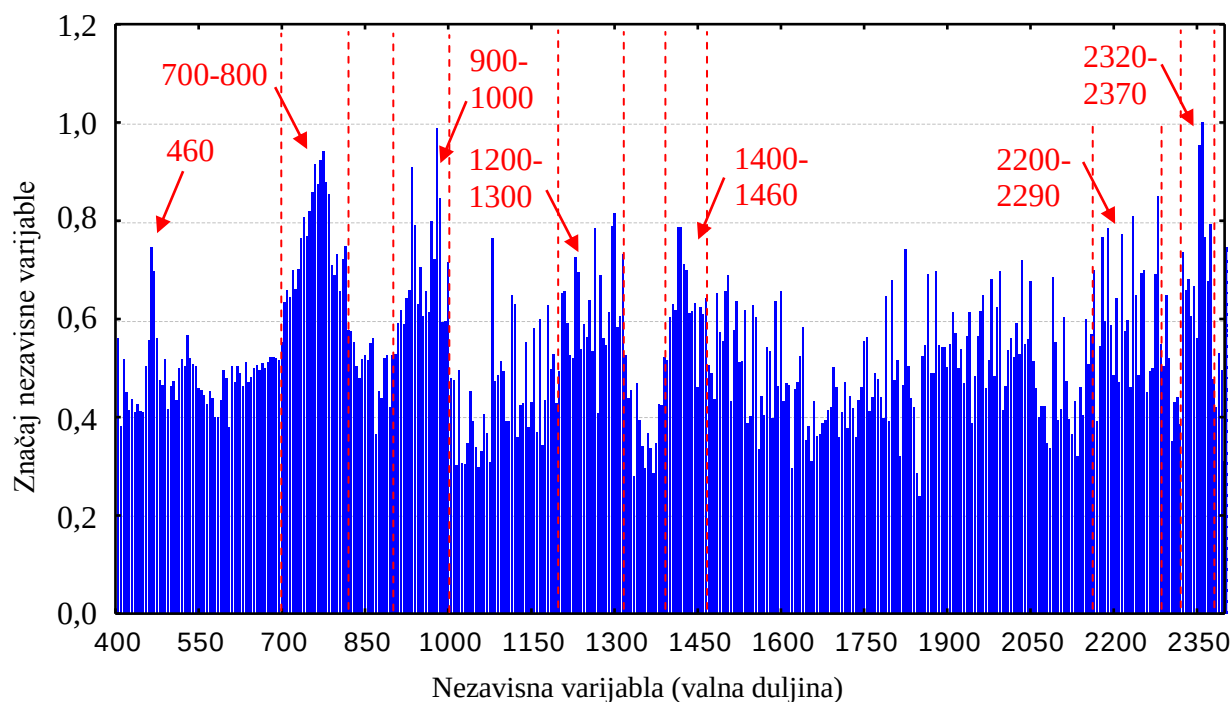
Na slici 4.21. prikazana je prosječna kvadratna pogreška modela u odnosu broj stabala. Moguće je primjetiti da se povećanjem složenosti modela smanjuje pogreška modela na podacima korištenim za učenje. Istovremeno pogreška istog modela na podacima za testiranje u početku pada. Nakon određenog stupnja složenosti modela, model počinje memorirati pogreške iz tablice iz koje uči. Zbog toga raste pogreška razvrstavanja podataka za testiranje. Odabire se model koji ima najmanju pogrešku na podacima za testiranje, u ovom slučaju model sa 71 stablom. Na slici 4.22. prikazana je regresija između ciljanih i simuliranih vrijednosti  $\text{CaCO}_3$  za učeći i testni set podataka, kao i histogrami reziduala.



Slika 4.22. Rezultati analize regresijskih stabala: a) Regresijska veza za učeći set podataka, b) Histogram rezidualnih vrijednosti za učeći set podataka, c) Regresijska veza za testni set podataka, d) Histogram rezidualnih vrijednosti za testni set podataka

U ovom slučaju učeći set sadrži 99 podataka, a testni set 50 podataka. Na slici 4.22.c i d moguće je primjetiti da rezidualne vrijednosti (odstupanja od modela) iznose do oko 10% što je, s obzirom na točnost usporedne metode (kalcimetrije) i složenost lapora kao prirodnog gradiva, za procjenu samo jedne sastavnice ( $\text{CaCO}_3$ ) izrazito zadovoljavajuće.

Na slici 4.23. prikazan je histogram značajnosti nezavisnih varijabli za definirani model, pri tome skala je definirana od 0 (nema značaja) - 1 (izrazito značajna).



Slika 4.23. Histogram značajnosti nezavisnih varijabli za definirani model

Analizirajući slike 4.8., 4.9. i 4.13. gdje su prikazani spektralni otisci uzoraka s područja Splita i Medvednice, kao i slike 4.15. na kojoj je prikazan spektralni otisak kalcita, moguće je obrazložiti neke od dominantnih vrhova na slici 4.23. koji ukazuju na značaj pojedine valne duljine u modelu regresijskog stabla. Pritom je potrebno uvažiti da su ulazni podaci prve derivacije spektralnog otiska, kao mjere nagiba na prikazanoj valnoj duljini. Zona 2320-2370 nm je najvažnija (značaj je 1,0) što je i jasno budući je to položaj  $3\nu_3$  (Tablica 4.4.). Zona 2200-2290 nm također se može pripisati utjecaju kalcita (Slika 4.15.), ali i utjecaju aluminijevog hidroksida (Slika 4.7.), jednako kao i zone 1400-1460 nm i 1200-1300 nm budući iste ovise o ukupnom masenom odnosu kalcita i gline. Zone 900-1000 nm i 700-800 nm odgovaraju apsorpcijskim pojasevima  $\text{Fe}^{2+}$ , budući u vidljivom dijelu spektra kalcit nema apsorpcijskih vrhova (horizontalna linija) značaj ovih zona podupire tezu da katione željeza sadržavaju minerali ilita ili smektita, stoga i ove zone možemo pripisati masenom odnosu kalcita i gline. Značaj valne duljine na 460

nm koincidira s naglim povećanjem apsorpcije na spektralnom otisku kalcita te ga nedvojbenom možemo pripisati njegovom utjecaju.

### Neuralne mreže (eng. „Artificial neural network“)

Uz pojam učenja umjetne neuralne mreže vezani su pojmovi iteracije epohe. Pod iteracijom podrazumijevamo korak u algoritmu postupka za učenje u kojem se odvija podešavanje težinskih faktora, dok je epoha jedno predstavljanje cjelokupnog skupa za učenje. Skup podataka za učenje dijeli se na tri odvojena seta: set za učenje, set za testiranje i set za provjeru (validaciju). [142]

Podaci iz prvog seta služe za učenje u užem smislu (podešavanje težinskih faktora). Pomoću podataka iz seta za testiranje vrši se provjera rada mreže tijekom učenja s trenutnim težinskim faktorima kako bi se postupak učenja zaustavio u trenutku degradacije performanse mreže. Umjetnu neuralnu mrežu moguće je pretrenirati, stoga se stalnim praćenjem izlaza iz mreže dobivenog pomoću podataka iz seta za testiranje definira iteracija u kojoj dobiveni izlaz najmanje odstupa od željenog. Točnost i preciznost obrade podataka u konačnici se provjerava skupom za provjeru.

U ovom radu korišten je MLP tip mreže [144] (eng. „Multi Layer Perceptor“ ili višeslojni perceptor) koji ima tri vrste slojeva, a to su: ulazni sloj, izlazni sloj te skriveni slojevi. Najbolje rješenje daje MLP 417-87-1 mreža (417 ulaznih podataka - nezavisnih varijabli tj. valnih duljina, 87 skrivenih neurona i jedan izlazni podatak -  $\text{CaCO}_3$ ) sa svojstvima prikazanim u tablici 4.7.

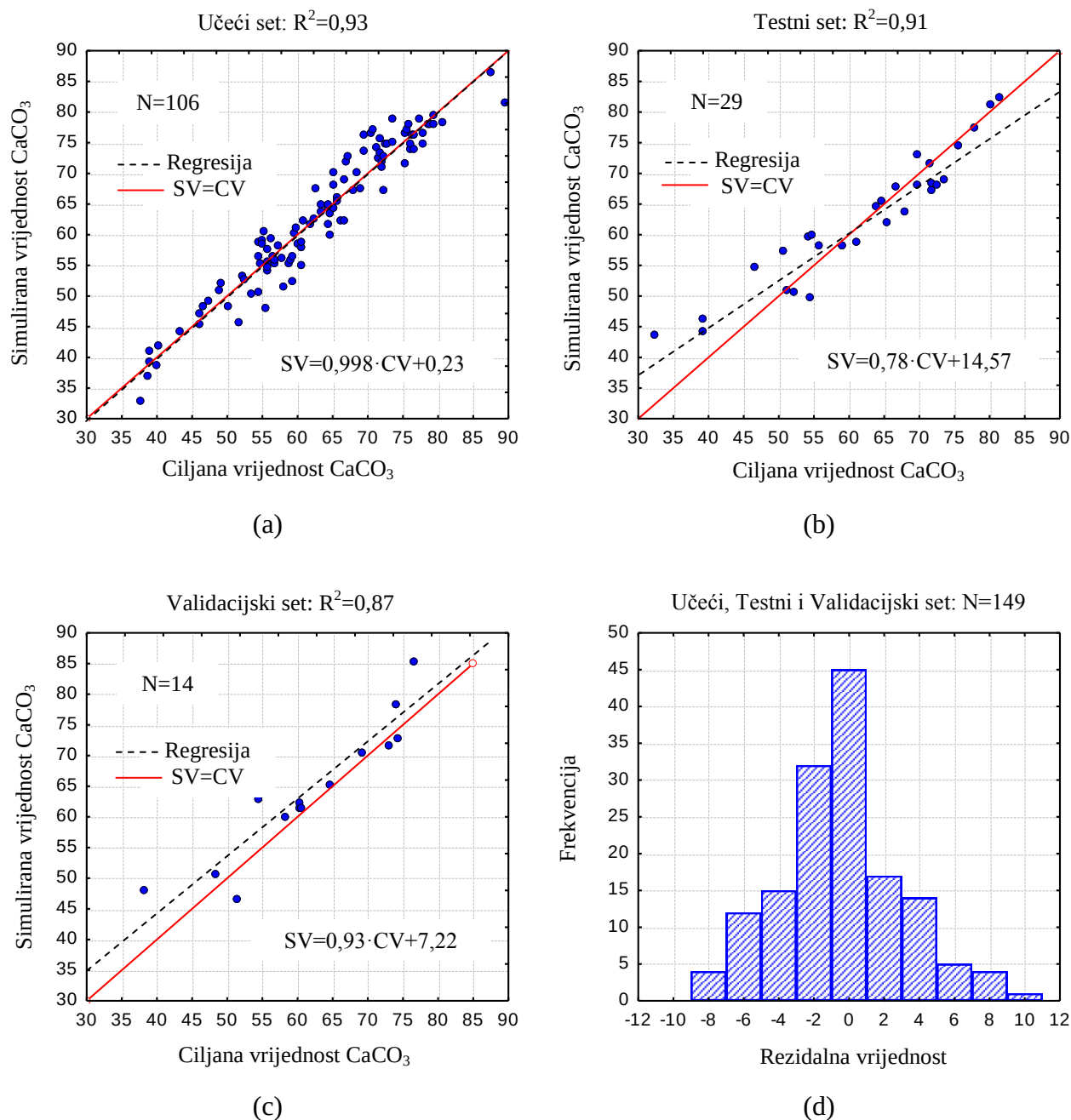
Tablica 4.7. Karakteristike usvojene neuralne mreže

| Naziv mreže  | Algoritam treniranja | Prijenosna funkcija<br>u skrivenom sloju | Prijenosna funkcija u<br>skrivenom sloju |
|--------------|----------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| MLP 417-87-1 | BFGS 27              | <i>Identity</i>                          | <i>Tanh</i>                              |

Upotrebom BFGS algoritma („Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno algorithm“) [145] za treniranje mreže najbolje performanse procesa validacije konstruirane mreže dobivene su za 27. epohe uz srednju kvadratnu pogrešku 0,00415 (pogreška treniranja iznosi 0,00175 i testiranja 0,00340). Nakon 27 epoha treniranja mreže, treniranje se prekida jer se daljnjim treniranjem mreže rezultati simulacije ne poboljšavaju. Na slici 4.24. prikazane su regresijske veze između ciljanih i simuliranih vrijednosti za učeći, testni i validacijski set.

Moguće je primjetiti da koeficijenti determinacije za učeći, testni i validacijski set ukazuju na vrlo visoku povezanost ( $R^2$  redom iznosi 0,93; 0,91 i 0,87) dok kod analize dominantnog

apsorpcijskog vrha za kalcit u NIR spektru ukazuju na značajnu povezanost ( $R^2=0,80$ ; ali samo za  $50 < \text{CaCO}_3 < 80$ ; Slika 4.18.) iako, i u ovom slučaju, najveća odstupanja na testnom setu se bilježe za uzorke s udjelom  $\text{CaCO}_3$  manjim od 50%.



Slika 4.24. Rezultati analize neuralnom mrežom: a) Regresijska veza za učeći set podataka, b) Regresijska veza za testni set podataka, c) Regresijska veza za validacijski set podataka, d) Histogram rezidualnih vrijednosti za sve podatke

Na ovaj način je dokazano da istreniranom neuralnom mrežom možemo ponuditi kvalitetan postupak predviđanja mjerenih parametara  $\text{CaCO}_3$  na temelju cijelog spektralnog otiska lapora.

## 4.5. Diskusija i zaključci

Primjena VIS-NIR spektrometrije u geološkim i geotehničkim zadacima, ponajprije kroz identifikaciju kemijskog i mineraloškog sastava, je vrlo aktualna zadaća, naravno uz prethodno razumjevanje osnova tehnologije, naprednih statističkih alata te metoda interpretacije kemijskih i mineraloških značajki promatranog gradiva ili procesa u gradivu. Pritom je važno napomenuti da se upotrebom ove tehnologije dobivaju značajne informacije o mineraloškom sastavu s vrlo malo (čak i bez) prethodne pripreme uzorka, odnosno uništavanja uzoraka, što je uz dugi period obrade i često slabu dostupnost (uz visoku cijenu) glavna mana klasičnih metoda određivanja mineraloškog sastava stijene.

VIS-NIR spektrometrija se već etablirala kao alat za identifikaciju pojedinih klasa minerala. Neke od zapaženijih mogućnosti su: diferencijacija karbonatne skupine minerala (moguće je razlikovati kalcit, dolomit ili aragonit) [132], detekcija hidroksidne skupine (anorganskih spojeva raznih metalnih kationa i hidroksilnih aniona OH<sup>-</sup>) [125], analiza mineralogije glina [146], željeznih oksida, sulfata [68], i td. Analiza prethodno navedenih zadaća se temelji na kvalitativnoj analizi spektralnih otisaka uz upotrebu spektralnih biblioteka kao npr. USGS-ove [69], ali i kroz kreiranje vlastitih.

U ovom poglavlju analizirana je sedimentna stijena - lapor, kao gradivo koje predstavlja složenu prirodnu mješavinu u različitim omjerima prethodno navedenih skupina. Spektralni otisak tog gradiva je produkt preklapanja spektralnih osobina ulaznih sastavnica. Pritom refleksijski i apsorpcijski vrhovi najčešće nemaju jasno izražene linearne veze kao „čista“ gradiva, već poprimaju nelinearne veze s masenim udjelom pojedine promatrane sastavnice. U ovom radu izvršena je analiza udjela karbonata (CaCO<sub>3</sub>) na 149 uzoraka lapora te je zaključeno da je veza između udjela karbonata i karakterističnog apsorpcijskog vrha uistinu nelinearna (Slika 4.17.), ali i da se za određene raspone može aproksimirati linearnom. Uočena veza između povećanja apsorpcije i udjela CaCO<sub>3</sub> opisana je teoretskom linijom koja se, u rasponu 50% < CaCO<sub>3</sub> < 80%, može neposredno procijeniti s izrazom:

$$\text{CaCO}_3 = 8,11 \cdot \Delta R + 37,4 [\%] \quad (4.3)$$

Pri manjim udjelima karbonata (CaCO<sub>3</sub>) složenost samog gradiva dolazi do izražaja te nije preporučljivo koristiti kvantifikacijske metode na spektralnom otisku, bez potpune analize cijelog spektralnog otiska, dok se pri većim udjelima radi o vapnenačkoj stijeni za koju je vezu potrebno dodatno potvrditi.



S druge strane, sama činjenica da je dostupan cijeli spektralni otisak visoke rezolucije te cijeli niz statističkih alata za njegovu obradu, upotreba tih alata (odnosno kemometrijskih metoda), je sljedeći logičan korak. Pri tome se koriste dodatne metode obrade podataka upotrebom algoritama za filtriranje te derivacija (bilo prve ili druge) za eliminiranje neželjenih efekata pri prikupljanju spektralnih otisaka. U ovom radu korišten je Savitzky-Golay algoritam i prva derivacija spektra. Upotreba regresijskih stabala i neuralnih mreža na tako pripremljenim podacima polučila je uspjeh posebice kroz validaciju utreniranih modela (kod neuralne mreže postignut je vrlo visoki koeficijent determinacije na validacijskom setu od  $R^2=0,87$ ).

Kvalitativna analiza cijelog spektra, s ciljem potvrde mogućnosti diferencijacije udjela glina prema sprektalnom otisku, urađena je na ukupno deset uzoraka s područja Dalmacije i Medvednice. Tom analizom potvrđeno je da se na spektralnom otisku moguće uočiti promjene koje proizlaze iz varijacije masenih udjela sastavnica gradiva (ponajprije tipa gline). Uz reprezentativno uzorkovanje i statistički značajniji uzorak, s paralelno urađenim analizama klasičnim metodama kao i u slučaju  $\text{CaCO}_3$ , upotrebom kemometrijskih metoda mogu se izraditi prognozni modeli i za ostale sastavnice lapora (npr. udio pojedinog minerala glina), ali i za indekse trajnosti kod kojih mineraloški sastav ima dominantnu ulogu (npr. LSI).

Dobiveni rezultati imaju značajnu uporabnu vrijednost u daljnjem izučavanju ovog tipa gradiva, primjerice:

- Kod analize stupnja rastrošbe stijenske mase po dubini, uz dvije moguće varijante. Prva varijanta uključuje sagledavanje procesa rastrošbe lapora u inženjerskoj vremenskoj skali, npr. analizirati dubinu do koje je rastrošba zahvatila kosinu ili zasjek sačinjenu isključivo od stijenskog materijala te analizirati moguće posljedice na trajnost i stabilnost istih. Druga varijanta je sagledavanje cijelog procesa trošenja stijene do konačnog produkta u vidu laporovitog tla s organskim primjesama.
- Za analizu mineraloškog sastava stijene in situ. Upotrebom spektrometrije moguće je brzo (i praktično neograničeno mnogo puta) doznati sastav stijene (mineraloški) neposredno na terenu te na osnovu njega procijeniti podložnost stijene rastrošbi.

## **5. MODELIRANJE EROZIJE ZASJEKA U MEKOJ STIJENI**

U ovom poglavlju prikazani su rezultati terenskih opažanja promjene geometrije zasjeka u mekoj stijeni uslijed kombiniranog utjecaja rastrošbe i erozije. Terenska opažanja vršena su na pilot lokaciji Žnjan od izrade zasjeka (2002.) te su dovršena trogodišnjim opažanjem terestičkim laserskim skeniranjem. Na temelju terenskih opažanja, na navedenoj i nizu drugih lokacija sa šireg područja Splita, izvršena je provjera uporabivosti prikazanih matematičkih modela kao osnova za buduće prognoze promjene geometrije zasjeka u ovom tipu stijena.

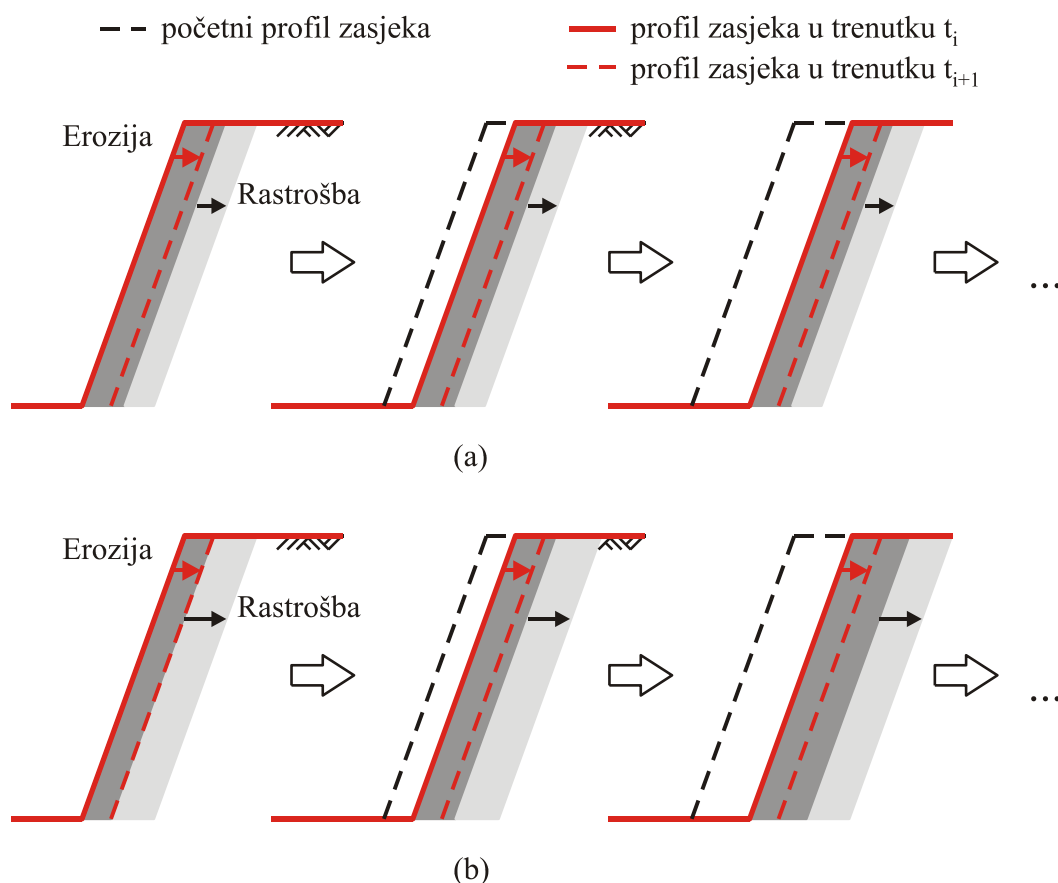
### **5.1. Uvod**

Za analizu promjene geometrije zasjeka oblikovanih u laporu, važnu ulogu ima dubina do koje je naslaga zahvaćena utjecajem rastrošbe, mjereno od slobodne površine pokosa. Budući se procesi rastrošbe i erozije odvijaju istovremeno, njihova kombinacija uzrokovati će daljnje raspadanje bilo koje stijenske mase kada je zasječena, naravno uz dodatan utjecaj rasterećenja stijenske mase kroz preraspodjelu naprezanja. Pri tome relativni odnos erozije i rastrošbe značajno utječe na vremenski tok promjene profila zasjeka.

Iako se eroziju najčešće povezuje s oslabljenim i rastrošenim tлом ili stijenom, ona djeluje i na čvrstim nerastrošenim površinama tla, naravno s manjim intezitetom. Uspoređujući intezitet djelovanja erozije i rastrošbe na zasjeka u stijenskoj masi moguće je primjetiti tri osnovna odnosa navedenih procesa:

- Neravnoteža odnosa u korist erozije.
- Ravnoteža između erozije i rastrošbe.
- Neravnoteža odnosa u korist rastrošbe.

Na slici 5.1. prikazan je slučaj ravnoteže erozije i rastrošbe, koji osigurava ravnomjeran vremenski tok promjene profila zasjeka.



Slika 5.1. Primjer razgradnje zasjeka za slučaj: a) ravnoteže erozije i rastrošbe; b) neravnoteže u korist rastrošbe (svijetlo sivo - rastrošeni materijal, tamno sivo - ostatak iz prethodnog intervala rastrošbe). [100]

Prema [100] potencijalni odnosi erozije i rastrošbe ovise o stanju trošnosti stijene neposredno nakon iskopa te se ovisno o njihovom odnosu mogu svrstati u pet osnovnih situacija kao što je prikazano u tablici 5.1.

S obzirom na tip gradiva i klimatske značajke područja istraživanja (poglavlje 1.4.2.) razumno je pretpostaviti da u području Dalmacije odnos procesa varira u rasponu od ravnoteže erozije i rastrošbe do neravnoteže u korist rastrošbe, tj. da se erozija uvijek odvija na rastrošenom gradivu koje sačinjava zasjek.

Tablica 5.1. Potencijalni odnosi erozije i rastrošbe zasjeka.

| Odnos procesa                         | Opis                                                                       | Stanje u trenutku iskopa                        | Ukupna dubina rastrošenog sloja             | Intezitet rastrošbe na površini zasjeka              |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Neravnoteža odnosa u korist erozije   | Samo erozija, bez rastrošbe                                                | Nema rastrošenog gradiva iz prethodnog koraka   | 0                                           | Konstantan                                           |
|                                       |                                                                            | Postoji rastrošeno gradivo iz prethodnog koraka | Smanjuje se dok se ne erodira, nakon toga 0 | Smanjuje se dok se ne erodira, nakon toga konstantan |
|                                       | Manji udio rastrošbe, erozija penetrira u dubinu zasjeka brže od rastrošbe | Nema rastrošenog gradiva iz prethodnog koraka   | 0                                           | Konstantan                                           |
|                                       |                                                                            | Postoji rastrošeno gradivo iz prethodnog koraka | Smanjuje se dok se ne erodira, nakon toga 0 | Smanjuje se dok se ne erodira, nakon toga konstantan |
| Ravnoteža između erozije i rastrošbe  | Erozija i rastrošba penetriraju u dubinu zasjeka istom brzinom             | Nema rastrošenog gradiva iz prethodnog koraka   | 0                                           | Konstantan                                           |
|                                       |                                                                            | Postoji rastrošeno gradivo iz prethodnog koraka | Konstantan, veći od 0                       | Konstantan                                           |
| Neravnoteža odnosa u korist rastrošbe | Manji udio erozije, erozija penetrira u dubinu zasjeka brže od rastrošbe   | Nema rastrošenog gradiva iz prethodnog koraka   | Povećava se                                 | Povećava se                                          |
|                                       |                                                                            | Postoji rastrošeno gradivo iz prethodnog koraka | Povećava se                                 | Povećava se                                          |
|                                       | Samo rastrošba, bez erozije                                                | Nema rastrošenog gradiva iz prethodnog koraka   | Povećava se                                 | Povećava se                                          |
|                                       |                                                                            | Postoji rastrošeno gradivo iz prethodnog koraka | Povećava se                                 | Povećava se                                          |

Opažanjem zasjeka u flišnoj stijenskoj masi na području Dalmacije uočeno da se rastrošba (uz dominantni utjecaj sušenja i vlaženja) najčešće očituje na dva načina.

U prvom redu proces se razvija na samoj izloženoj površini što za posljedicu ima konstantno „ljuštenje“ gradiva s površine (slika 5.2.). Transportiran gravitacijom i oborinama, rastrošeni, površinski dio stijenske mase se nakuplja u podnožju kosine, gdje se tijekom vremena raspada u tlo (glinoviti prah). Taj proces ima više utjecaj na cijenu održavanja objekta nego na globalnu stabilnost. Nakupljeni materijal na dnu kosine treba redovito uklanjati. Kosina se „udaljava“ od prvobitne nožice, a estetski nakupljeni materijal predstavlja neuređen prostor. Opažanjem izvedenih zasjeka (iskopom površine) i laboratorijskim pokusima na uzorcima uočeno je da se utjecaj rastrošbe na površini pokosa može razviti do dubine od nekoliko centimetara do desetak centimetara [1, 59]. Dubina utjecaja ovisi o odnosu udjela karbonatne i glinovite komponente lapora, položaju međuslojnih i sekundarnih pukotina u odnosu na položaj pokosa, nagibu pokosa odnosno „brzini“ odnošenja komada i čestica s površine. Pri tome ukupna debljina površinskog sloja koji se odvaja tijekom vremena, ovisi i o meteorološkim uvjetima, odnosno o broju sušnih i kišnih razdoblja, o količini i intenzitetu oborina, izloženosti kosine prema suncu te o promjeni temperature zraka na području na kojem se kosina nalazi.

Osim na površini, proces rastrošbe se širi i dublje u stijensku masu i to kroz sustav pukotina kroz koje se voda može procjeđivati. Na slici 5.2.c mogu se uočiti vlažne zone u okolini pukotina, dok je osnovna stijena „suha“. Klizanja i rastrošba uzrokovana procjeđivanjem kroz pukotine u dubinu mase mogu se, na prikazanom primjeru, uočiti na lijevoj strani pokosa. Tijekom vremena došlo je do klizanja nekoliko većih blokova oblikovanih po pukotinama kroz koje se procjeđivala voda. Na slikama 5.2.g i 5.2.h strelicom je označen položaj područja odranjanja po sekundarnoj pukotini. Dogradnja betonske zaštitne konstrukcije sa svrhom zaštite objekta iznad pokosa, čiji su temelji postali ugroženi razvojem rastrošbe i promjenom profila kosine ispod temelja, provedena je 2004. i 2010. godine (Slike 5.2.b. i 5.2.e). Utjecaj rastrošbe na pojavu lokalne nestabilnosti u ovom radu se neće dodatno razmatrati.

U oglednom slučaju je iskop izvršen vrlo povoljno u odnosu na međuslojne pukotine, odnosno izvršen je okomito na međuslojne pukotine. Količina raspadnutog gradiva koja je erodirana s površine pokosa, može se jasno uočiti pri dnu pokosa. Taj odloženi ostatak u nekoliko je navrata tijekom godina opažanja i uklanjan. „Debljina“ površinskog dijela pokosa koji je rastrošbom nestao s površine može se dobro uočiti kao promjena duljine „konzole“ čvršćih slojeva pješčenjaka koji vire s površine pokosa, a koji su prvobitno iskopani do istog lica kao i okolni slojevi lapora, ali nisu podložni rastrošbi u „inženjerskoj skali vremena“.



(a) 2003.  
(godina dana nakon iskopa)



(b) 2004.  
(izrada zaštitne konstrukcije - I. faza)



(c) 2006.  
(procjeđivanje kroz sekundarne pukotine)



(d) 2007.



(e) 2010.  
(izrada zaštitne konstrukcije - II. faza)



(f) 2011.



(g) 2012.  
(početak odrona po sekundarnoj pukotini)

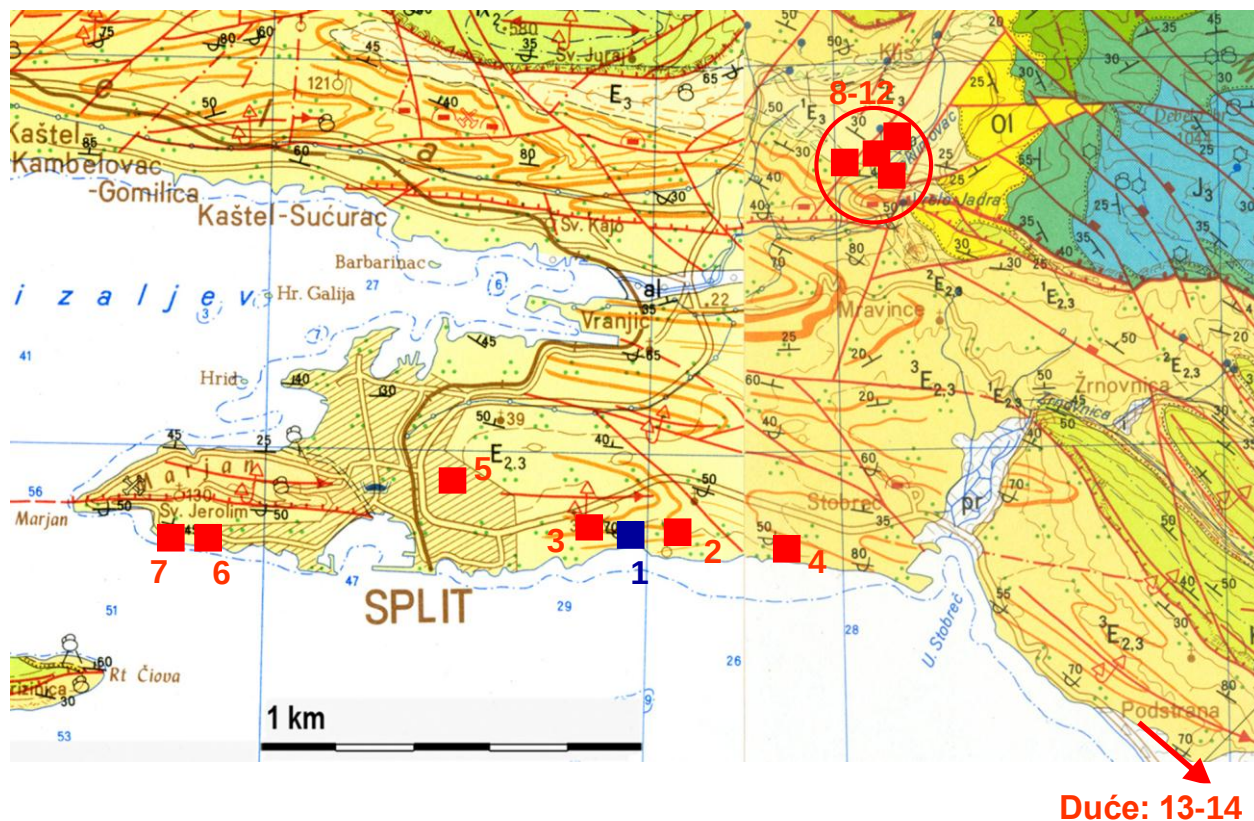


(h) 2014.  
(nastavak odronjavanja)

Slika 5.2. Zasjek na pilot lokaciji Žnjan u Splitu u razdoblju od 2003. do 2014. godine



S ciljem određivanja brzine napredovanja erozije zasjeka u području istraživanja odabrana su pilot područja prikazana na slici 5.3. Na ukupno 14 lokacija u širem području grada Splita, s različitim geološkim postavkama, orijentacijama zasjecanja i uslojenosti, izvršeno je opažanje terestičkim laserskim skenerom.



Slika 5.3. Položaj pilot lokacija - zasjeka na osnovnoj geološkoj karti za šire područje grada Splita (OGK 1:100.000, list Split i Omiš)

Oznake pilot lokacija: 1 - „Žnjan 1“; 2 - „Žnjan 2“; 3 - „Trstenik 1“; 4 - „Duilovo 1“; 5 - „Gripe 1“; 6 - „Kaštelet 1“; 7 - „Kaštelet 2“; 8 - „10. kolovoz 1“; 9 - „10. kolovoz 2“; 10 - „10. kolovoz 3“; 11 - „10. kolovoz 4“; 12 - „10. kolovoz 5“; 13 - „Duće 1“; 14 - „Duće 2“

Osnovni podaci o pilot lokacijama prikazani su u tablici 5.2., dok su fotografije prikazane u nastavku na slikama 5.4. i 5.5.

Kao glavni cilj provedenog opažanja postavlja se određivanje količine erodiranog materijala (odnosno brzine napredovanja erozije), međutim kao ne manje važan specifični cilj nameće se i definiranje parametra stalne rastresitosti stijenskog materijala, kao osnovnog parametra kod svih poznatih matematičkih modela definiranja profila zasjeka uslijed erozije istih u vremenu.

Tablica 5.2. Osnovni podaci o pilot lokacijama i zasjecima.

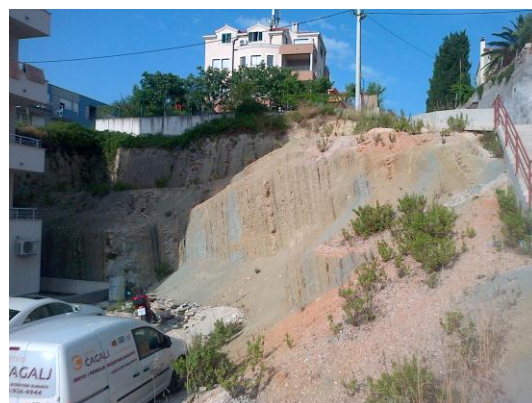
| Oznaka pilot lokacije | Orientacija zasjeke<br>$\alpha_z/\beta_z$ | Orientacija međuslojnih pukotina<br>$\alpha_{mp}/\beta_{mp}$ | Visina H (m)     | Razdoblje u kojem je izvršeno opažanje | Prostorna koordinata (geografska širina i dužina) | Napomena                 |
|-----------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------|
| Žnjan 1               | 255°/79°                                  | 180°/58°<br>180°/74°                                         | 7,7<br>(5,6-9,8) | ožujak 2012.<br>- rujan 2014.          | 43°30'13.04"N<br>16°28'40.51"E                    | Sekundarni p.s. 280°/63° |
| Žnjan 2               | 270°/73°                                  | 170°/80°                                                     | 5,0              | ožujak 2014.<br>- rujan 2014.          | 43°30'23.44"N<br>16°29'10.05"E                    |                          |
| Trstenik 1            | 161°/90°                                  | 170°/90°                                                     | 4,0              | ožujak 2014.<br>- rujan 2014.          | 43°30'16.23"N<br>16°28'27.80"E                    |                          |
| Duilo 1               | 190°/55-60°                               | 5°/25°                                                       | 25,0             | ožujak 2012.<br>- rujan 2014.          | 43°30'7.85"N<br>16°29'52.30"E                     | Prirodni klif            |
| Gripe 1               | 95°/74-80°                                | 180°/85°                                                     | 5,5              | ožujak 2014.<br>- rujan 2014.          | 43°30'29.41"N<br>16°26'59.30"E                    |                          |
| Kaštelet 1            | 165°/68°                                  | 30°/45°                                                      | 16,0             | ožujak 2014.<br>- rujan 2014.          | 43°30'13.75"N<br>16°24'55.98"E                    |                          |
| Kaštelet 2            | 142°/79°                                  | 30°/45°                                                      | 6,3<br>(3,5-7,5) | ožujak 2014.<br>- rujan 2014.          | 43°30'11.32"N<br>16°24'50.23"E                    |                          |
| 10. kolovoz 1         | 130°/72°                                  | 30°/40°                                                      | 12,0             | ožujak 2014.<br>- rujan 2014.          | 43°32'45.61"N<br>16°30'18.66"E                    |                          |
| 10. kolovoz 2         | 230°/65°                                  | 25°/30°                                                      | 7,5              | ožujak 2014.<br>- rujan 2014.          | 43°32'42.34"N<br>16°30'29.33"E                    |                          |
| 10. kolovoz 3         | 285°/77°                                  | 10°/40°                                                      | 7,0              | ožujak 2014.<br>- rujan 2014.          | 43°32'37.98"N<br>16°30'30.14"E                    |                          |
| 10. kolovoz 4         | 210°/78°                                  | 25°/40°                                                      | 13,0             | ožujak 2014.<br>- rujan 2014.          | 43°32'50.45"N<br>16°30'25.89"E                    |                          |
| 10. kolovoz 5         | 210°/78°                                  | 30°/35°                                                      | 22,5             | ožujak 2014.<br>- rujan 2014.          | 43°32'47.51"N<br>16°30'33.30"E                    | Sekundarni p.s. 180°/45° |
| Duće 1                | 190°/69°                                  | 140°/60°                                                     | 4,0              | travanj 2012.<br>- rujan 2013.         | 43°26'31.97"N<br>16°39'2.53"E                     | Opažanje ometeno N/A     |
| Duće 2                | 90°270°/<br>45°-65°                       | 140°/60°                                                     | do 100,0         | travanj 2012.<br>- rujan 2014.         | 43°26'33.14"N<br>16°39'3.05"E                     | Prirodna ogolina         |

Napomena:  $\alpha$  - smjer nagiba;  $\beta$  - nagib.





(a) „Žnjan 1“



(b) „Žnjan 2“.



(c) „Trstenik 1“



(d) „Duilovo 1“



(e) „Gripe 1“



(f) „Kaštelet 1“



(g) „Kaštelet 2“

Slika 5.4. Pilot lokacije (I. dio)





(a) „10. kolovoz 1“



(b) „10. kolovoz 2“.



(c) „10. kolovoz 3“



(d) „10. kolovoz 4“



(e) „10. kolovoz 5“



(f) „Duće 1“



(g) „Duće 2“

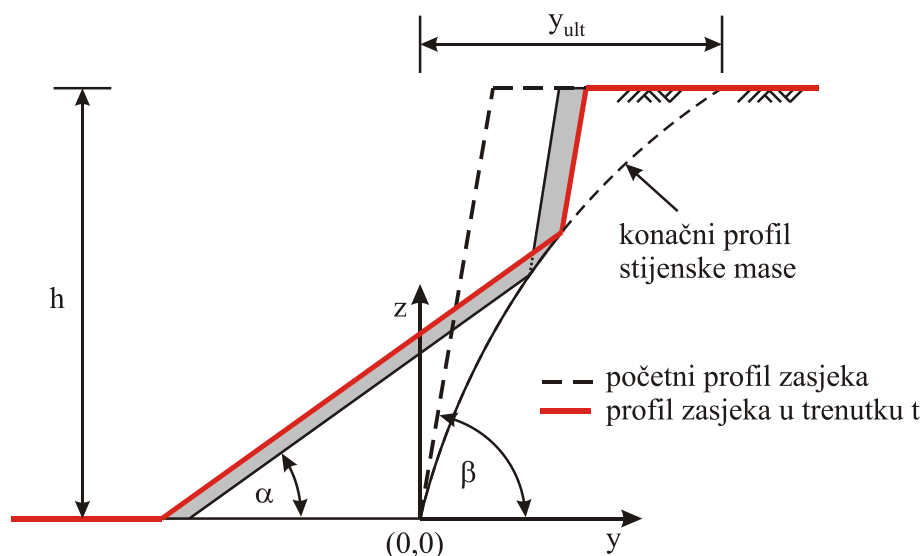
Slika 5.5. Pilot lokacije (II. dio)

## 5.2. Matematički modeli erozije uspravnog zasjeka

### 5.2.1. Fisher–Lehmannov model

Ovaj model je kombinacija Fisherovog [147] matematičkog opisa degradacije napuštenog, inicijalno vertikalnog (uspravnog), zasjeka u naslagama krede bez nakupljanja erodiranog materijala u podnožju zasjeka, te Lehmannovog generaliziranog modela [148] koji uvodi mogućnost početnog nagiba pokosa i nakupljanje erodiranog materijala u podnožju zasjeka. Osnovne pretpostavke ovog modela (Slika 5.6.) su:

- Kosina je homogena, pokos je ravan, nagiba  $\beta$ , koji je dovoljno strm da omogućava transport rastrošenog gradiva.
- Teren u podnožju i iza pokosa je vodoravan i proteže se dovoljno daleko.
- U podnožju pokosa nema stajaće vode.
- U svakom vremenskom koraku proizvodi rastrošbe se ravnomjerno erodiraju sa slobodnog lica pokosa. Veći odroni i odvajanja po diskontinuitetima nisu razmotrena.
- Proizvodi rastrošbe se nakupljaju u podnožju u obliku sipara konstantnog nagiba  $\alpha$  ( $\alpha < \beta$ )
- Ispod akumuliranog sipara stijena je zaštićena od daljnje rastrošbe. Istovremeno u dijelu slobodnog lica pokosa stijena se nastavlja trošiti i erodirati. Iz navedenog slijedi da se u konačnici oblikuje konveksna granica između nastalog sipara i intaktne stijenske mase.
- U konačnici zasjek nagiba  $\beta$  se preoblikovao u kosinu nagiba  $\alpha$  koja tangira konveksnu jezgru intaktne stijenske mase.



Slika 5.6. Fisher–Lehmannov model erozije uspravnog zasjeka

Uz prethodno navedene pretpostavke, izraz za određivanje konveksne jezgre intaktne stijenske mase poprima sljedeći oblik [149]:

$$y = k \cdot (l + m) \cdot \ln \left[ \frac{m}{(m - z)} \right] - k \cdot z \quad (5.1)$$

gdje su:  $m = h/c$ ;  $k = (a - ac - b)/c$ ;  $l = b \cdot h/(a - ac - b)$ ;  $a = \text{ctg } \alpha$ ;  $b = \text{ctg } \beta$ ; te  $h$  - visina zasjeka,  $\alpha$  - nagib stabilnog pokosa sipara i  $\beta$  - početni nagib zasjeka, određeni na slici 5.6. Parametar  $c$  je konstanta potrebna za egzaktnu derivaciju [22], koja u suštini predstavlja mjeru stalne rastresitosti rastrošenog gradiva:

$$\frac{\text{zapremina stijene}}{\text{zapremina sipara}} = \frac{1 - c}{1} \quad (5.2)$$

Za potrebe projektiranja, uz ukupno potrebno vrijeme za postizanje istog, zanimljiv je podatak o konačnom obliku zasjeka, kako položaja vrha pokosa tako i nožice sipara. Konačni položaj vrha pokosa može se odrediti uvrštavanjem  $z=h$  u izraz 5.1 koji tada poprima sljedeći oblik:

$$y_{ult} = (\text{ctg } \alpha - \text{ctg } \beta) \cdot (1 - c) \cdot \frac{h}{c} \cdot \left[ \frac{1}{c} \cdot \ln(1 - c)^{-1} - 1 \right] + h \cdot \text{ctg } \beta \quad (5.3)$$

Odnosno, za pomak nožice sipara koji se može odrediti pomoću izraza 5.4:

$$y_s = h \cdot \text{ctg } \alpha - y_{ult} \quad (5.4)$$

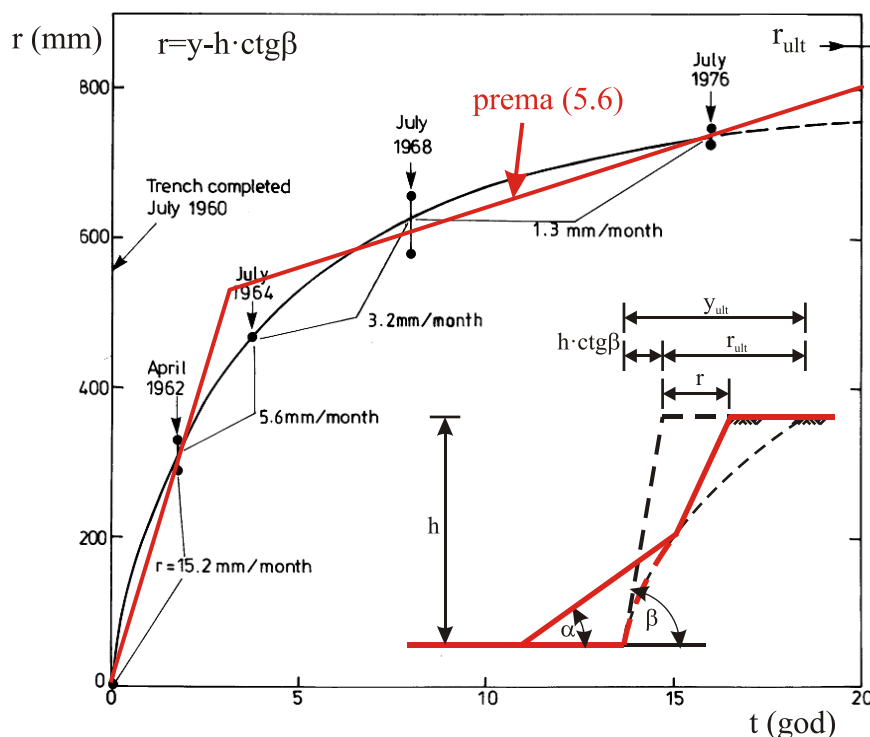
Uvidom u izraz 5.3 može se primjetiti da, osim početne geometrije zasjeka, utjecaj na oblikovanje konačne geometrije zasjeka ima i nepoznati parametar rastresitosti rastrošenog gradiva, za čije određivanje će se između ostalog provesti terensko opažanje.

Promjena oblika zasjeka u vremenu može se opisati uvođenjem sljedeće funkcije:

$$y(t) = \begin{cases} h \cdot \text{ctg } \beta & \text{za } t = 0 \\ h \cdot \text{ctg } \beta + R_{y,s} & \text{ako je } 0 < t < (y_{ult} - h \cdot \text{ctg } \beta)/R_{y,s} \\ y_{ult} & \text{ako je } t \geq t_{ult} = (y_{ult} - h \cdot \text{ctg } \beta)/R_{y,s} \end{cases} \quad (5.5)$$

gdje je  $R_{y,s}$  prosječna godišnja erozija. Prema Hutchinsonu [149] erozija zasjeka nije nužno linearan proces u vremenu. On je na primjeru zasjeka u kredi visine 1,75 m, na temelju povremenih opažanja u periodu od 15 godina, zaključio da je proces nelinearan (Slika 5.7.).





Slika 5.7. Godišnja erozija zasjeka „Overtown Down“, UK (izmjenjeno prema [149])

Prema zapažanjima autora, na terenu je moguće primjetiti vrlo brzi početni razvoj erozije zasjeka (Slika 5.8.), međutim njega se jednako tako može pripisati početnom rasterećenju stijenske mase i lokalnim nestabilnostima koje ovise od uslojenosti i kakvoći izvedbe zasjeka.



(a)



(b)

Slika 5.8. Primjer brze početne izmjene profila na zasjeku izvedenom za potrebe privremene prometnice, lokacija Brnik, Split: a) neposredno nakon iskopa (srpanj 2013.); b) stanje nakon 7 mjeseci (veljača 2014.)

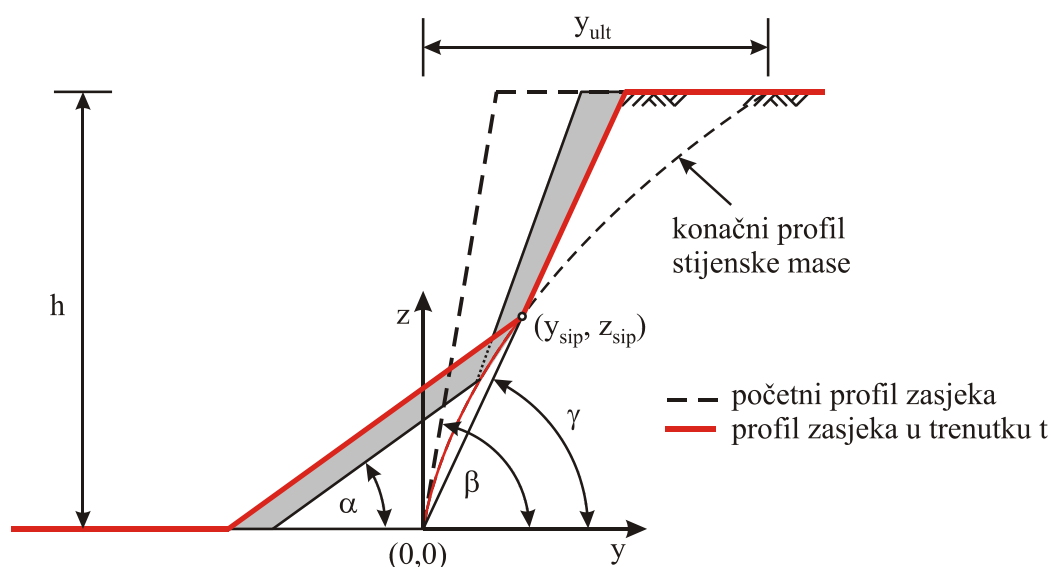
Uzimajući u obzir prethodno zapažanje, umjesto parametra  $R_{y,s}$  se može uvesti bilo koja nelinearna funkcija  $R_{y,s}=R_{y,s}(t)$  ili se linearni kriterij opisan izrazom 5.5. može zamjeniti bi-linearnim kriterijem:

$$y(t) = \begin{cases} h \cdot \operatorname{ctg} \beta & \text{za } t = 0 \\ h \cdot \operatorname{ctg} \beta + n \cdot R_{y,s} & \text{ako je } 0 < t < t_1 \\ h \cdot \operatorname{ctg} \beta + R_{y,s} & \text{ako je } t_1 < t < (y_{ult} - h \cdot \operatorname{ctg} \beta) / R_{y,s} \\ y_{ult} & \text{ako je } t \geq t_{ult} = (y_{ult} - h \cdot \operatorname{ctg} \beta) / R_{y,s} \end{cases} \quad (5.6)$$

gdje su:  $n$  - koeficijent utjecaja početne relaksacije zasjeka;  $t_1$  - vrijeme unutar kojeg se manifestiraju učinci početne relaksacije zasjeka. Npr. na Hutchinsonovom modelu (Slika 5.7.) navedeni parametri bi iznosili  $n \approx 10$  i  $t_1 \approx 3$  godine, ali bi i  $t_{ult}$  bilo podcijenjeno cca 5 godina (cca 15%).

### 5.2.2. Bakker–Le Heuxov model

Osnovne pretpostavke ovog modela Bakker–Le Heuxovog modela [22] podudaraju se s Fisher–Lehmannovim modelom, osim u četvrtoj točki koja određuje način erozije slobodnog lica pokosa. Ovim modelom pretpostavlja se neravnomjerno trošenje lica pokosa (Slika 5.9.), prema kojem se fronta trošenja gradiva rotira oko nožice zasjeka.



Slika 5.9. Bakker–Le Heuxov model erozije uspravnog zasjeka

Uz prethodno usvojene pretpostavke, izraz za određivanje konveksne jezgre intaktne stijenske mase poprima sljedeći oblik [149]:

$$y = a \cdot z - (a - b) \cdot z \cdot \left[ \frac{(h^2 + (1 - 2c) \cdot z^2)}{h^2} \right]^{\frac{c-1}{1-2c}} \quad (5.7)$$

gdje su:  $a = \operatorname{ctg} \alpha$ ;  $b = \operatorname{ctg} \beta$ ; te  $h$  - visina zasjeka,  $\alpha$  - nagib stabilnog pokosa sipara i  $\beta$  - početni nagib zasjeka, određeni na slici 5.9. Parametar  $c$  je definiran izrazom 5.2.

Konačni položaj vrha pokosa može se odrediti uvrštavanjem  $z=h$  u izraz 5.7 koji tada poprima sljedeći oblik:

$$y_{ult} = (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \beta) \cdot h \cdot \left[ 1 - (2 - 2c)^{(c-1)/(1-2c)} \right] + h \cdot \operatorname{ctg} \beta \quad (5.8)$$

Odnosno, za pomak nožice sipara koji možemo definirati putem izraza:

$$y_s = h \cdot \operatorname{ctg} \alpha - y_{ult} \quad (5.9)$$

Promjena oblika zasjeka u vremenu može se opisati uvođenjem sljedeće funkcije:

$$\gamma(t) = \begin{cases} \beta & \text{za } t = 0 \\ \beta - R_{\gamma,s} \cdot t & \text{ako je } 0 < t < (\beta - \alpha)/R_{\gamma,s} \\ \alpha & \text{ako je } t \geq t_{ult} = (\beta - \alpha)/R_{\gamma,s} \end{cases} \quad (5.10)$$

gdje su:  $\gamma$  - nagib slobodnog lica zasjeka;  $R_{\gamma,s}$  - prosječna godišnja promjena nagiba zasjeka uslijed erozije slobodnog lica zasjeka. Uvođenjem vremenske ovisnosti  $\gamma$ , moguće je odrediti izraze za položaj vrha sipara u datom trenutku [21 i 100]:

$$\begin{pmatrix} y_{sip} \\ z_{sip} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{z_{sip}}{\operatorname{tg}(\gamma(t))} \\ h \cdot \sqrt{\frac{1}{1-2c} \cdot \left( e^{\frac{1-2c}{c-1} \ln \left( \frac{a \cdot \operatorname{tg}(\gamma(t)) - 1}{(a-b) \cdot \operatorname{tg}(\gamma(t))} \right)} - 1 \right)} \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

Odnosno oblik profila:

$$y(t) = \begin{cases} y_{sip} - a \cdot (z_{sip} - z) & \text{za } 0 \leq z \leq z_{sip} \\ z \cdot \operatorname{ctg}(\gamma(t)) & \text{za } z_{sip} \leq z \leq h \end{cases} \quad (5.12)$$

Pri tome oblik intaktne stijenske mase ispod sipara i dalje je određen prema izrazu 5.7.

### 5.3. Primjena terestičkog laserskog skeniranja

Terestičko lasersko skeniranje je naziv za geodetsko mjerenje kojim je moguće pribaviti značajne količine podataka (koordinata točaka), za razliku od klasičnih geodetskih metoda (npr. upotreba totalne stanice). Osim termina terestičko laserko skeniranje - TLS (eng. „Terrestrial Laser Scanning“) u upotrebi je često i pojam LiDAR (eng. Light Detection and Ranging) koji se obično povezuje uz pribavljanje podataka iz zraka (npr. „pomoću aviona kao platforme“) ili definiciju same tehnologije pribavljanja podataka.

U ovom radu korišten je Optech-ov TLS ILRIS-3D-ER („Optech Intelligent Laser Ranging and Imaging System with Enhanced Range“). Ovaj TLS koristi odašiljač/prijamnik uskog pojasa laserske zrake (na valnoj duljini od 1535nm) koju uređaj emitira u prostor. Zraka se odbija od površine terena te na nju nije potrebno ugrađivati druga pomagala (prizme i sl.). Mjerenje udaljenosti ( $\rho$ ) se vrši na temelju mjerenja vremena potrebnog laserskoj zraci da prijeđe udaljenost od instrumenta do točke na terenu i natrag (eng. „time-of-flight“) te se izračunava prema [150]:

$$\rho = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (5.13)$$

gdje je:  $c$  - brzina svjetlosti;  $\Delta t$  - mjereno vrijeme od odašiljanja zrake do zabilježenog povratka. Izmjerena udaljenost vrijedi za dio pokosa koji je jednak površini laserske zrake na mjestu mjerenja (engl. „Spot dimension“). Ovo je bitno naglasiti budući se s povećanjem udaljenosti zraka širi (za ILRIS na npr. 100m iznosi 22 mm), a dobiveno mjerenje predstavlja prosječnu udaljenost površine na koju pada zraka. Pri tome potrebna je neposredna vidljivost promatrane površine (eng. „line-of-sight“) sa stajališta instrumenta, kao i kod ostalih optičkih metoda mjerenja udaljenosti.

Korištenjem podataka o udaljenosti i kutovima, tj. razmaku između izmjerenih točaka, svaka od točaka može biti prikazana koordinatama ( $x, y, z$ ) u Kartezijevom sustavu. Uređaj bilježi i intenzitet vraćenog signala što može dati podatke i o skeniranom materijalu u ovisnosti o reflektanci pojedinog materijala [77].

Laserskim skeniranjem se dobiva velika količina neobrađenih podataka koja se naziva oblak točaka (Slika 5.10.). Kad su kontrolne točke georeferencirane u poznatom koordinatnom sustavu, tad se čitavi oblak točaka može orijentirati u istom sustavu. Točke mogu biti dodatno određene i bojom, tj. mogu se definirati i RGB komponentnom, u slučaju kada skeneri imaju u sebi integriranu i kalibriranu digitalnu kameru [151].





Slika 5.10. Primjer oblaka točaka s približno 4 milijuna točaka (Pilot lokacija „Žnjan 1“)

U navedene prostorne i dodatne informacije, važno je napomenuti da TLS u usporedbi s klasičnim metodama mjerenja ima značajnu brzinu prikupljanja podataka (do 2500 točaka u sekundi za ILRIS-3D). Tehničke specifikacije korištenog uređaja navedene su u tablici 5.3.

Tablica 5.3. Tehničke specifikacije TLS ILRIS-3D-ER (Optech inc).

| Parametar                             | ILRIS-3D-ER      |
|---------------------------------------|------------------|
| Udaljenost mjerenja uz 80% refleksije | 1700m            |
| Udaljenost mjerenja uz 10% refleksije | 650m             |
| Brzina laserske repeticije            | 2500 to 3500 Hz  |
| Preciznost mjerenja                   | 7mm @ 100m       |
| Vidno polje                           | 40°x40°          |
| Minimalna veličina koraka             | 0.001146°        |
| Maksimalna gustoća točaka             | 2cm @ 1000m      |
| Rotacijska brzina                     | 0.001 to 20°/sec |
| Promjer zrake                         | 22mm @ 100m      |
| Valna duljina lasrea                  | 1535 nm          |

Primjena TLS-a u ovom radu je isključivo s aspekta korisnika, više o osnovnim principima mjerenja, tehnologiji i performansama instrumenata čitatelj se upućuje na dodatnu literaturu [150 i 152].

### 5.3.1. Pribavljanje podataka

#### Pilot lokacija „Žnjan 1“

Prvi oblak točaka, prikupljen je 7. ožujka 2012., i predstavlja referentni oblak točaka - OT<sub>0</sub>. Pribavljanje podataka na istoj lokaciji ponovljeno je 28. rujna 2012., 21. ožujka 2013., 27. rujna 2013., 10. ožujka 2014., 23. lipnja 2014. i 3. listopada 2014. Pribavljeni oblaci točaka označeni su redom kao OT<sub>1</sub>, OT<sub>2</sub>, ..., OT<sub>6</sub>.

Budući je zasjek nepravilnog oblika, zbog uznapredovale diferencijalne rastrošbe na nekim djelovima pokosa, za pribavljanje svakog oblaka točaka korištena su tri stajališta (položaja instrumenta). Time su se, spajanjem rezultata sa sva tri stajališta, izbjegla područja "u sjeni" te konačni oblak točaka sadrži potpune podatke o geometriji pokosa. Spajanje je izvršeno u IMAlign modulu programa Polyworks v12 upotrebom ICP (eng. "Iterative Closest Point") metode.

ICP metoda temelji se na metodi najmanjih kvadrata te iterativnom postupku minimaliziranja sume Euklidske udaljenosti između veznih točaka referentnog i pomičnog oblaka točaka [151]. Povezivanje oblaka točaka se provodi poluautomatskom metodom. Prvi korak u registraciji oblaka točaka je određivanje početnih vrijednosti transformacijskih parametara kad je potrebno približno odrediti minimalno tri dobro raspoređene vezne točke u području preklapanja oblaka točaka. Time će drugi korak - proces iteracije manje trajati. Iteracija se provodi sve dok rješenje uklopa ne postane optimalno, odnosno udaljenost točaka bude minimalna.

U slučaju Pilot lokacije „Žnjan 1“ standardna devijacija prilikom preklapanja podataka kod svih oblaka točaka iznosi oko 0,5cm (na prosječnoj udaljenosti stajališta oko 25m). Prosječni razmak točaka (na prosječnoj udaljenosti od stajališta) iznosi 0,8 cm. U konačnici cjelokupni oblak točaka koristi se za kreiranje TIN modela površine zasjeka (eng. "Triangle Irregular Network" surface), u kojem svaka točka predstavlja jedan čvor. Ovako kreiran model naziva se referentna površina - P<sub>0</sub>, te se svi daljnji pribavljeni oblaci točaka uspoređuju s njom.

#### Ostale pilot lokacije

Pribavljanje podataka s pilot lokacija „Duilovo 1“, „Duće 1“ i „Duće 2“ provedeno je u okviru japansko-hrvatskog bilateralnog znanstvenog projekta „Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje posljedica klizanja i poplava u Hrvatskoj“. Preostale lokacije odabrane su kao reprezentativni uzorci različitih odnosa geoloških članova, odnosa uslojenosti i zasjecanja te trenutka zasjecanja. Postupak registracije, uklapanja i spajanja oblaka točaka te kreiranja referentne površine istovjetan je za sve lokacije, kao i za pilot lokaciju „Žnjan 1“.

Podaci o geometrijskim svojstvima zasjeka, geografskom položaju i razdobljima u kojima je vršeno opažanje, prikazani su u tablici 5.2., dok su podaci o pribavljenim oblacima točaka na svih 14 pilot lokacija prikazani u tablici 5.4.

Tablica 5.4. Podaci o pribavljenim oblacima točaka na svim pilot lokacijama.

| Oznaka pilot lokacije | Početak opažanja | Ukupan broj opažanja (epoha) | Broj stajališta / prosječna udaljenost (m) | Prosječni razmak točaka (na prosječnoj udaljenosti od stajališta) (cm) | Standardna devijacija kod preklapanja stajališta / epoha $\sigma$ (cm) |
|-----------------------|------------------|------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Žnjan 1               | ožujak 2012.     | 7                            | 3 / 25                                     | 0,8                                                                    | 0,5                                                                    |
| Žnjan 2               | ožujak 2014.     | 3                            | 2 / 40                                     | 2,2                                                                    | 0,6                                                                    |
| Trstenik 1            | ožujak 2014.     | 3                            | 3 / 25                                     | 1,0                                                                    | 0,4                                                                    |
| Duilo 1               | ožujak 2012.     | 4                            | 1 / 280                                    | 15,0                                                                   | 7,0                                                                    |
| Gripe 1               | ožujak 2014.     | 2                            | 2 / 35                                     | 2,8                                                                    | 0,5                                                                    |
| Kaštelet 1            | ožujak 2014.     | 3                            | 2 / 58                                     | 2,3                                                                    | 0,7                                                                    |
| Kaštelet 2            | ožujak 2014.     | 3                            | 1 / 22                                     | 1,4                                                                    | 0,6                                                                    |
| 10. kolovoz 1         | ožujak 2014.     | 3                            | 1/76                                       | 2,1                                                                    | 0,8                                                                    |
| 10. kolovoz 2         | ožujak 2014.     | 3                            | 1 / 66                                     | 2,0                                                                    | 1,5                                                                    |
| 10. kolovoz 3         | ožujak 2014.     | 3                            | 1 / 200                                    | 5,2                                                                    | 1,0                                                                    |
| 10. kolovoz 4         | ožujak 2014.     | 3                            | 1 / 100                                    | 4,0                                                                    | 1,0                                                                    |
| 10. kolovoz 5         | ožujak 2014.     | 3                            | 1 / 160                                    | 4,5                                                                    | 1,5                                                                    |
| Duće 1                | travanj 2012.    | 1                            | 1 / 20                                     | 2,2                                                                    | N/A                                                                    |
| Duće 2                | travanj 2012.    | 5                            | 1 / 230                                    | 5,0                                                                    | 4,5                                                                    |

### 5.3.2. Usporedba oblaka točaka iz različitih epoha

Promjena morfologije zasjeka vrši se usporedbom oblaka točaka iz različitih epoha upotrebom sljedeće metodologije [77, 83]:

- Pribavljanje referentnog oblaka točaka (izvršiti preklapanja u slučaju više stajališta, poželjno uraditi i georeferenciranje zbog izravnog prostornog orijentiranja elemenata zasjeka).

- Kreiranje TIN modela površine zasjeka - referentne plohe ( $P_0$ ).
- Pribavljanje novih oblaka točaka nakon određenog perioda ( $OT_1, OT_2, \dots, OT_n$ )
- Priprema za usporedbu (eng. „alignment“) između epoha mjerenja.
- Usporedba pribavljenih podataka s referentnom plohom  $P_0$ .
- Izračun razlika za svaku usporedbu različitih epoha mjerenja.
- Izrada poprečnih presjeka ili ploha usporedbe.

Pripremom za usporedbu (točka 4) između epoha mjerenja definira se matrica poravnanja novog oblaka točaka s referentnom plohom. U ovom radu matrice poravnanja definirane su upotrebom nepomičnih objekata u okolini (zgrade u blizini zasjeka ili geološki članovi koji nisu podložni rastrošbi u inženjerskom periodu vremena), u sljedeća četiri koraka:

- Identifikacija nepomičnog dijela zasjeka ili objekta u okolini zasjeka.
- Brisanje dijela na kojem se odvija promjena (erozija i deponiranje) te svih suvišnih mjerenja (vegetacija, pokretni objekti i sl.).
- Poravnanje fiksnog dijela upotrebom ICP algoritma, čime se definira matrica poravnanja.
- Upotreba matrice poravnanja na izvornom oblaku točaka.

Podaci prikupljeni TLS-om mogu se analizirati za cijelu plohu zasjeka čime se dobije trodimenzionalni uvid u ponašanje procesa erozije. Dodatnom identifikacijom članova zasjeka putem fotografije i/ili inteziteta, postavlja se podloga za daljnu analizu drugih fenomena, kao što su: odronjavanja, klizanja, prevrtanja i sl. Osim toga, nije potrebna ugradnja kontrolnih točaka kao kod totalnih stanica te je količina i rezolucija mjerenih podataka neusporediva.

Udaljenost svake točke između  $P_0$  i  $OT_i$  izračunata je upotrebom metodologije „usporedbe podataka s referentnom plohom“ (eng. „data vs. reference comparison“, Polyworks v12), pri čemu je smjer usporedbe određen smjerom vektora okomice na referentnu plohu  $P_0$ . Za samu usporedbu podataka nije nužno izvršiti georeferenciranje te se u tom slučaju ishodište postavlja u središte TLS-a ( $O=0,0,0$ ). Udaljenosti točaka  $D_i$  računa se prema [153]:

$$D_i = \text{Udaljenost}[OT_i, O] - \text{Udaljenost}[P_0, O] \quad (5.14)$$

$D_i$  je udaljenost koja se pripisuje odvajanju/nakupljanju gradiva na pokosu ili deformaciji dijela pokosa u vidu odrona. Pri tome se manji dio svakako odnosi i na pogreške mjerenja odnosno metodologije usporedbe [154].

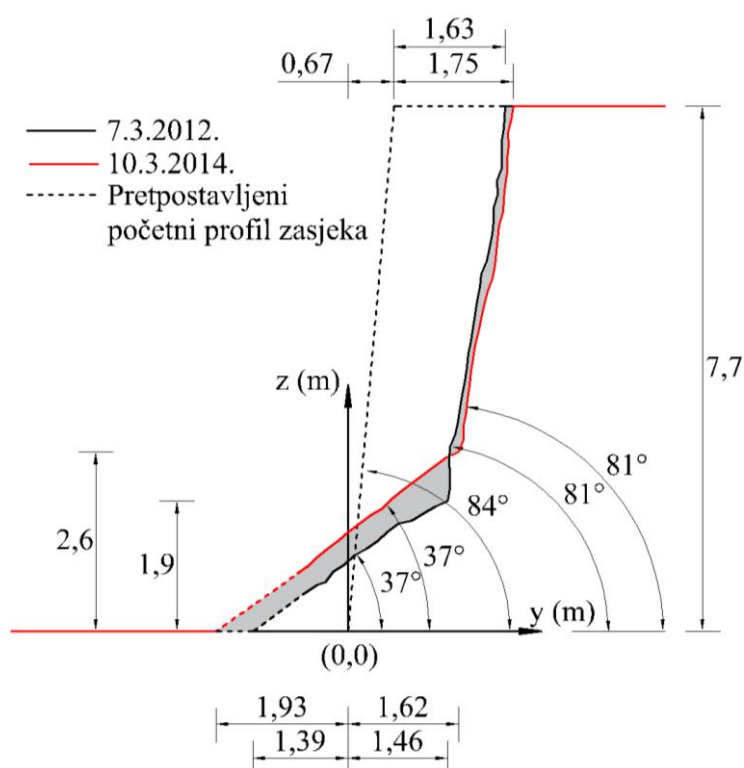
## 5.4. Rezultati

U nastavku su za odabrane epohe mjerenja prikazani rezultati usporedbe oblaka točaka za svih 14 pilot lokacija. Usporedbe su prikazane trodimenzionalno putem razlika prikazanih na licu zasjeka ili dvodimenzionalno putem odabranih reprezentativnih poprečnih presjeka.

U trodimenzionalnom prikazu udaljenosti su prikazane putem polja vrijednosti. Negativne vrijednosti ukazuju na nedostatak gradiva u određenoj epohi (eroziju), odnosno odvajanje ili odron većih fragmenata stijene. Pozitivne vrijednosti ukazuju na akumuliranje erodiranog gradiva u vidu sipara u podnožju zasjeka, većih blokova usljed odranjanja ili rasta vegetacije. Pozitivni pomak prema instrumentu, ukoliko se nalazi na slobodnom licu zasjeka, može ukazivati i na pomak stijene koji prethodi odronu.

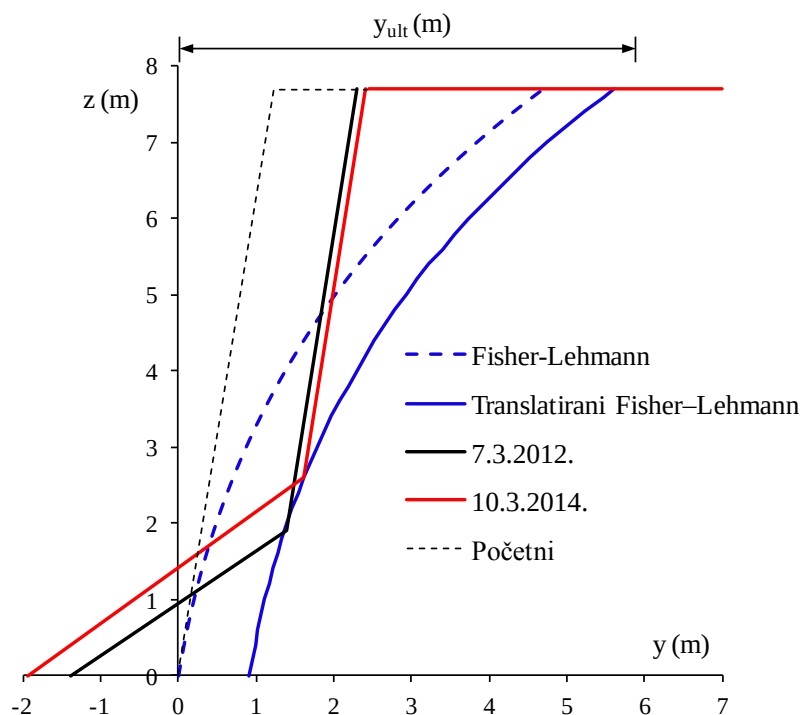
### 5.4.1. Pilot lokacija Žnjan 1

Na slici 5.11.a prikazani su poprečni presjeci kao rezultat opažanja za period od 2 godine (7.3.2012. - 10.3.2014.), dok je na slici 5.11.b prikazan rezultat numeričkog proračuna baziranog na Fisher-Lehmannovom modelu erozije zasjeka.



(a) Karakteristični poprečni presjek za epohe OT<sub>0</sub> i OT<sub>4</sub> (7.3.2012. i 10.3.2014.)

Slika 5.11. Interpretacija Fisher–Lehmannov-og modela na temelju rezultata opažanja izvršenih na Pilot lokaciji „Žnjan 1“

(b) Fisher–Lehmannov model na temelju epoha OT<sub>0</sub> i OT<sub>4</sub>

Slika 5.11. Interpretacija Fisher–Lehmannov-og modela na temelju rezultata opažanja izvršenih na Pilot lokaciji „Žnjan 1“

Naime, terenskim opažanjem na ovom te na nekim od sljedećih primjera uočeno je da, nakon početne relaksacije zasjeka (Slika 5.8.), Fisher-Lehmannov model bolje opisuje promjenu profila zasjeka u vremenu u mekim stijenama koje se javljaju samostalno ili u flišnom slijedu na području Dalmacije.

Parametri korišteni u proračunu prikazani su u tablici 5.5. Kutevi pokosa i visina zasjeka određeni su upotrebom rezultata TLS-a na reprezentativnom poprečnom presjeku 1-1 (Slika 5.12.).

Tablica 5.5. Parametri korišteni za proračun Fisher-Lehmannovim modelom

| Parametar                                                      | Simbol    | Iznos | Mjerna jedinica |
|----------------------------------------------------------------|-----------|-------|-----------------|
| Nagib sipara                                                   | $\alpha$  | 37    | (°)             |
| Nagib pokosa                                                   | $\beta$   | 81    | (°)             |
| Visina zasjeka                                                 | h         | 7,7   | (m)             |
| 1 – $\frac{\text{zapremina stijene}}{\text{zapremina sipara}}$ | c         | 0,4   | (-)             |
| Prosječna godišnja erozija                                     | $R_{y,s}$ | 5,0   | (cm/god)        |

Rezultati proračuna prikazani su u tablici 5.6.

Tablica 5.6. Rezultati proračuna prema Fisher-Lehmannu i Bakker–Le Heuxu za „Žnjan 1“

| Parametar                                                   | Simbol               | Iznos       |                | Mjerna jedinica |
|-------------------------------------------------------------|----------------------|-------------|----------------|-----------------|
|                                                             |                      | prema F.-L. | prema B.-Le H. |                 |
| Položaj vrha pokosa                                         | $y_{ult}$            | 4,96        | 5,01           | (m)             |
| Pomak nožice sipara                                         | $y_s$                | 5,26        | 5,21           | (m)             |
| Konačna širina pokosa                                       | $y_s + y_{ult}$      | 10,22       | 10,22          | (m)             |
| Potrebno vrijeme za dovršetak erozije - od trenutnog stanja | $t_{ult} - \Delta t$ | 58          | -              | (god)           |
| Ukupno potrebno vrijeme za dovršetak erozije                | $t_{ult}$            | 93          | -              | (god)           |

Izrazom (5.1) definirana linija konveksne jezgre intaktne stijenske mase, translahirana je za 0,9 m u unutrašnjost zasjeka (Slika 5.11.b). Razlog translacije leži u uklanjanju deponiranog gradiva u nekoliko navrata tokom korištenja platoa za potrebe obližnjeg gradilišta, kao što je prethodno opisano i prikazano na slici 5.2.

Zanimljivo je primjetiti, upotrebom povratne analize, da je proteklo vrijeme od zasjecanja iznosilo  $\Delta t = 35$  godina, što ne odgovara zabilježenom vremenu proteklom od zasjecanja ( $\Delta t_{stv} = 12$  god; 2002. - 2014.), koje je zbog uklanjanja deponiranog gradiva realno i još kraće. S druge strane, navedeno zapažanje u potpunosti odgovara Hutchinsonovom opažanju [149] (Slika 5.7.) te se upotrebom prema autoru predloženog bilinearnog kriterija i na ovoj pilot lokaciji dobivaju zadovoljavajući rezultati. Za  $n=10$  i  $t_1=3$  godine (Slika 5.2.c),  $\Delta t$  iznosi osam godina, što s obzirom na početno uklanjanje deponiranog gradiva odgovara provedenom opažanju.

Na slici 5.12. prikazana je situacija i položaj promatranog zasjeka. Crvene isprekidane linije predstavljanju konačni položaj vrha pokosa i nožice sipara prema Fisher-Lehmannu, uz pretpostavku homogenog gradiva. Međutim, budući je u geološkom profilu prisutan član otporniji na rastrošbu (greben pješčenjaka debljine 1,8 m), kao i pojava sekundarnog sustava pukotina ( $280^\circ/63^\circ$ ) koja isklinjava na licu zasjeka, u naznačenoj zoni odrona model se nemože koristiti. Oblikovanje zasjeka u toj zoni potrebno je sagledati uz uvažavanje kriterija stabilnosti na ravninsko klizanje i klizanje po klinu (formiranog sekundarnom pukotinom i gornjom plohom sloja pješčenjaka).

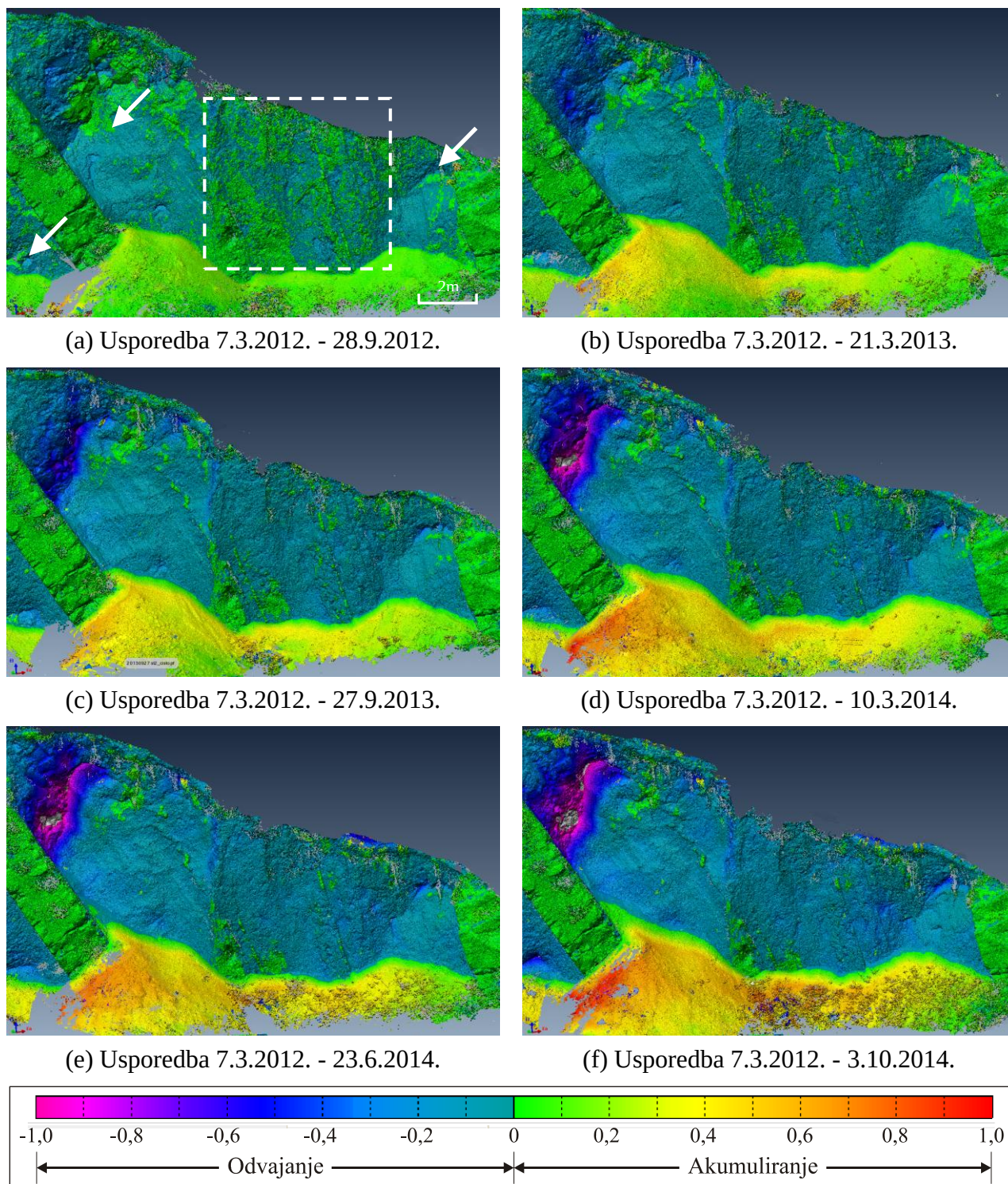


Slika 5.12. Situacija i položaj zasjeka na pilot lokaciji „Žnjan 1“. (Crvena linija - zasjek; crvena isprekidana linija - procijenjeni konačni oblik zasjeka prema Fisher–Lehmannu; crna isprekidana linija - karakteristični poprečni presjek)

Na slici 5.13. prikazana promjena morfologije zasjeka za cjelokupno vrijeme opažanja (7.3.2012. - 3.10.2014.), budući je glavna prednost TLS-a u prikupljanju velikog broja prostornih podataka. Zone odranjanja po sekundarnim pukotinama označene strelicama na slici 5.13.a, dok je područje koje je isključivo pod utjecajem erozije označeno isprekidanom linijom.

Promjena je prikazana u rasponu vrijednosti od -1,0 do 1,0 m, stoga bog skale na kojoj je prikazana u središnjem dijelu zasjeka nije moguće razlučiti promjenu nakon druge epohe opažanja (Slika 5.13.b). Na slici 5.14. središnje područje zasjeka prikazano na uvećanoj skali (-0,4 do 0 m).



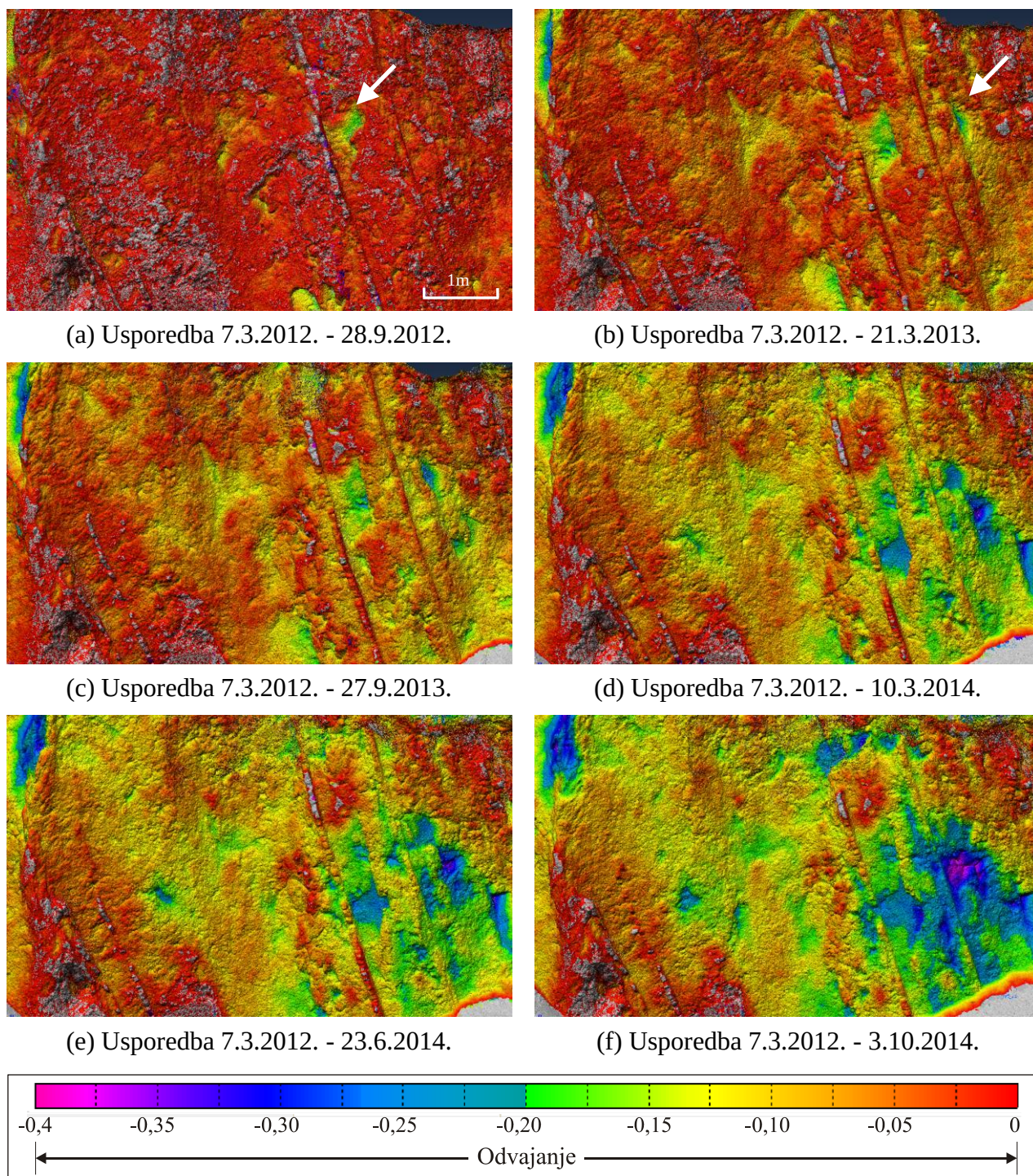


Slika 5.13. Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „Žnjan 1“ za navedene epohe mjerenja (a - f) s referentnom plohom

Na slikama 5.14.a-f, u područjima označenim strelicama, moguće je primjetiti da erozija površine nije jednolika, iako bi se to moglo pretpostaviti isključivo vizualnim opažanjem (slike 5.2. i 5.13.). Prema tome se može pretpostaviti da na eroziju zasjeka u flišnom slijedu značajno utječe metodologija izvedbe zasjeka, podložnost gradiva fragmentaciji (prema tipu trajnosti



gradiva iskazanih laboratorijskim testovima), prisutnost sekundarnih pukotina te pojavnost tanko-uslojenih otpornijih članova.



Slika 5.14. Usporedba oblaka točaka za središnji dio zasjeka na pilot lokaciji „Žnjan 1“ za navedene epohe mjerenja (a - f) s referentnom plohom

U tablici 5.7. prikazani su prosječni opaženi iznosi erozije za središnji dio promatranog zasjeka, iskazani prema epohama opažanja. Moguće je primjetiti trend porasta iznosa erodiranog gradiva, uz kolebanje između „zimskog“ i „ljetnog“ šestomjesečnog razdoblja. Budući je zasjek

zapadne orijentacije, na mikrolokaciji koja je zaštićena od vjetra dominantnih smjerova (bura i jugo), za pretpostaviti da dominantni utjecaj u ovom slučaju ima količina i učestalost oborina. Uistinu, uvidom u dokumentaciju DHMZ-a moguće je zapaziti trend povećanja oborina za područje Splita (mjerna postaja Marjan) u razdoblju opažanja TLS-om. Tako je u ljeto 2012. (početak opažanja) zabilježeno dugo sušno razdoblje (bez zabilježenih oborina), dok je u ljeto 2014. (dovršetak opažanja) zabilježeno kao vrlo kišno (s dvostruko većim iznosom oborina od prosječne, >300 mm).

Tablica 5.7. Prosječni iznosi erodiranog sloja u karakterističnom poprečnom presjeku na pilot lokaciji „Žnjan 1“

| Period opažanja                                      | 7.3.2012. -<br>28.9.2012. | 28.9.2012. -<br>21.3.2013. | 21.3.2013. -<br>27.9.2013. | 27.9.2013. -<br>10.3.2014. | 10.3.2014. -<br>3.10.2014. |
|------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Iznos erodiranog sloja u<br>promatranom periodu (cm) | 2,3                       | 1,9                        | 2,6                        | 2,4                        | 2,8                        |
| Godišnja erozija $R_y$<br>(cm/god)                   | 4,2                       |                            | 5,0                        |                            | 5,5*                       |

\* - procjena prema odnosu ljetnog i zimskog perioda za prethodne dvije godine opažanja

#### 5.4.2. Ostale pilot lokacije

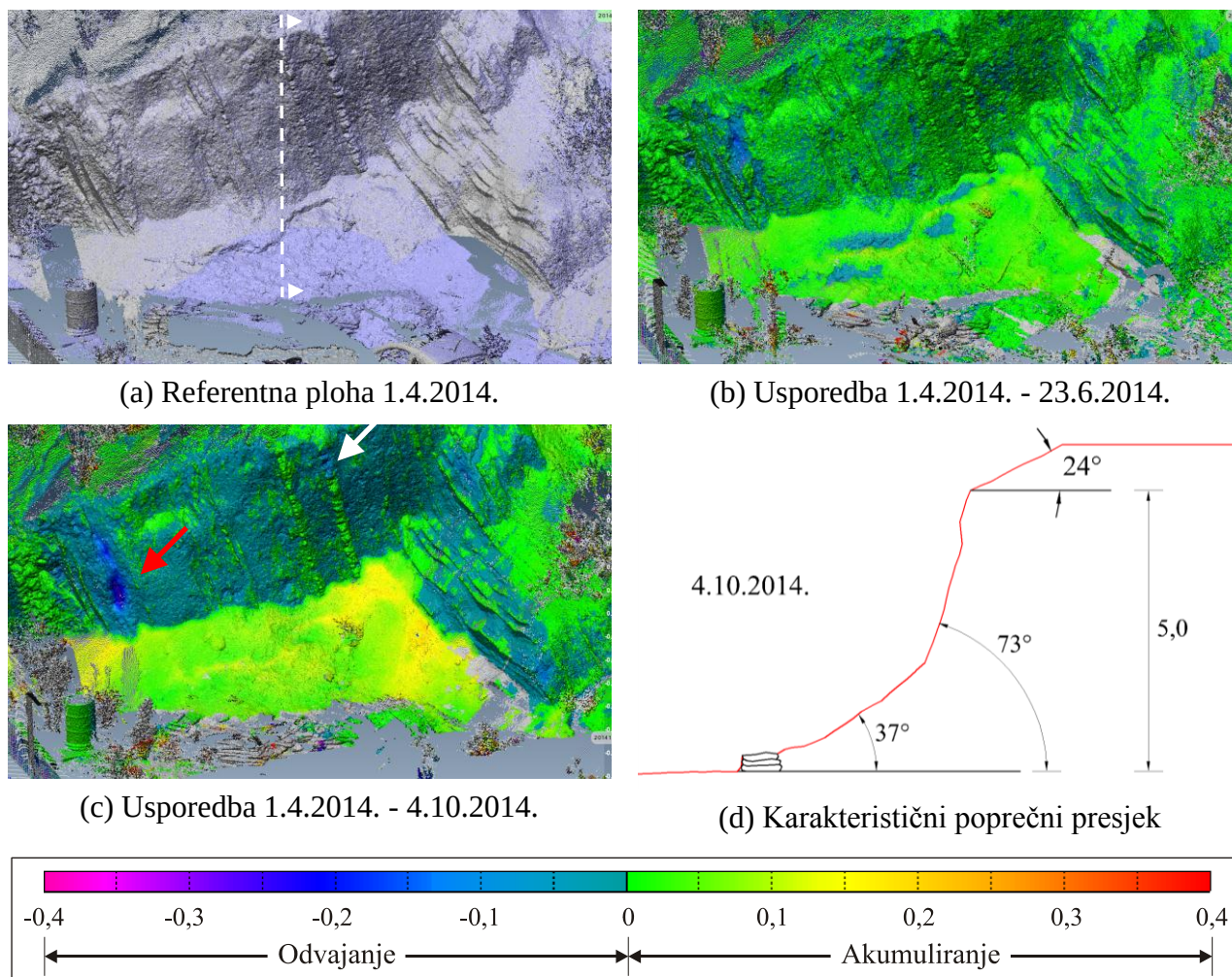
##### Žnjan 2

Pilot lokacija „Žnjan 2“ nalazi se 750 m sjevero-istočno od lokacije „Žnjan 1“, sa sličnim geološkim postavkama (Slika 5.4.b i Tablica 5.2.). U ovom slučaju izostaju deblji slojevi pješčenjaka, te su otporniji proslojci (Tip I) uglavnom tankouslojeni (do 2 cm). Na slici 5.15. prikazana promjena morfologije zasjeka za cjelokupni period opažanja (1.4.2014. - 4.10.2014.).

Prosječni iznos erodiranog sloja na lokaciji za promatrani period iznosi 2,6 cm, dok na lokaciji „Žnjan 1“ iznosi 2,8 cm. Budući su zasjeci približno iste orijentacije (zapad), te je i ova mikrolokacija također zaštićena od vjetra dominantnih smjerova, rezultati opažanja potvrđuju dosljednost metodologije opažanja za iste meteorološke i geološke postavke.



Odron čvršćeg člana kao posljedica diferencijalne erozije označen je bijelom strelicom, dok je područje u kojem je zbog sekundarnog zasjecanja (sjever) došlo do prelaganja označeno crvenom strelicom.



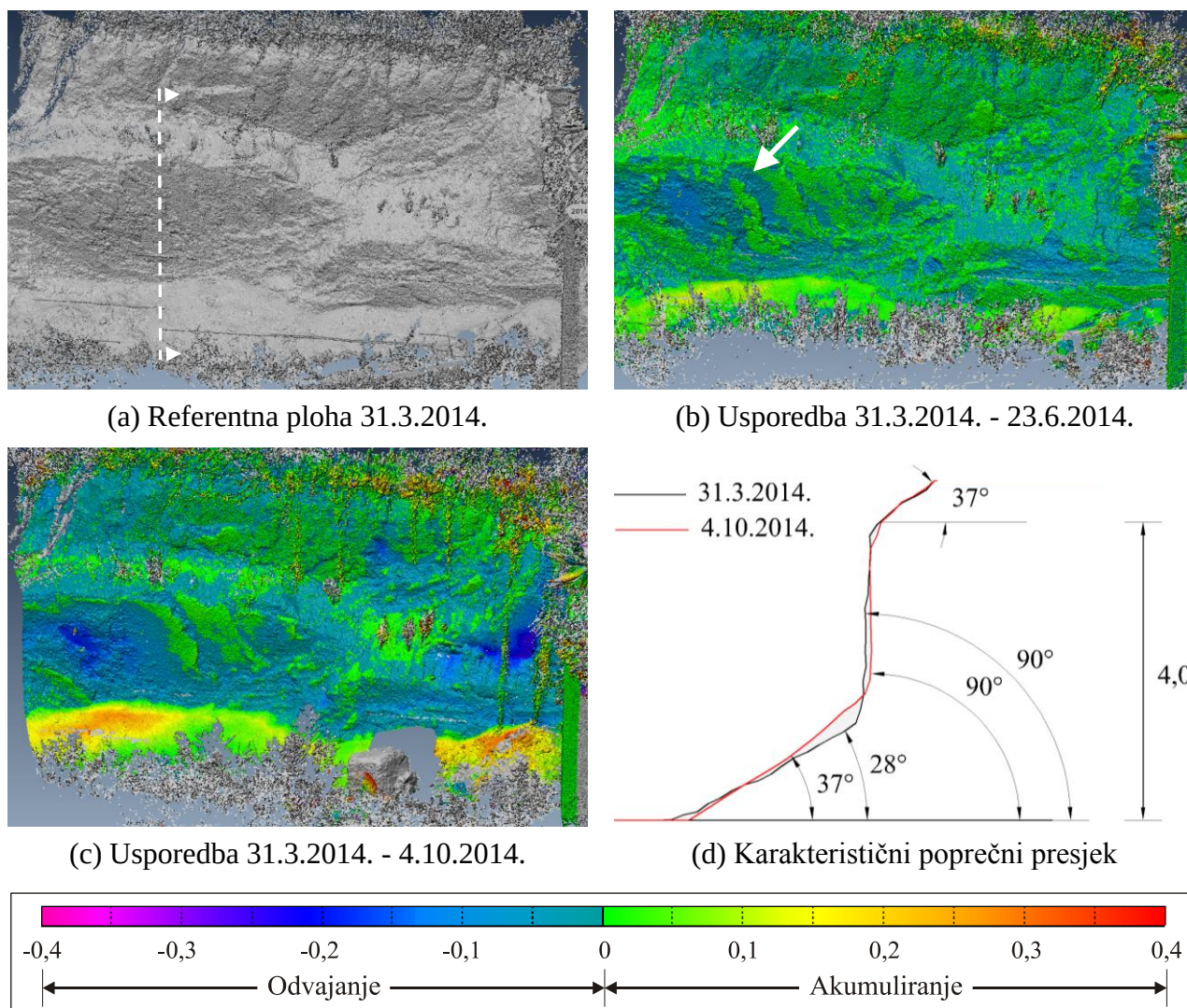
Slika 5.15. a) - c) Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „Žnjan 2“ za navedene epohe mjerenja; d) Karakteristični poprečni presjek

### Trstenik 1

Pilot lokacija „Trstenik 1“ nalazi se 300 m sjevero-zapadno od lokacije „Žnjan 1“, sa sličnim geološkim postavkama (Slika 5.4.c i Tablica 5.2.). U ovom slučaju također izostaju deblji slojevi pješčenjaka, međutim ravnina zasjecanja je sa smjerom nagiba prema jugu. Iako početni nagib zasjecanja nije poznat, budući je iskop najvjerojatnije proveden za potrebe izgradnje objekta prema susjednim pokosima može se pretpostaviti da je izveden vertikalno.

U ovom slučaju smjer nagiba i nagib zasjeka i međuslojnih pukotina je približno isti (Tablica 5.2.) te eroziju dodatno pospješuje prelaganje tankouslojenih lapora. Na slici 5.16. prikazana promjena morfologije zasjeka za cjelokupni period opažanja (31.3.2014. - 4.10.2014.).

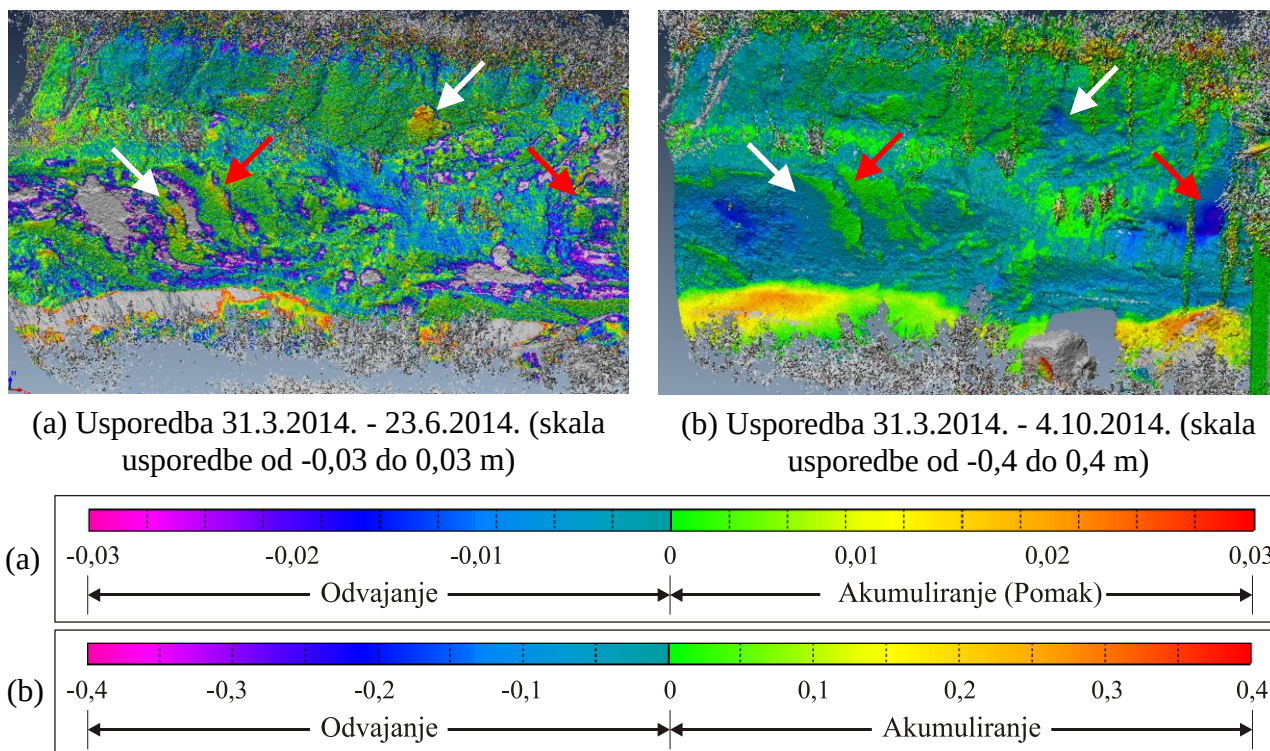
Prosječnu eroziju u ovom slučaju nije moguće procijeniti budući promjena u periodu od 6 mjeseci iznosi od nekoliko centimetara do nekoliko decimetara. Npr. u odabranom karakterističnom poprečnom presjeku iznosi 8 cm, što se podudara s debljinom slojeva, uvećanom za mogući pomak sloja (zijeve) koji je mogao biti prisutan prije prelaganja.



Slika 5.16. a) - c) Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „Trstenik 1“ za navedene epohe mjerenja; d) Karakteristični poprečni presjek

Kada se rezultati polja razlika između prve dvije epohe prikažu u rasponu vrijednosti od -0,03 do 0,03 m (Slika 5.17.a) na slobodnom licu zasjeka moguće je primjetiti područja u kojima je izmjeren pomak prema instrumentu reda veličine 1 do 2 cm (žuto-crvenkaste zone označene strelicama). Na slici 5.17.b, za opažanje u sljedećoj epohi, na istim pozicijama zabilježeno je lokalno odranjanje ili prelaganje slojeva. S time je nedvojbeno dokazano da navedenim događajima prethodi pomak prema slobodnom djelu iskopa te da ga je pravovremenim i učestalim opažanjem TLS-om moguće opaziti i izmjeriti.



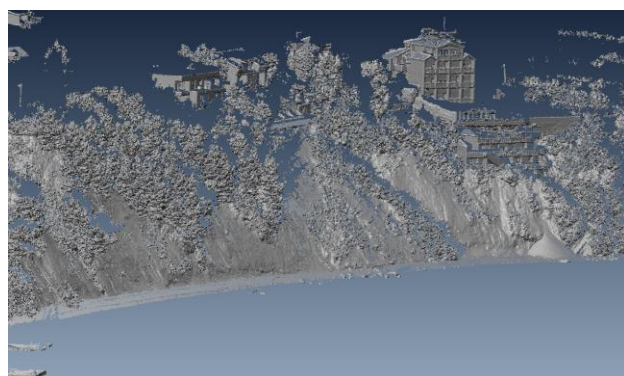


Slika 5.17. Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „Trstenik 1“ sa različitim skalama usporedbe

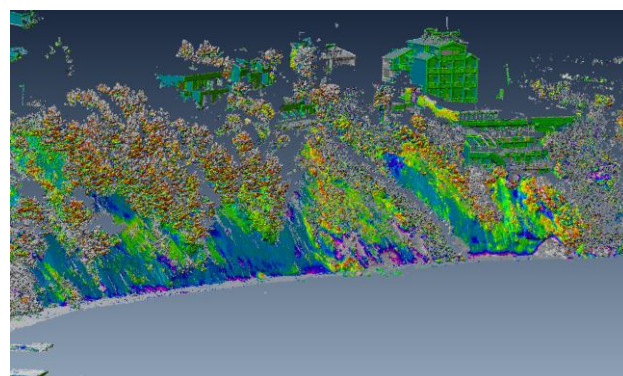
### Duilovo 1

Pilot lokacija „Duilovo 1“ je u naravi prirodni klif duljine 2,0 km na južnoj obali grada Splita. Budući su u žarištu ovog rada zasljeci u mekim stijenama, u nastavku se neće dodatno razmatrati utjecaj blizine mora (erozija valovima i utjecaj soli) na rastrošbu i stabilnost, već se isključivo prikazuju rezultati opažanja.

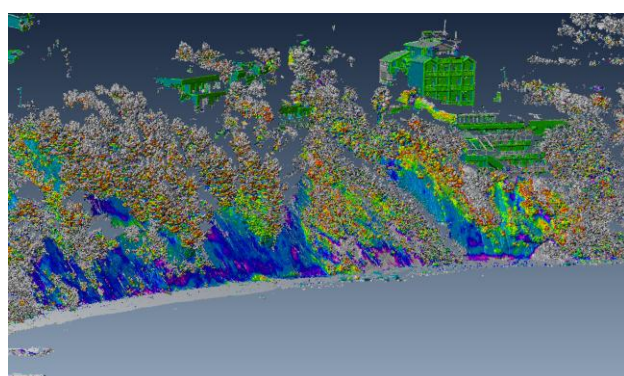
Na slici 5.18. prikazana je promjena morfologije zasljeke za cjelokupno razdoblje opažanja (7.3.2012. - 3.10.2014.). Prosječna erozija u dvije i pol godine iznosi oko 20 centimetara, od reda veličine desetak u višim djelovima kosine do 40-50 cm u nožici klifa. Dok u gornjem djelu klifa prosječna godišnja erozija odgovara vrijednostima zabilježenim na drugim pilot lokacijama (red veličine 5 cm/god), djelovanje erozije valovima (u ovom slučaju pri dominantnom vjetru Jugu) uzrokuje pojave niza lokalnih klizanja rastrošenog materijala po površini pokosa (ljubičasta područja na slici 5.18.c) te povećanje nagiba pokosa koje u konačnici može uzrokovati pojavu većih nestabilnih zona u vidu odrona ili klizišta. Npr. na slici 5.18.d-lijevo vidljiv je obris odloženog materijala u obliku stošca visine 4,3 m. Isti materijal je do sljedeće epohe opažanja u potpunosti uklonilo more (5.18.d-desno), otvarajući pritom put daljnjem progresivnom odranjanju.



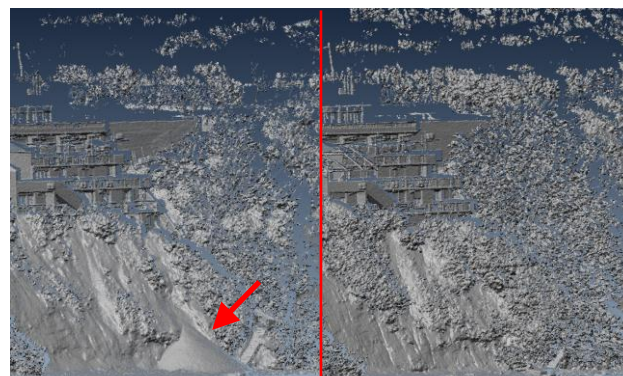
(a) Referentna ploha 7.3.2012.



(b) Usporedba 7.3.2012. - 1.4.2014.



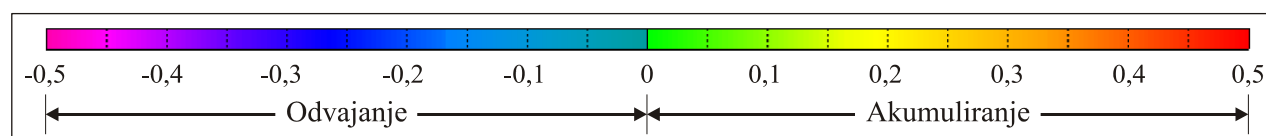
(c) Usporedba 7.3.2012. - 3.10.2014.



(d) Detalj usporedbe 7.3.2012. - 1.4.2014.



(e) Područje opažanja.



Slika 5.18. a) - d) Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „Duilovo 1“ za navedene epohe mjerenja; e) Područje opažanja.

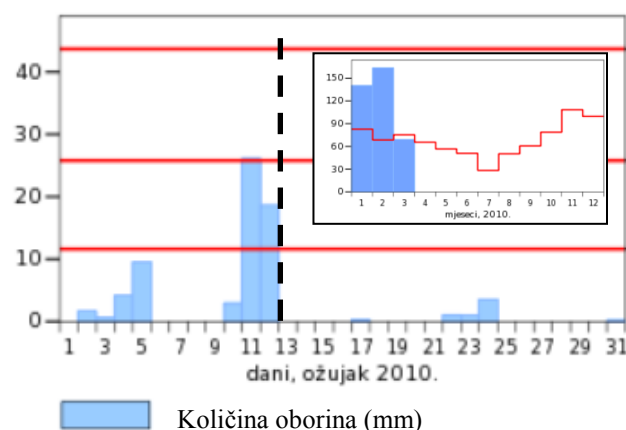
Na slici 5.19.a prikazan je primjer pojave klizišta (položaj ucrtan na slici 5.18.e) na istom klifu prije početka opažanja. I u ovom slučaju može se smatrati da je kombinacija prethodno navedenih čimbenika, s iznadprosječno kišnim razdobljem koje je prethodilo događaju (5.19.b), uzrok pojave nestabilnosti. Potrebno je naglasiti da i u ovom slučaju nije izvršena sanacija, već je



more prirodnim putem „uklonilo“ odloženi materijal, otvarajući pritom put za sljedeću fazu klizanja.



(a) Fotografija dan nakon klizanja (13.3.2010.)

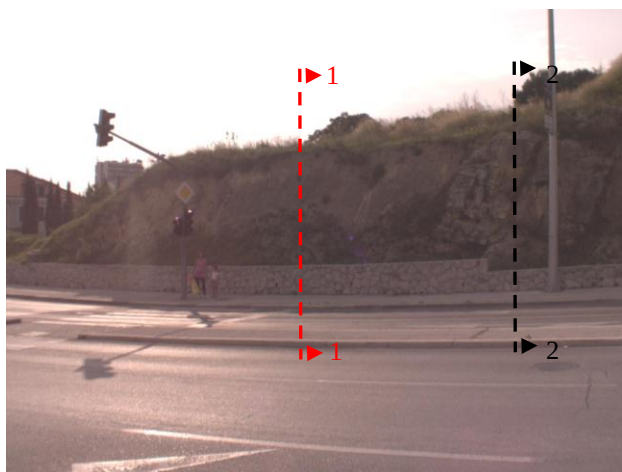


(b) Dnevna (ožujak 2010.) i mjesečna (1.-3. 2010.) količina oborina (Split-Marjan, DHMZ)

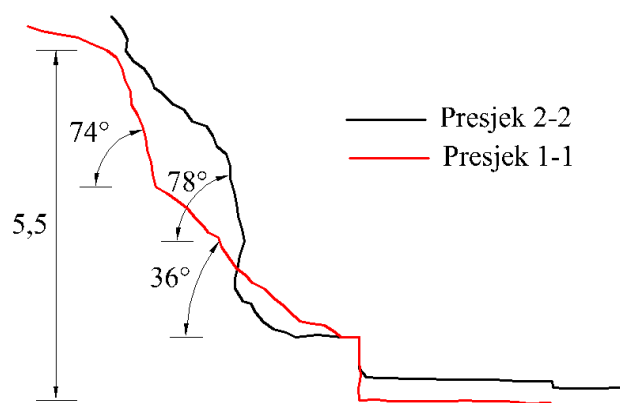
Slika 5.19. Zabilježeno klizište na širem području pilot lokacije „Duilovo 1“.

### Gripe 1

Pilot lokacija „Gripe 1“ nalazi se 2,0 km zapadnije od lokacije „Žnjan 2“, sa sličnim geološkim postavkama (Slika 5.20.a i Tablica 5.2), uz prisutan geološki član otporniji na rastrošbu u inženjerskom razdoblju vremena. Ravnina zasjecanja je sa smjerom nagiba prema istoku. Iako početni nagib zasjecanja nije poznat, prema otpornijim članovima može se procijeniti da je iznosio oko  $80^\circ$ .



(a) Fotografija lokacije 4.10.2014.



(b) Karakteristični poprečni presjek

Slika 5.20. Pilot lokacija „Gripe 1“ s karakterističnim poprečnim presjekom.

Prosječni iznos erodiranog sloja na lokaciji za promatrano razdoblje (6 mjeseci) iznosi 1,5 cm, što odgovara procjeni pomaka vrha prema čvršćim članovima oko 1,1 m (zasjek je urađen

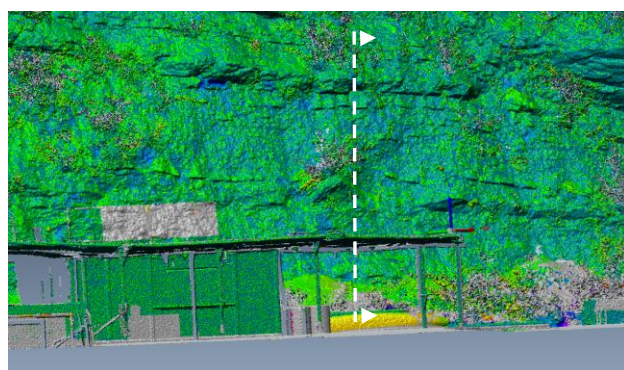


prije cca 40 godina). U ovom slučaju zanimljivo je primjetiti da je erozija manje intenzivna nego kod prethodnih zasjeka, što se može pripisati nizu čimbenika (manja visina zasjeka, pojava zelenog omotača na površini i vrhu pokosa, utjecaj korijenja vegetacije i sl.).

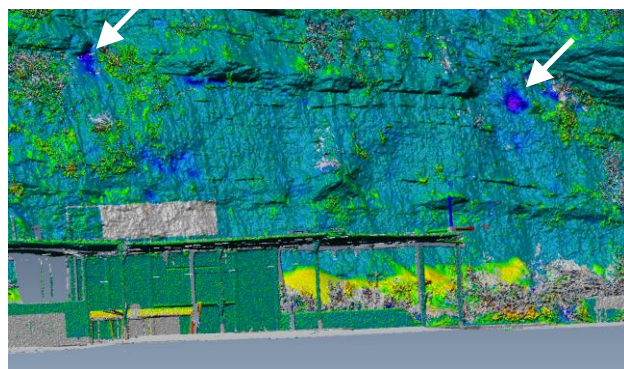
### Kaštelet 1

Pilot lokacija „Kaštelet 1“ je u naravi prirodni klif na jugo-zapadnoj obali grada Splita, koji je naknadnim nasipavanjem obale zaštićen od utjecaja mora.

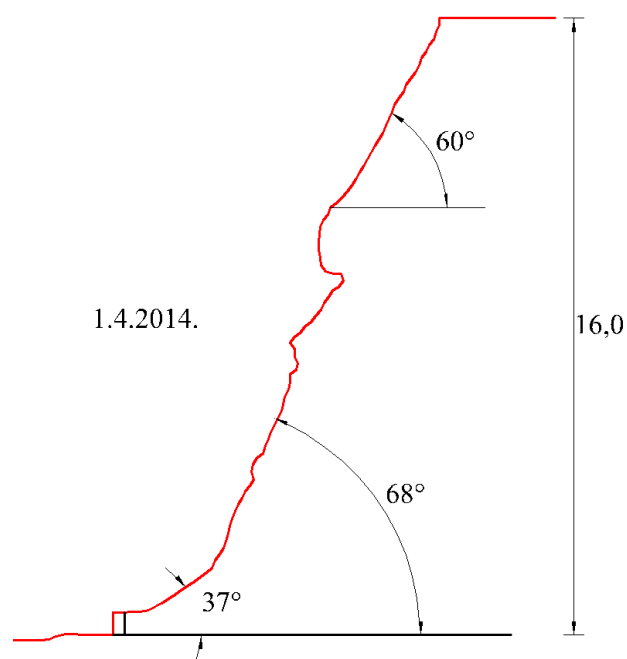
Geološke postavke prikazane su u Tablici 5.2. U ovom slučaju prisutan je masivniji sloj pješčenjaka, koji je podložan odranjanju većih blokova uslijed diferencijalne rastrošbe gradiva koji ga okružuje. Na slici 5.21. prikazana je promjena morfologije zasjeka za cjelokupni period opažanja (1.4.2014. - 4.10.2014.).



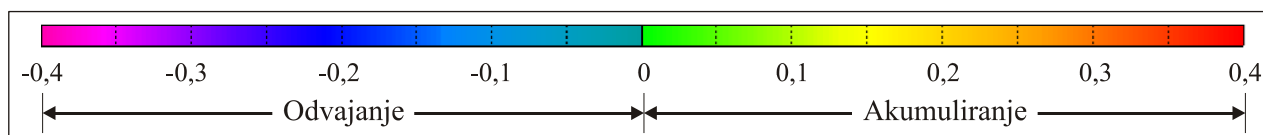
(a) Usporedba 1.4.2014. - 24.6.2014.



(b) Usporedba 1.4.2014. - 4.10.2014



(c) Karakteristični poprečni presjek



Slika 5.21. a) - b) Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji za navedene epohe mjerenja s referentnom plohom; c) Karakteristični poprečni presjek

Prosječni iznos erodiranog sloja na lokaciji za promatrano razdoblje (6 mjeseci) iznosi 4,5 cm, što je gotovo dvostuko više nego na lokaciji „Žnjan 1“ (2,8 cm). Budući je u ovom slučaju

mikrolokacija izložena djelovanju južnih vjetrova s kišom, rezultati opažanja su očekivani i potvrđuju dosljednost metodologije opažanja za iste meteorološke i geološke postavke. Odron čvršćeg člana dimenzija cca 30 cm, kao posljedica diferencijalne erozije, označen je bijelom strelicom.

### Kaštelet 2

Pilot lokacija „Kaštelet 2“ primjer je razlomljenog boranog flišnog slijeda (Slika 5.4.b i Tablica 5.2.). U ovom slučaju izostaju deblji slojevi pješčenjaka te su otporniji proslojci (Tip I) uglavnom tankouslojeni (do nekoliko cm). Na slici 5.22. prikazana promjena morfologije zasjeka za cjelokupni period opažanja (1.4.2014. - 4.10.2014.).

Prosječni iznos erodiranog sloja na lokaciji za kratak period opažanja (6 mjeseci) nije moguće procijeniti zbog velikog učešća čvršćih članova te ovu lokaciju nije poželjno razmatrati u svojstvu erozije zasjeka u mekoj stijeni.



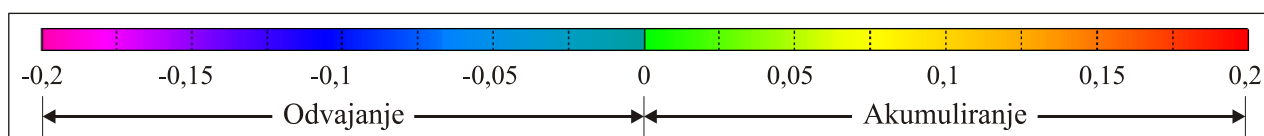
(a) Fotografija lokacije 1.4.2014.



(b) Usporedba 1.4.2014. - 24.6.2014.



(c) Usporedba 1.4.2014. - 4.10.2014.



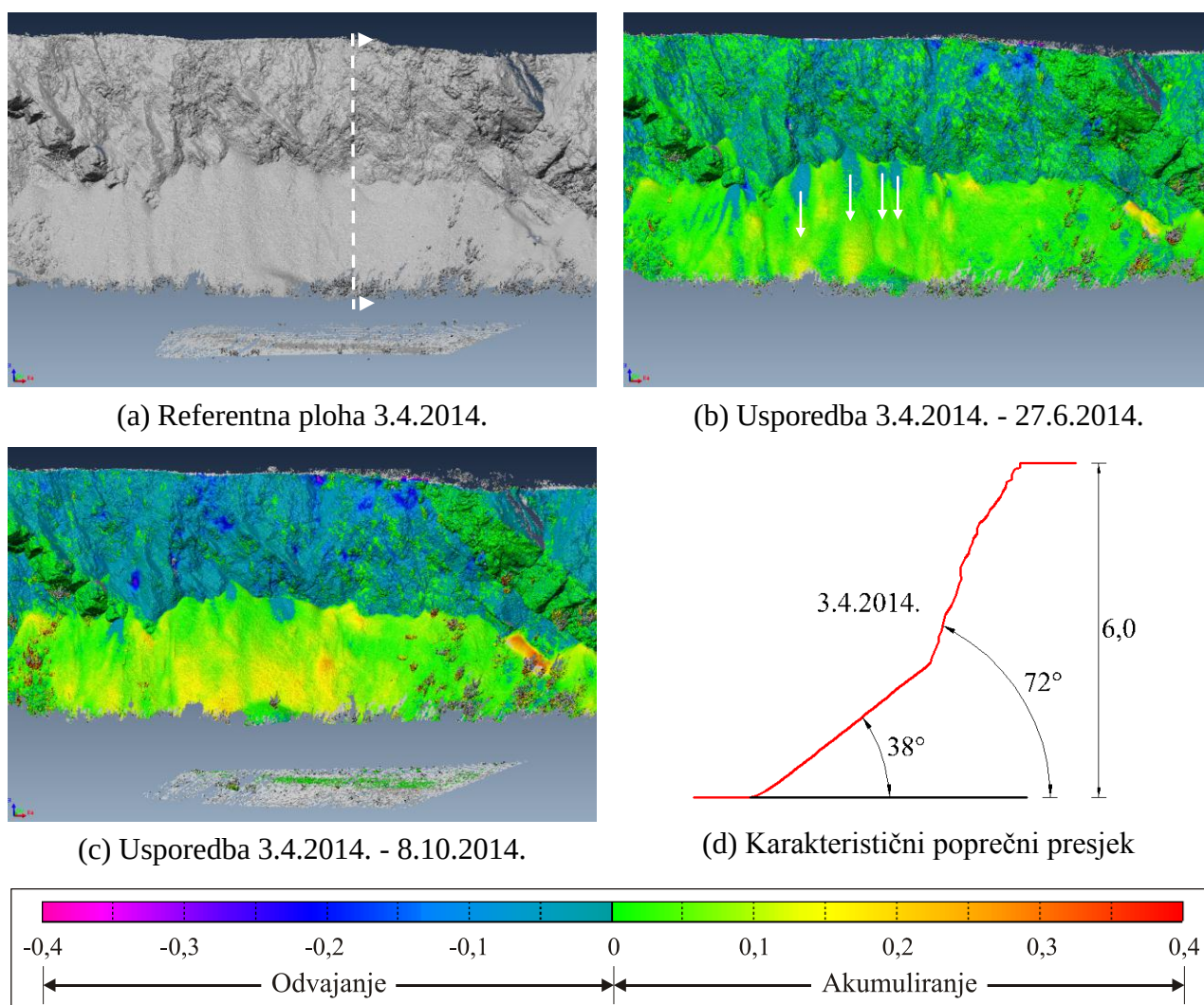
Slika 5.22. a) Pilot lokacija „Kaštelet 2“; b) - c) Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji za navedene epohe mjerenja s referentnom plohom



## 10. kolovoz 1 do 5

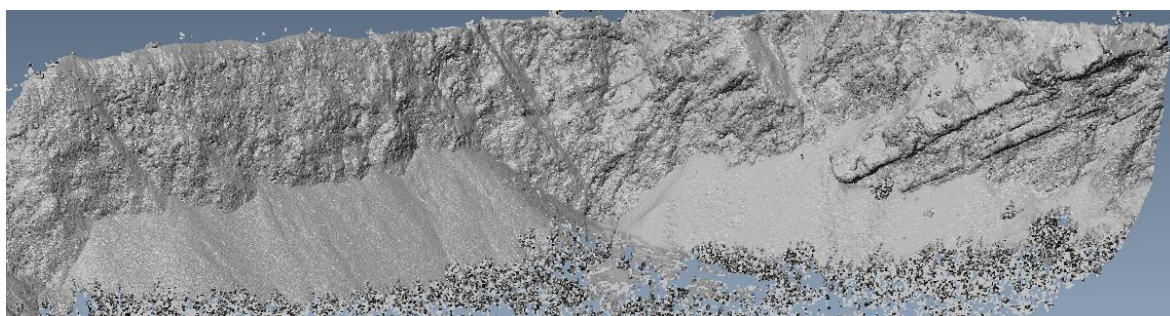
Pilot lokacije 10. kolovoz 1 do 5 nalaze se na području bivšeg eksploatacijskog polja "10. kolovoz" (zatvoreno 2008.). Tvore ga većim djelom debelo-uslojeni vapnenački lapori s proslojcima debelo-uslojenih i tanko-uslojenih pješčenjaka, te u krovnim djelovima lapori. Pri odabiru lokacija opažanja glavni kriteriji su orijentacija zasjeka (zapadno, južno i istočno orijentirani) te odnos ravnine zasjecanja i nagiba međuslojnih pukotina.

Na slici 5.23. prikazana je promjena morfologije zasjeka za cjelokupno razdoblje opažanja na lokaciji „10. kolovoz 1“ (3.4.2014. - 8.10.2014.). Prosječni iznos erodiranog sloja na lokaciji za promatrano razdoblje iznosi 3,4 cm što je, za meku stijenu koja se prema udjelu  $\text{CaCO}_3$  nalazi između Tipa I i Tip II, u usporedbi s ostalim pilot lokacijama osjetno veća. Međutim, s obzirom da je cjelokupno područje duži niz godina izloženo miniranju većih razmjera, zbog izrazite početne fragmentiranosti stijenske mase, u usporedbi s ostalim područjima rezultati su očekivani.

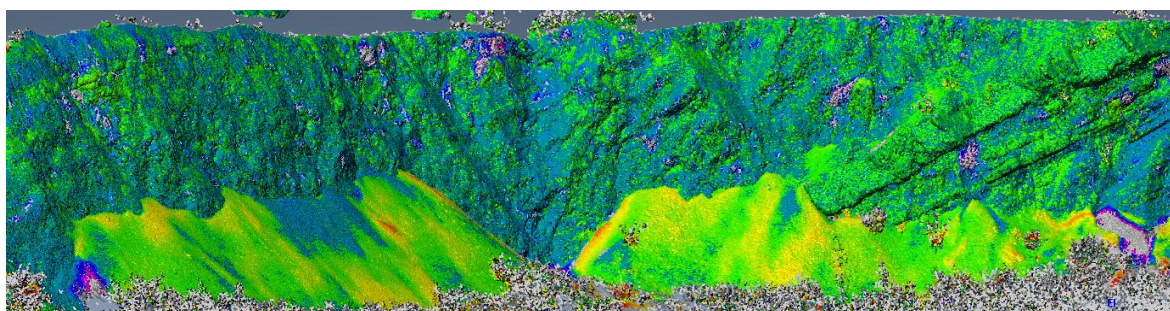


Slika 5.23. a) - c) Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „10. kolovoz 1“ za navedene epohe mjerenja; d) Karakteristični poprečni presjek

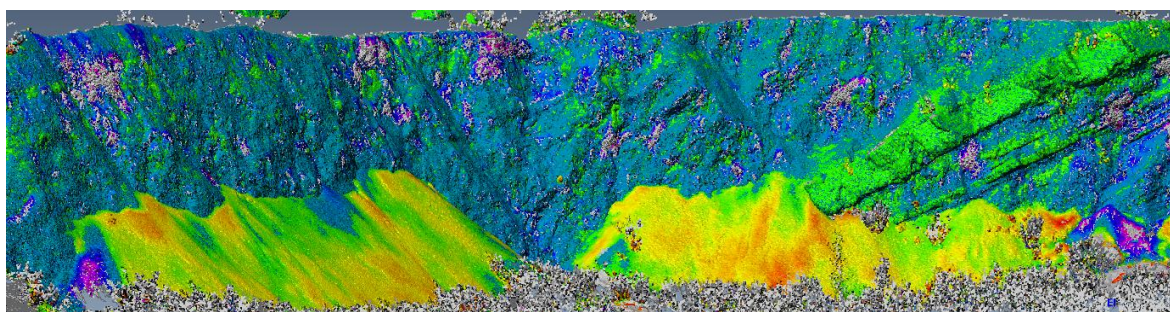
Kao posljedica povećane fragmentiranosti, čak i u tromjesečnom intervalu, uočen je niz manjih odrona (Slika 5.23.b). Budući nagib sipara iznosi  $37-38^\circ$  u istom razdoblju moguće je uočiti i klizanje fragmentiranog materijala po pokosu (smjer klizanja označen bijelim strelicama na slici 5.23.b) kao kombinacija udara pri odronu manjih blokova i klizanja pokrenutog prethodno odloženog gradiva. Iste učinke moguće je primjetiti i na ostalim pilot zasjecima, bez obzira na orijentaciju i tip gradiva. Na slici 5.24. prikazana je promjena morfologije zasjeka za cjelokupno razdoblje opažanja na lokaciji „10. kolovoz 2“ (3.4.2014. - 8.10.2014.). Prosječni iznos erodiranog sloja na lokaciji za promatrano razdoblje iznosi 3,0 cm što je odgovara ostalim pilot lokacijama unutar eksploatacijskog polja.



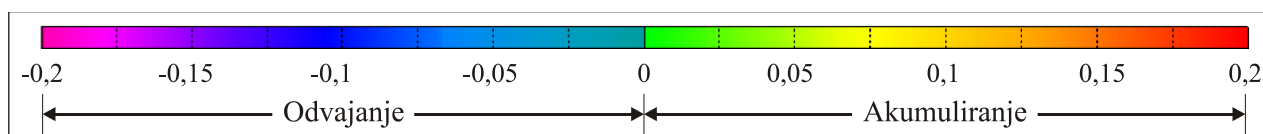
(a) Referentna ploha 3.4.2014.



(b) Usporedba 3.4.2014. - 27.6.2014.



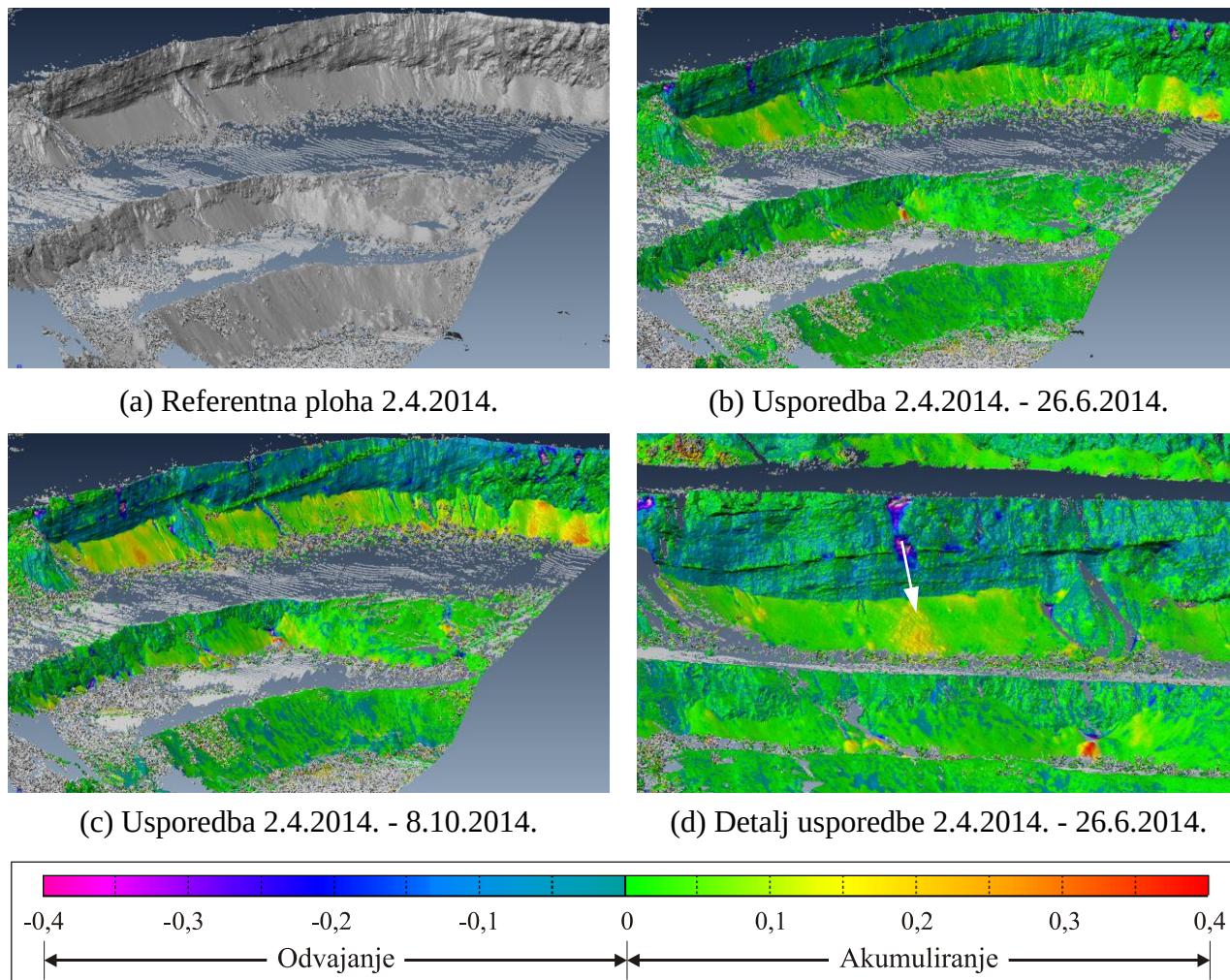
(c) Usporedba 3.4.2014. - 8.10.2014.



Slika 5.24. Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „10. kolovoz 2“ za navedene epohe mjerenja



Na slici 5.25. prikazana je promjena morfologije zasjeka za cjelokupno razdoblje opažanja na lokacijama „10. kolovoz 4 i 5“ (3.4.2014. - 8.10.2014.). Iznos erodiranog sloja na lokaciji za promatrano razdoblje iznosi prosječno 3,0 cm što odgovara ostalim pilot lokacijama unutar eksploatacijskog polja.



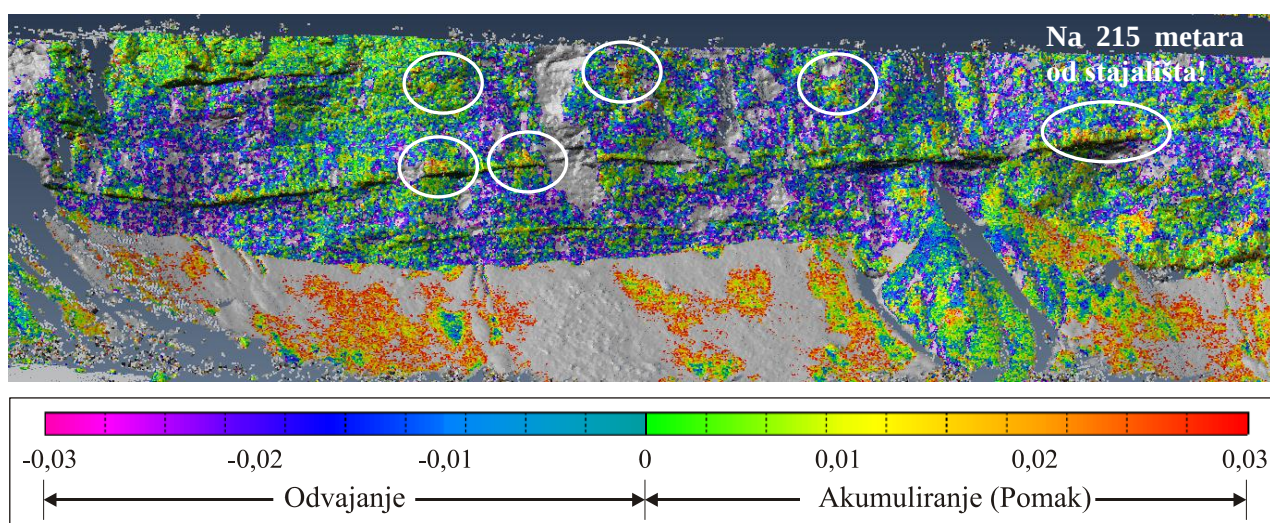
Slika 5.25. Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „10. kolovoz 4 i 5“ za navedene epohe mjerenja

Na slici 5.25.c prema promjeni sipara u šestomjesečnom razdoblju moguće je uočiti nejednoliko odlaganje gradiva u vremenu (uzrokovano lokalnim događajima). Prema obliku i visini sipara koji je jednak na širem području pilot lokacija (ukoliko se zanemare vododerine uzrokovane prelijevanjem površinske vode s gornjih platoa) u dužim vremenskim koracima ovaj fenomen nebi došao do izražaja te su za dugoročne prognoze oblika zasjeka matematički modeli prognoze dovoljno precizni (pod uvjetom da profil ne sadrži debelouslojene čvršće članove).

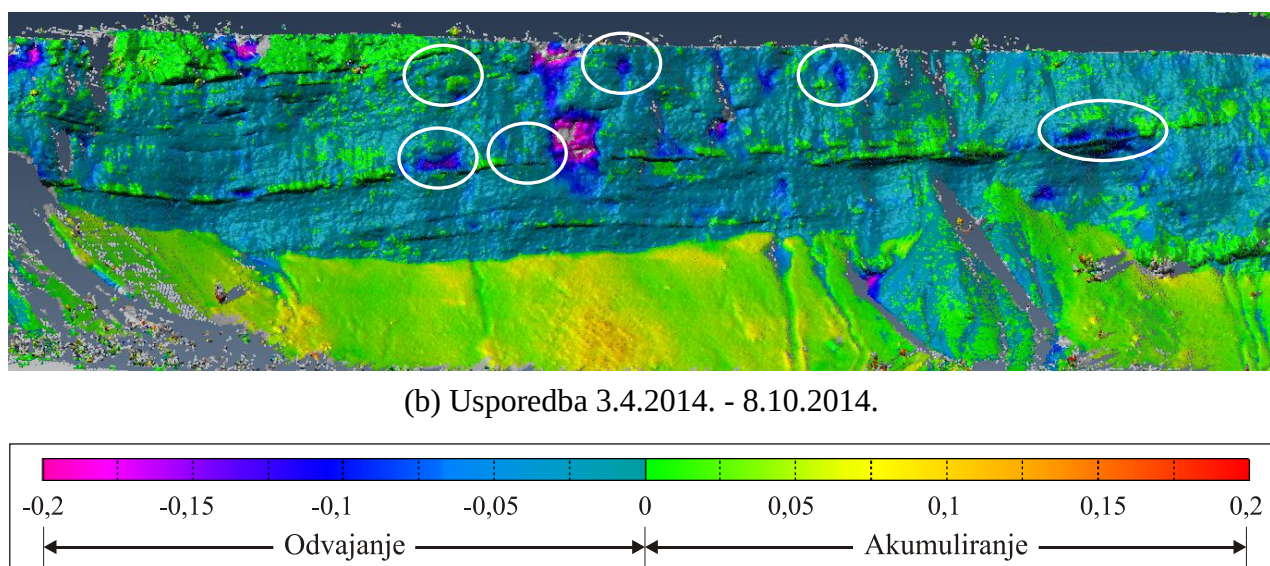
Kao i u slučaju pilot lokacije „Trstenik 1“, u slučaju kada se raspolaže s najmanje 3 epohe opažanja, zanimljivo je pokušati odgovoriti na sljedeće pitanje: da li se usporedbom prve dvije



može opaziti pomak koji prethodi odronu dijela stijenske mase, opaženom u sljedećoj epohi? Uistinu, ukoliko se rezultati polja razlika između prve dvije epohe prikažu u rasponu vrijednosti od -0,03 do 0,03 m (Slika 5.26.a) na slobodnom licu zasjeka moguće je primjetiti područja u kojima je izmjereno pomak prema instrumentu reda veličine 2 do 3 cm (zaokružena područja). Na slici 5.26.b, za opažanje u sljedećoj epohi, na istim pozicijama zabilježeno je lokalno odranjanje. S time je nedvojbeno dokazano da navedenim događajima prethodi pomak prema slobodnom djelu iskopa, te da ga je pravovremenim i učestalim opažanjem TLS-om moguće opaziti i izmjeriti, u ovom slučaju na udaljenosti od stajališta preko 200 metara.



(a) Usporedba 3.4.2014. - 27.6.2014.



(b) Usporedba 3.4.2014. - 8.10.2014.

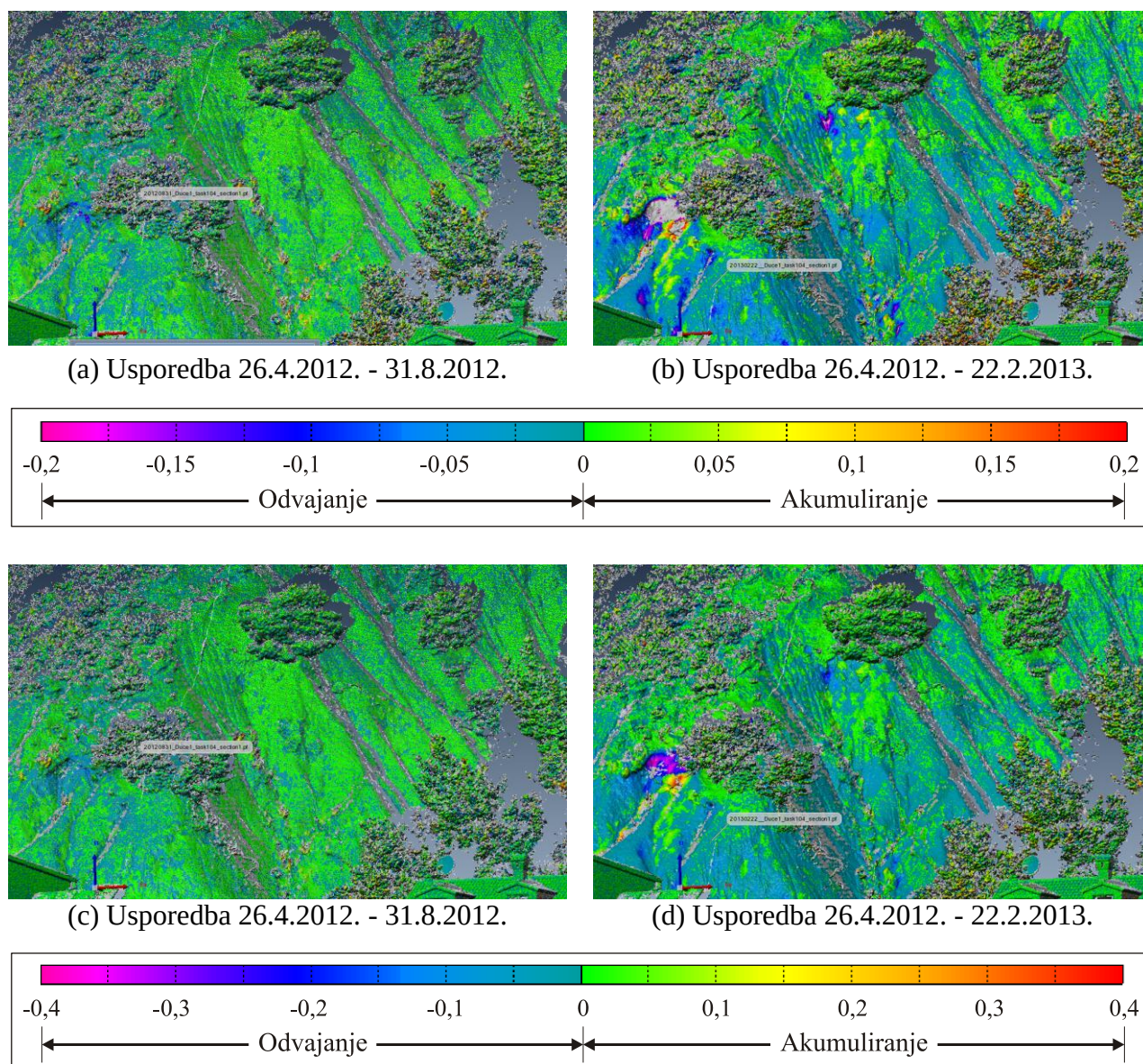
Slika 5.26. Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „10. kolovoz 4“ sa različitim skalama usporedbe



## Duće 2

Pilot lokacija „Duće 2“ je u naravi prirodna ogolina. Locirana je 15 km jugoistočno od grada Splita. Budući su u fokusu ovog rada zasjeci u mekim stijenama, u nastavku se neće dodatno diskutirati, već se isključivo prezentiraju rezultati opažanja.

Na slici 5.27. prikazana promjena morfologije padine za period opažanja (26.4.2012. - 22.2.2013.). Prosječna erozija u periodu od 10 mjeseci iznosi 2,0 - 5,0 centimetara, lokalno (najčešće kroz vododerine) oko 10 cm.



Slika 5.27. Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „Duće 2“ za navedene epohe mjerenja

TLS je vrlo moćan alat za opažanje procesa erozije na ogolinama, uz napomenu da je za kvalitetno opažanje zbog izrazito razvedene morfologije potreban velik broj stajališta i povoljna konfiguracija terena koja ju okružuje.



### 5.4.3. Sumarni prikaz rezultata

U tablici 5.8. prikazani su odabrani rezultati opažanja. Iako su vrijednosti odabrane kao reprezentativne, na svakoj od 14 pilot lokacija postoji mogućnost lokalnih odstupanja kroz reinterpretaciju karakterističnih profila ili utjecaj pojavnosti čvršćih članova u flišnom slijedu.

Tablica 5.8. Sumarni prikaz najznačajnijih rezultata opažanja TLS-om na odabranim pilot lokacijama.

| Oznaka pilot lokacije | Visina H (m)     | Nagib slobodnog lica pokosa | Nagib sipara | Prosječna zabilježena erozija |
|-----------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------------|
| Žnjan 1               | 7,7<br>(5,6-9,8) | 81°                         | 37°          | 5,0 cm/god                    |
| Žnjan 2               | 5,0              | 73°                         | 37°          | 2,6 / 6 mj                    |
| Trstenik 1            | 4,0              | 90°                         | 37°          | Nije primjenjivo              |
| Duilo 1               | 25,0             | 55°-70°                     | -            | 20 cm/2,5 god                 |
| Gripe 1               | 5,5              | 74°                         | 36°          | 1,5 cm/6 mj                   |
| Kaštelet 1            | 16,0             | 68°                         | 37°          | 4,5 cm/6 mj                   |
| Kaštelet 2            | 6,3<br>(3,5-7,5) | 77°                         | 35°          | N/A                           |
| 10. kolovoz 1         | 12,0             | 72°                         | 38°          | 3,4 cm/6 mj                   |
| 10. kolovoz 2         | 7,5              | 65°                         | 36°          | 3,0 cm/6 mj                   |
| 10. kolovoz 3         | 7,0              | 77°                         | 36°          | 3,0 cm/6 mj                   |
| 10. kolovoz 4         | 13,0             | 78°                         | 38°          | 3,0 cm/6 mj                   |
| 10. kolovoz 5         | 22,5             | 78°                         | 38°          | 3,0 cm/6 mj                   |
| Duće 1                | 4,0              | 65°                         | 35°          | N/A                           |
| Duće 2                | do 100,0         | -                           | -            | 2-5cm/10mj                    |

Napomena:  $\alpha$  - smjer nagiba;  $\beta$  - nagib.

N/A - ispitivanje nije provedeno prema planu ispitivanja za više od dvije epohe.

Nije primjenjivo - na lokaciji „Trstenik 1“ dominantan je utjecaj prelaganja slojeva.

## 5.5. Diskusija i zaključci

Opažanje zasjeka u mekim stijenama upotrebom TLS-a osnova je za razumjevanje procesa erozije u ovom tipu stijena. Iako je dostupna duže vrijeme, zbog relativno visoke nabavne cijene ovi uređaji još ne nalaze široku primjenu u geologiji i srodnim disciplinama. Prema dostupnoj literaturi nema zabilježenih sličnih studija u ovom tipu gradiva, osim nekoliko primjera opažanja erozije obalnog pojasa [12, 14, 83], koji su atraktivniji zbog skale problema, utjecaja djelovanja valova i morskih struja te generalno bržeg odvijanja procesa.

Količinu erodiranog i odloženog materijala na zasjecima i strmim pokosima dosad nije bilo moguće jednostavno niti precizno odrediti. Upotrebom TLS-a omogućena je naknadna detaljna analiza opažanih zasjeka te odabiranje jednog ili više reprezentativnih profila za geotehničku analizu. U ovom radu su, na temelju izvršenih opažanja, provjerena dva najučestalija matematička modela erozije zasjeka: Bakker–Le Heuxov i Fisher–Lehmannov. Usporednom analizom utvrđeno je da, nakon početne relaksacije zasjeka, Fisher–Lehmannov model najbolje opisuje eroziju na odabranim pilot lokacijama u području Dalmacije. Pri tome Bakker–Le Heuxov model je poželjno kombinirati s Fisher–Lehmannov modelom za simulaciju početnog rasterećenja kod izvedbe strmijih zasjeka ili koristiti bilinerarni kriterij prema autoru.

Zabilježeni nagibi slobodnog pokosa zasjeka u ovom radu kreću se u rasponu od oko 70° do 80°, osim u slučajevima kada pri izvedbi odabran blaži pokos. Nagib sipara u rasponu od 35° do 38°, bez obzira na tip gradiva ili odnos udjela mekših i čvršćih slojeva, ukoliko je riječ o flišnom slijedu. Čak i nakon dugogodišnjeg opažanja (npr. za lokaciju „Gripe 1“ nakon 40 godina) osnovni odnosi nagiba zasjeka i sipara se podudaraju sa sličnim primjerima s kraćim vremenskim intervalima, što potvrđuje hipotezu da Bakker–Le Heuxov model nije poželjno samostalno koristiti za ovakve vrste stijena.

Prosječna godišnja erozija zabilježena na svim pilot lokacijama kreće se u rasponu od 3 do 7 cm/god (prosječno 5 cm/god) za zasjeke na kopnu, do 10 cm/god za obalne klifove („Duilovo 1“ i „Kaštelet 1“). Navedene vrijednosti su isključivo orijentacijske, utvrđene na više profila za svaku odabranu lokaciju kao prosječna vrijednost za kratko razdoblje opažanja te je lokalno moguća pojava i većih vrijednosti.

Za potpunu analizu stabilnosti zasjeka u vremenu, potrebno uvijek sagledati mogućnost pojave lokalnih nestabilnosti kao što su: klizanja po primarnim i sekundarnim pukotinskim sustavima (npr. „Žnjan 1“), prelaganje (npr. „Trstenik 1“), odron uzrokovan diferencijalnom rastrošbom i erozijom (npr. „10. kolovoz 4“) ili pojavu klizišta (npr. „Duilovo 1“).

U konačnici potrebno je naglasiti nekoliko prednosti TLS-a uočenih u ovom radu u odnosu na klasične metode opažanja. U prvom redu pribavljanje podataka je brzo i detaljno, za razliku od drugih metoda opažanja omogućava kreiranje detaljnih modela zasjeka bez potrebe pristupanja istim, što najčešće kod strmih zasjeka nije ni moguće ili je opasno za provoditelja (npr zasjek na lokaciji „10. kolovoz 5“ je visine 22,5 m i nagiba 78°).

Kroz računalne alate koji koriste ICP algoritam (npr. Polyworks IMAlign), ili slične algoritme koji se temelje na metodi najmanjih kvadrata i minimiziranju sume Euklidske udaljenosti referentnog i pomičnog oblaka točaka, moguće je nakon georeferenciranja referentnog modela značajno pojednostavniti postupak daljnjeg prikupljanja podataka. Naime, utvrđivanjem fiksnih objekata i/ili geoloških članova koji nisu podložni eroziji u inženjerskom razdoblju vremena te korištenjem istih za preklapanje s referentnim modelom, posrednim putem se vrši georeferenciranje pribavljenog oblaka točaka u promatranoj epohi. S time se izbjegava angažiranje dodatne opreme za svaku narednu epohu mjerenja te se opažanje može vršiti samo uz upotrebu TLS-a.

Iako nije ključna za ovu studiju, u tijeku analize podataka uočena je još jedna prednost velike količine podataka koja se pribavlja TLS-om. Kao što je prikazano na slici 5.26., s TLS-om je moguće unaprijed utvrditi pojavu lokalnih nestabilnosti, kojima prethodi pomak koji je u redu veličine točnosti instrumenta. Iako je u ovom slučaju u žarištu gradivo koje je zbog svoje izražene heterogenosti (fliš) podložno diferencijalnim pomacima, sama mogućnost uočavanja malih pomaka (reda veličine 1-2 cm) na udaljenostima većim od 200 m ohrabruje za nastavak daljinskih istraživanja fenomena odrona na padinama. Pri tome je važno napomenuti da je vremensko razdoblje između provedenih opažanja od ključnog značaja. Naime, iako je za proučavanje fenomena erozije dovoljan vremenski korak reda veličine godinu dana, za detaljniju analizu fenomena relaksacije zasjeka i pomaka koji prethode odronu vremenski korak mora biti reda veličine od nekoliko tjedana do nekoliko mjeseci.

## **6. ZAKLJUČCI I PRAVCI DALJNJIH ISTRAŽIVANJA**

### **6.1. Zaključci**

Pod pojmom rastrošba krije se niz procesa koji u konačnici uzrokuju promjenu fizikalno mehaničkih svojstava stijene. Sagledavanje i mjerenje doprinosa svakog procesa je vrlo složen zadatak (ponekad i nemoguć), osim u slučajevima kada je jedan od njih dominantan. U slučaju lapora s područja Dalmacije, klimatološke značajke područja omogućavaju izdvajanje jednog procesa kao dominantnog - sušenje i vlaženje meke stijene. Pri tome nije poželjno unaprijed zanemariti mogućnost pojave ostalih procesa, ukoliko postavke mikrolokacije omogućuju njihovu pojavu.

U okviru ovog rada, na zasjeku kao primjeru geotehničkog zahvata u mekoj stijeni, sagledan je uzročno-posljedični slijed događaja koji uzrokuje promjenu morfologije zasjeka u vremenu. Slijed događaja započinje zasjecanjem kosine, nastavlja se rastrošbom gradiva od kojeg je izgrađena u kombinaciji s erozijom kao sredstvom transporta, te se dovršava ponovnim stabiliziranjem kosine u nekom novom obliku. Iako je sama intervencija u okoliš prvotni uzrok neravnoteže stanja naprezanja u okolini zasjeka, važan čimbenik za razvoj procesa, kao i procjenu njegovog vremenskog toka, je podložnost stijene rastrošbi u inženjerskom razdoblju vremena.

Podložnost stijene rastrošbi obično se opisuje indeksima trajnosti na intaktnim uzorcima ili analizom inženjerskih svojstava pri različitim stupnjevima trošnosti građiva. U ovom radu upotrebljena su oba pristupa. Prije provedbe sveobuhvatne analize prethodno je izvršena procjena učinkovitosti standardnih ispitivanja na građivu s područja Dalmacije.

Naime, na prethodno provedenim ispitivanjima na uzorcima sa šireg područja Splita, uočeno je da rezultati standardnih laboratorijskih pokusa, preporučenih od strane ISRM-a i ASTM-a, nisu u skladu sa stvarnim stanjem građiva nakon izvršenih pokusa. Iz tog razloga uvedena je nova varijanta provedbe pokusa upotrebom modificiranog indeksa trajnosti - LSI, koji na primjeru odabranih lapora (uzorka obima 30) s područja Dalmacije, pokazuje visoku podudarnost s vizualnom kategorizacijom ostataka uzorka nakon izvršenog testiranja, pritom osiguravajući mjerljivost rezultata umjesto vizualnog opisa. Osim toga, LSI je pokazao visoki stupanj korelacije sa svojstvima građiva kao što su upijanje ( $R^2=0,82$ ; Slika 3.11.), porozitet ( $R^2=0,86$ ; Slika 3.12.), indeks točkaste čvrstoće ( $R^2=0,76$ ; Slika 3.10.), kao i jasne granice pri podjeli građiva prema tipu ostatka (Slika 3.14.). Prethodno navedeno ga, uz izraženu razlučivost prikaza rezultata na logaritamskoj skali (rezultat je prikazan u razlikama koje se broje u redu veličina te su kao takve razumljivije i intuitivnije za interpretirati), čini pogodnim alatom da samostalnom primjenom (Tablica 3.11.) ili u kombinaciji s uvriježenim klasifikacijama otkloni uočene nedostatke u ovom tipu građiva.

Za analizu inženjerskih svojstava odabrana je analiza parametara posmične čvrstoće prema Mohr-Coulombovom zakonu. U ovom slučaju, problem se pojavio u samom začetku budući trenutno ne postoji standardizirana oprema prikladna za ispitivanje ovog tipa građiva.

Iako je obim provedenih ispitivanja značajan, zbog statistički gledano malog broja provedenih ispitivanja, koreliranje s indeksnim svojstvima nije izvršeno, ali s druge strane uzorak je reprezentativan za utvrđivanje prijedloga smjernica za ispitivanje posmične čvrstoće mekih stijena. Određivanje parametara posmične čvrstoće intaktnog uzorka izvršeno je na grupama uzoraka pri različitim stupnjevima rastrošbe, uz osmišljavanje i primjenu dodatka propisanom postupku te simuliranje postupka razvoja rastrošbe u laboratoriju. U konačnici se može zaključiti da je predloženi postupak simulacije rastrošbe u laboratoriju provediv unutar prihvatljivih vremenskih okvira, te se za testiranja preporučuje kombinacija upotrebe uređaja za direktno smicanje stijena i uređaja za direktno smicanje tla. Smjernice za primjenu postupka laboratorijski simulirane rastrošbe u mekim stijenama prikazane su u tablici 3.12.

Kao što indirektno ukazuju laboratorijska ispitivanja trajnosti, mineraloški sastav stijene značajno utječe na njihovu trajnost te je svaku mogućnost uvida u isti potrebno iskoristiti. Stoga je

u ovom radu analizirana i mogućnost upotrebe VIS-NIR spektrometrije kao vrlo fleksibilnog i prijenosnog alata za utvrđivanje mineraloških značajki gradiva. Određivanjem udjela kalcijevog karbonata kao veziva te udjela minerala glina kao ispune na primjeru lapora iz Dalmacije, postavlja se osnova za daljnje analize trajnosti već postojećih zasjeka, ali i prognoze promjene morfologije budućih zasjeka uslijed rastrošbe površine.

U ovom je radu izvršena analiza udjela karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ) na 149 uzoraka lapora temeljem koje se može zaključiti da se pojavnost karbonata u laporu može detektirati analizom NIR dijela spektra te upotrebom odgovarajućih statističkih alata vrednovati. Za karbonatne stijene utvrđena veza između udjela karbonata i karakterističnog apsorpcijskog vrha je nelinearna (Slika 4.17.), ali i da se za raspon pojavnosti mekih stijena u ovom području može aproksimirati linearnom. Pri manjim udjelima karbonata složenost samog gradiva dolazi do izražaja te nije preporučljivo koristiti kvantifikacijske metode na spektralnom otisku bez potpune analize cijelog spektralnog otiska. Nadalje, upotreba kemometrijskih metoda (regresijska stabala i neuralne mreže) na cijelom dostupnom spektru, polučila je uspjeh posebice kroz vrednovanje utreniranih modela, te je za odabrani model neuralne mreže pri procjeni udjela  $\text{CaCO}_3$  postignut vrlo visoki koeficijent determinacije na validacijskom setu ( $R^2=0,87$ ).

Kvalitativna analiza cijelog spektra, urađena na ukupno deset uzoraka s područja Dalmacije i Medvednice, potvrđuje da je na spektralnom otisku moguće uočiti promjene koje proizlaze iz varijacije masenih udjela sastavnica gradiva prema tipu gline. Uz reprezentativno uzorkovanje i statistički značajniji uzorak, s paralelno urađenim analizama klasičnim metodama kao i u slučaju  $\text{CaCO}_3$ , upotrebom kemometrijskih metoda mogu se izraditi prognozni modeli i za ostale sastavnice lapora (npr. udio pojedinog minerala glina), ali i za indekse trajnosti kod kojih mineraloški sastav ima dominantnu ulogu (npr. LSI).

Nakon izvršene analize gradiva, u konačnici su sagledane posljedice uočenih procesa koje se na terenu manifestiraju putem erozije i odranjanja. Opažanje navedenih procesa izvršeno je upotrebom TLS-a na 14 zasjeka koje u većem udjelu sačinjavaju meke stijene. Količinu erodiranog i deponiranog materijala na zasjecima i strmim pokosima dosad nije bilo moguće jednostavno niti precizno odrediti. Upotrebom TLS-a omogućena je naknadna detaljna analiza opažanih zasjeka te odabiranje jednog ili više reprezentativnih profila za geotehničku analizu.

U ovom radu definirana je osnova za postavljanje dugogodišnjeg monitoringa, koja se zasniva na izmjeni metodologije opažanja. Upotrebom odgovarajućih računalnih rješenja, utvrđivanjem fiksnih objekata i/ili geoloških članova koji nisu podložni eroziji u inženjerskom



periodu vremena, izbjeglo se angažiranje dodatne opreme za svaku narednu epohu mjerenja te se opažanje može vršiti samo uz upotrebu TLS-a.

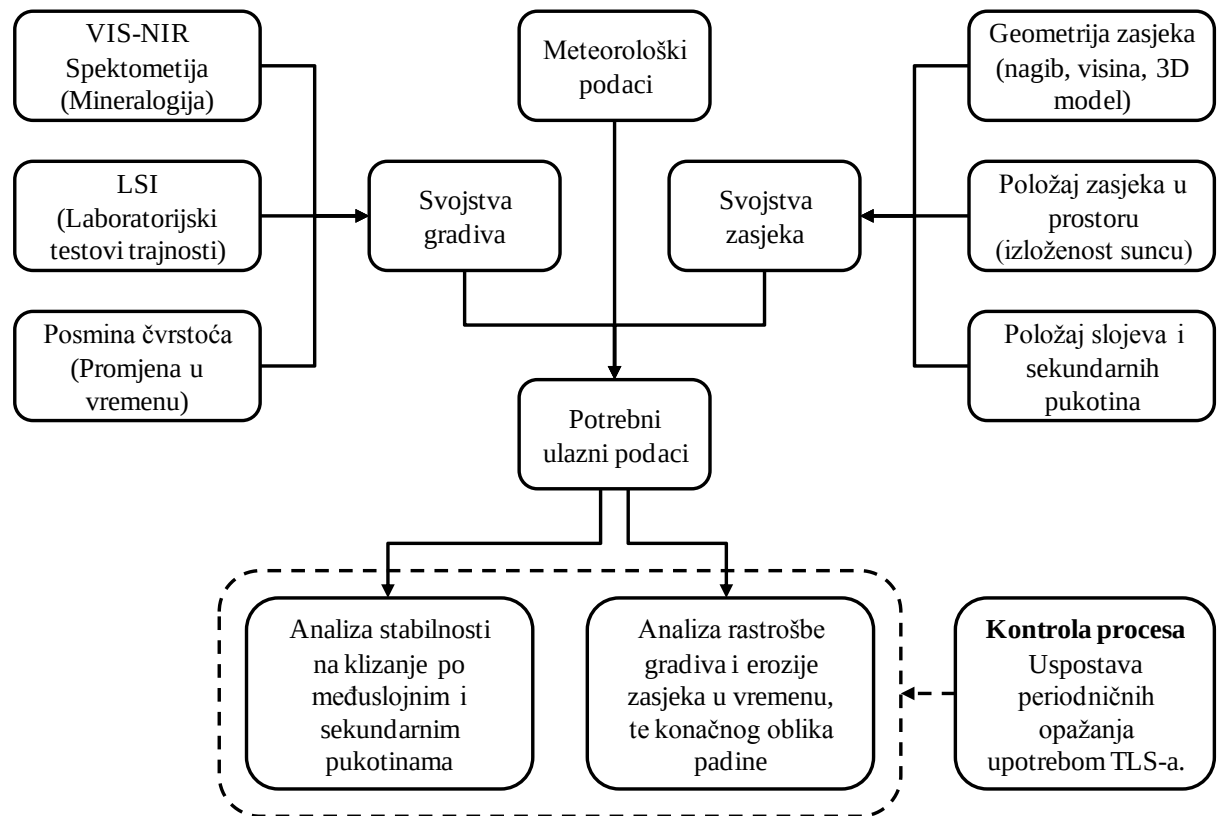
Najznačajniji rezultati se očituju kroz zabilježene nagibe slobodnog pokosa zasjeka (od 70° do 80°), nagib sipara (od 35° do 38°), bez obzira na tip gradiva ili odnos udjela mekših i čvršćih slojeva ukoliko je riječ o flišnom slijedu. Prosječna godišnja erozija zabilježena na svim pilot lokacijama kreće se u rasponu od 3 do 7 cm/god (prosječno 5 cm/god) za zasjeka na kopnu, te do 10 cm/god za obalne klifove.

Na temelju izvršenih opažanja, provjerena su dva najučestalija matematička modela erozije zasjeka: Bakker–Le Heuxov i Fisher–Lehmannov. Usporednom analizom utvrđeno je da Fisher–Lehmannov model najbolje opisuje eroziju na odabranim pilot lokacijama u području Dalmacije. Bakker–Le Heuxov model moguće je primjeniti u kombinaciji s Fisher–Lehmannovim za simulaciju početnog rasterećenja kod izvedbe strmijih zasjeka ili se koristi bilinerarni kriterij prema autoru (jednadžba 5.6).

Rezultati ovog istraživanja, bilo kroz metodološki pristup ili konkretne zaključke ukoliko se radi o sličnom/istom tipu meke stijene, mogu se primjeniti za analizu stabilnosti postojećih zasjeka ili u fazi pripreme izgradnje novih. Shematski prikaz metodološkog pristupa prikazan je na slici 6.1. Potrebni ulazni podaci su:

- Informacije o svojstvima gradiva uvidom u mineraloški sastav (upotrebom klasičnih metoda i/ili VIS-NIR spektrometrijom), procjenom trajnosti stijene putem laboratorijskih testova trajnosti (kod zasjeka se preporuča upotreba modificiranog indeksa trajnosti - LSI) i promjene posmične čvrstoće stijene u vremenu.
- Informacije o svojstvima zasjeka, u prvom redu geometriji (predlaže se upotreba TLS-a za definiranje detaljne geometrije zasjeka putem 3D modela), položaju zasjeka u prostoru te odnosu zasjecanja i uslojenosti stijene i/ili sekundarnih pukotina.
- Meteorološki podaci (broj sušnih i kišnih razdoblja, količina i intenzitet oborina, izloženosti kosine prema suncu te promjena temperature zraka na području na kojem se kosina nalazi).

S navedenim ulaznim podacima vrše se analize stabilnosti na klizanje klasičnim metodama (nisu predmet ovog rada) te analize rastrošbe gradiva i erozije zasjeka u vremenu. Uspostavom periodičnih opažanja, TLS se može koristiti i kao alat za kontrolu odvijanja predviđenih procesa na padini, ali i za pravovremeno uočavanje procesa koji mogu dovesti do pojave globalne nestabilnosti zasjeka (pomake koji prethode odronu ili pojavi klizišta).



*Slika 6.1.* Shematski prikaz primjene rezultata istraživanja kod analiziranja stabilnosti postojećih zasjeka ili kod projektiranja novih.

Na ovaj način mogu se ostvariti značajne uštede zbog izbjegavanja izgradnje skupih potpornih ili zaštitnih konstrukcija, kod izgradnje platoa za potrebe parkirišta, skladišta na otvorenom i sl. u mekim stijenama.

Naglasak ovog rada leži na eksperimentalnoj komponenti znanstvenog istraživanja, koja se često zanemaruje. Treba imati na umu da jedino podaci proizašli iz laboratorijskih ispitivanja i terenskih mjerenja mogu doprinijeti boljim analitičkim, numeričkim i stohastičkim modelima te u konačnici i boljem razumijevanju rastrošbe i njenih efekata u prirodi.

## 6.2. Mogući pravci daljnjih istraživanja

*"... all good research opens up more questions than it answers."*

by Ivan Valiela in *Doing Science*

Pravac daljnjih istraživanja svakako valja potražiti u daljnjem povezivanju uzroka i posljedica rastrošbe, od laboratorijskih ispitivanja kao temelja za bolje razumjevanje podložnosti rastrošbi te što kvalitetniju procjenu mogućih posljedica intervencija u prirodi, do kvantificiranja istih na terenu upotrebom najnovijih tehnika opažanja.

U tom smislu kod laboratorijskih ispitivanja, uz uvijek dobrodošlu nadopunu postojećih istraživanja za predmetno područje, poželjno je proširenje na druge tipove mekih stijena najmanje s područja Hrvatske. Na temelju njih može se potvrditi i poopćiti predmetno istraživanje, odnosno u konačnici iznjedriti novi prijedlog klasifikacije mekih stijena.

Kod ispitivanja čvrstoće mekih stijena, moguće je upotrijebiti saznanja o njihovom ponašanju pod utjecajem rastrošbe pri konstrukciji novih uređaja za ispitivanje, u kojima bi se simulirao cijeli proces te provelo ispitivanje neovisno o tipu stijene. Nadopunom postojećih ispitivanja prezentiranom metodologijom moguće je izraditi praktične smjernice za projektiranje i korištenje rezultata istraživanja u praksi.

Primjena VIS-NIR spektrometrije, kao zamjenske metode determinacije mineralnih svojstava, zahtjeva značajane početne troškove u vidu provedbe paralelnih ispitivanja klasičnim metodama. Međutim, nakon izvršenog "baždarenja" modela za pojedini tip stijene ili nekog drugog inženjerskog gradiva (npr. beton ili čelik) otvara se široki spektar primjene u znanstvenom i stručnom djelovanju. Međutim, čak i bez toga, sama mogućnost kvalitativne analize spektra potvrđuje spektrometar kao alat za potvrđivanje određenih indicija o sastavu gradiva na brz i efikasan način. U tom smislu kao jedan od zadataka u budućem radu nameće se osnivanje baze spektralnih zapisa za što veći broj minerala, stijena i drugih gradiva te njihovo povezivanje s postojećim svjetskim bazama. Time bi se postigao doprinos ne samo od lokalnog značaja, već i šire, budući tehnologije bazirane na VIS-NIR spektrometriji imaju potencijal za široku primjenu i dostupnost „širim masama“ u bliskoj budućnosti.

Utvrđivanje detaljne morfologije zasjeka u prošlom stoljeću bio je skoro pa nezamisliv zadatak. Sama dostupnost tehnologije kao što je TLS obvezuje nas na njihovu primjenu u složenim sredinama kao što je fliš. Uspostavom dugoročnih monitoringa (s trajanjem od pet, deset, pa i više godina) i pokrivanjem cijelog vremenskog toka promjene morfologije zasjeka, u kombinaciji s VIS-NIR spektrometrom, po prvi put imamo mogućnost detaljno razotkriti procese koji ih uzrokuju i način na koji se manifestiraju. Jedan od smjerova je svakako, uz dugoročni monitoring, popratiti i atmosferske utjecaje: vjetra, oborina, osunčanosti zasjeka, ali i orijentacije zasjeka, uslojenosti, udjela pojedinih geoloških članova i sl.

Svaki novi znanstveno-istraživački rad, pa tako i ovaj, utemeljen na terenskim opažanjima uz upotrebu suvremenih tehnologija, obogaćuje saznanja o mekim stijenama i njihovom ponašanju u vremenu. Izravni doprinosi koji proizlaze iz kratkoročnih i dugoročnih opažanja svoju vrijednost svakako mogu dodatno potvrditi kod budućih istraživanja te kreiranja novih matematičkih i numeričkih modela, koristeći ovdje prezentirane podatke za potvrdu smislenosti i valjanosti istih.

## 7. LITERATURA

- [1] Mišćević, P., Vlastelica, G. (2012.): Stabilnost u vremenu kosine iskopane u laporu. *Građevinar* 64/6, 451-461.
- [2] Gulam, V. (2012.): Erozija ogolina u flišu središnje Istre, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
- [3] Lopez Saez, J., Corona, C., Stoffel, M., Rovera, G., Astrade, L., Berger, F. (2011.): Mapping of erosion rates in marly badlands based on a coupling of anatomical changes in exposed roots with slope maps derived from LiDAR data. *Earth Surface Processes and Landforms* 36/9, 1162-1171.
- [4] Sirvent, J., Desir, G., Gutierrez, M., Sancho, C., Benito, G. (1997.): Erosion rates in badland areas recorded by collectors, erosion pins and profilometer techniques (Ebro Basin, NE-Spain). *Geomorphology* 18: 61–75.
- [5] Clarke, M.L., Rendell, H.M. (2006.): Process–form relationships in southern Italian badlands: erosion rates and implications for landform evolution. *Earth Surface Processes and Landforms* 31: 15–29.

- [6] Tribak, A, E. Garouani, A., Abahrour, M. (2009.): Évaluation quantitative de l'érosion hydrique sur les terrains marneux du PréRif oriental (Maroc): cas du sous-bassin de l'oued Tlata. *Sécheresse* 20: 333–337.
- [7] Dugonjić Jovančević, S. (2013.): Procjena hazarda pojave klizanja u flišu. Doktorski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka.
- [8] Admassu, Y., Shakoor, A., Wells, N. A. (2012.): Evaluating selected factors affecting the depth of undercutting in rocks subject to differential weathering, *Engineering Geology*, 124, pp. 1–11.
- [9] Neiman, W. (2012.): Lessons learned from rates of mudrock undercutting measured over two time periods. *Environmental and Engineering Geoscience*, 15 (3), pp. 117–131.
- [10] Goetz, A.F.H. (2009.): Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. *Remote Sensing of Environment*, 113, S5–S16.
- [11] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center (2012.): Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications. Revised. Charleston, SC: NOAA Coastal Services Center.
- [12] Lim, M., Rosser, N. J., Allison, R. J., Petley, D. N. (2009.): Erosional processes in the hard rock coastal cliffs at Staithes, North Yorkshire. *Geomorphology*, 114(1–2), 12–21.
- [13] Dewez, T., Gebrayel, D., Lhomme, D., Robin, Y. (2009.): Quantifying morphological changes of sandy coasts by photogrammetry and cliff coasts by lasergrammetry. *La Houille Blanche*, 1, 32–37.
- [14] Perroy, R.L., Bookhagen, B., Asner, G.P., Chadwick, O.A. (2010.): Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California. *Geomorphology* 118, 288–300.
- [15] ISRM Turkish National Group (2007.): The complete ISRM Suggested methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Ulusay, R., Hudson J.A. (Editors). Ankara, Turkey.
- [16] Bieniawski, Z. T. (1989.): *Engineering Rock Mass Classifications*, John Wiley & Sons, New York.

- 
- [17] Vrkljan, I. (2006.): Inženjerska mehanika stijena, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci i IGH d.d. Zagreb, draft.
- [18] Harrison, J.P. & Hudson, J.A. (2000.): Engineering rock mechanics, Part 2: Illustrative worked examples, Pergamon.
- [19] Šestanović, S. (1993.): Osnove inženjerske geologije – primjena u graditeljstvu. GEING i Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu.
- [20] Šestanović, S. (2001.): Osnove geologije i petrografije. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu.
- [21] Huisman, M., Nieuwenhuis, J.D., Hack, H.R.G.K. (2011.): Numerical modelling of combined erosion and weathering of slopes in weak rock. *Earth Surf. Process. Landforms* 36, 1705-1714.
- [22] Bakker, J.P., Le Heux J.W.N. (1946.): Projective-geometric treatment of O. Lehmann's theory of the transformation of steep mountain slopes. *Proceedings Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (KNAW)* 49(5): 533-547.
- [23] International Society for Rock Mechanics - ISRM (1977.): Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties.
- [24] International Society for Rock Mechanics – ISRM (1981.): Rock Characterization, Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods. Brown, E. T. (Editor). Pergamon Press, Oxford.
- [25] International Society for Rock Mechanics – ISRM (1974.), Suggested methods for determining shear strength.
- [26] Franklin, J.A., Chandra, R. (1972.): The slake durability test. *International Journal of Rock Mechanics and Mineral Science* 9, 325–341.
- [27] Marinčić, S. (1981.): Eocenski fliš jadranskog pojasa. *Geološki vjesnik, Zagreb*, 34: 27-38.



- [28] Korbar, T. (2009.): Orogenic evolution of the External Dinarides in the NE Adriatic region: a model constrained by tectonostratigraphy of Upper Cretaceous to Paleogene carbonates, *Earth-Science Reviews* 96, 296–312.
- [29] Velić, I., Vlahović, I. (2009.): *Geološka karta Republike Hrvatske 1:300.000*. Geološki institut, Zagreb.
- [30] Marinčić, S., Magaš, N., Borović, I. (1967.): *Osnovna geološka karta - Tumač za listove Split i Primošten*. Institut za geološka istraživanja, Zagreb.
- [31] Šestanović, S. (1998): Engineering – geological characteristics of marl from Eocene flysch in the City of Split, Croatia. *The Geotechnics of Hard Soils – Soft Rocks*, Evangelista i Picarelli (eds.), Balkema, Rotterdam, 311 – 314.
- [32] Toševski, A., Grgec, D., Padovan, D. (2012.): Osnovno o genezi, sastavu i trošenju eocenskog fliša hrvatskog obalnog pojasa. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. Vol. 25 str. 47-62 Zagreb.
- [33] Eberhardt, E., Thuro, K., Luginbueh, M. (2005): Slope instability mechanisms in dipping interbedded conglomerates and weathered marls—the 1999 Ruffi landslide, Switzerland. *Engineering Geology* Vol. 77, str. 35–56.
- [34] Martinez-Bofill, J., Corominas, J., Soler, A. (2004.): Behaviour of the weak rock cut slopes and their characterization using the results of the slake durability test. *Proc. "Engineering geology for infrastructure planning in Europe – a European perspective"*, 405-413.
- [35] Šestanović, S., Štambuk, N., Samardžija, I. (1994.): Control of the Stability and Protection of Cut Slopes in Flysch. *Geolog. Croat.*, 47/1, 139-148.
- [36] Martinez-Bofill, J., Corominas, J., Soler, A. (2004.): Behaviour of the Weak Rock Cut Slopes and Their Characterization Using the Results of the Slake Durability Tests. *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe, Lecture Notes in Earth Sciences Volume 104*, 2004, pp 405-413.
- [37] Vlahović, T., (2010.): *Geologija za građevinare*. Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet. 295pp.

- [38] Tišljar, J. (1987.): Petrologija sedimentnih stijena. Rudarsko geološko naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 242pp.
- [39] Šegota, T., Filipčić, A. (1996.): Klimatologija za geografe. Školska knjiga, Zagreb.
- [40] Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M. (2008.): Klimatski atlas Hrvatske 1961–1990., 1971–2000. Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb.
- [41] Gonzalez de Vallejo, L.I., Ferrer, M. (2010.): Geological Engineering. Taylor and Francis Group, CRC Press/Balkema, Leiden, 678 p.
- [42] Robinson, D.A., Williams, R.B.G. (1994.): Rock weathering and landform evolution. Wiley, New York, p 519.
- [43] Koncagul, E.C., Santi, P.M. (1999.): Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability. Shore hardness and rock structural properties. Int J Rock Mech Min 36(2):139–153.
- [44] Oguchi C.T., Matsukura, Y. (1999.): Effect of porosity on the increase in weathering-rind thickness of andesite gravel. Eng. Geol. 55 (1–2): 77–89.
- [45] Oyama, T., Chigira, M. (1999.): Weathering rate of mudstone and tuff on old unlined tunnel walls. Eng Geol 5 (1–2): 15–27.
- [46] Gokceoglu, C., Ulusay, R., Sonmez, H. (2000.): Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. Eng. Geol. 57 (1): 215–237.
- [47] Fang, Z., Harrison, J.P. (2001.): A mechanical degradation index for rock. Int. J. Rock Mech. Min. 38 (8): 1193–1199.
- [48] Tugrul, A. (2004.): The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. Eng. Geol. 75 (3–4): 215–227.
- [49] Mišćević, P., Vlastelica, G. (2011.): Durability Characterization of Marls from the Region of Dalmatia, Croatia. Geotechnical and Geological Engineering, 29: 771–781.
- [50] Fuenkajorn, K. (2011.): Experimental assessment of long-term durability of some weak rocks. Bull. Eng. Geol. Environ. 70: 203–211. DOI 10.1007/s10064-010-0297-8

- [51] Undul, O., Tugul, A. (2012.): The influence of weathering on the engineering properties of dunites. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. 45, Issue 2, Pages 225-239.
- [52] Bryson, L.S., Gomez-Gutierrez, I.C., Hopkins, T.C. (2012.): Development of a New Loss Slake Durability Index for Compacted Shales. *Engineering Geology*, Vol. 139-140, 66-75.
- [53] Hopkins, T.C., Deen, R.C. (1984.): Identification of Shales. *ASTM Geotechnical Testing Journal* 7 (1), 10–18.
- [54] Sousa, L.M.O., Suarez del Rio, L.M., Calleja, L. (2005.): Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Eng. Geol.* 77 (1–2): 153–168.
- [55] Youn, H. and Tonon, F. (2010.): Effect of air-drying duration on the engineering properties of four clay-bearing rocks in Texas. *Engineering Geology*, Volume 115, Issues 1-2, 58-67, ISSN 0013-7952, DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.06.012.
- [56] Cetin, H., Laman, M., Ertunc, A. (2000.): Settlement and slaking problems in the world's fourth largest rock-fill dam, the Ataturk Dam in Turkey. *Engineering Geology* 56 (3-4), 225-242.
- [57] Dick, J.C., Shakoor, A. (1995.): Characterizing durability of mud rocks for slope stability purposes. *Geological Society America, Reviews in Engineering Geology*, v. X, p. 121-130.
- [58] Dhakal, G., Kodama, J., Yoneda, T., Neaupane, K., Goto, T. (2004.): Durability Characteristics of Some Assorted Rocks. *Journal of Cold Regions Engineering*, 18 (3), 110–122.
- [59] Mišćević, P. (1998.): The investigation of weathering process in Eocene flysch. *The Geotechnics of Hard Soils – Soft Rocks*. Evangelista i Picarelli (eds.), Balkema, Rotterdam, 267 – 272.
- [60] Roje – Bonacci, T., Šestanović, S., Čagalj, M. (1985.): Analiza odnosa jednoosne čvrstoće i postotka  $\text{CaCO}_3$  u flišnim naslagama. *Zbornik radova 6. jug. simp. o meh. stijena i podz. rad., knjiga 1*, 104 – 107, Titovo Velenje.
- [61] Mišćević, P., Roje-Bonacci, T. (2001.): Weathering Processes in Eocene Flysch in Split Region (Croatia). *The Mining Geological-Petroleum Engineering Bulletin*, 13, 47-55.

- [62] Jurak, V., Matasović, N., Cvijanović, D., Jašarević, I., Garašić, M., Slovenec, D. (1987): Definiranje prirodnih uvjeta terena na području Župe Dubrovačke za potrebe geotehničko – seizmičkog mikrozoniranja, Zbornik referata 9. jug. simp. o hidrogeologiji i inženjerskoj geologiji, knjiga 2, Inženjerska geologija, Priština, 41 – 60.
- [63] Butler, L. R. P., Laqua, K. (1995.): Instrumentation for the Spectral Dispersion and Isolation of Optical Radiation. (IUPAC Recommendations 1995) Pure&App/. Chem., Vol. 67, No. 10, pp. 1725-1744.
- [64] Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M., Wetterlind, J. (2010.): Visible and near infrared spectroscopy in soil science; Advances in Agronomy, Vol.107, pp.163-215.
- [65] Viscarra Rossel, R.A., Cattle, S.R., Ortega, A., Fouad, Y. (2009.): In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy. Geoderma, vol.150, pp. 253-266.
- [66] Robben, M., Wotruba, H., Balthasar D., Rehrmann, V. (2014.): NIR Spectral Imaging in the Minerals Industry. RWTH Aachen University, (AMR) Department of Mineral Processing, Germany.
- [67] Malley, D.F., Williams, P., McLaughlin, J., Atkinson, T. (2007.): Rapid Analysis of Moisture, Organic Matter and Carbonate in Peat Cores from Northern Ontario by Near-infrared Spectroscopy. 50th Annual Manitoba Soil Science Society Meeting, 8-9 February 2007, Holiday Inn South, Winnipeg Manitoba.
- [68] Clark, R. N. (1999.): Chapter 1: Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy, in Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences, (A.N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons, New York, p 3- 58.
- [69] USGS Spectral Library: <http://speclab.cr.usgs.gov/> (1.2.2014.)
- [70] Wotruba, H., Robben, M. R., Balthasar, D. (2009.): Near-infrared sensorbased sorting in the minerals industry. Conference in Minerals Engineering. Lulea, Sweden.
- [71] Dematte, J.A.M., Campos, R.C., Alves, M.C., Fiorio, P.R., Nanni, M.R. (2004.): Visible–NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. Geoderma 121, 95 – 112.

- [72] Wang, Q., Li, P.; Pu, Z., Chen, X. (2011.): Calibration and validation of salt-resistant hyperspectral indices for estimating soil moisture in arid land. *Journal of Hydrology* 408, 276–285.
- [73] Weindorf, D. C., Chakraborty, S., Haggard, B., Johnson, S., Bakr, N., Zhu, Y. (2010.): Characterizing surface soil water with field portable diffuse reflectance spectroscopy. *Journal of Hydrology* 391, 133–140.
- [74] Sundaram, J., Kandala, C.V., Govindarajan, K. N., Subbiah, J. (2012.): Sensing of Moisture Content of In-Shell Peanuts by NIR Reflectance Spectroscopy. *Journal of Sensor Technology*, 2, 1-7. doi:10.4236/jst.2012.21001
- [75] Govindarajan, K. N., Kandala, C.V., Subbiah, J. (2009.): NIR Reflectance Spectroscopy for Nondestructive Moisture Content Determination in Peanut Kernels. *Transactions of the ASABE*, Vol. 52, No. 5, pp. 1661-1666.
- [76] Huntington, J., Whitbourn, L., Mason, P., Berman, M., Schodlok, M.C. (2011.): HyLogging - Voluminous industrial-scale reflectance spectroscopy of the earth's subsurface. *Proceedings of ASD and IEEE GRS; Art, Science and Applications of Reflectance Spectroscopy Symposium*, Vol. II, 14pp, Boulder, CO.
- [77] Abellan, A., Vilaplana, J. M., Calvet, J., Garcia-Selles, D., Asensio, E. (2011.): Rockfall monitoring by Terrestrial Laser Scanning – case study of the basaltic rock face at Castellfolit de la Roca (Catalonia, Spain). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 829–841.
- [78] Avian, M., Kellerer-Pirklbauer, A., Bauer, A. (2009.): LiDAR for monitoring mass movements in permafrost environments at the cirque Hinteres Langtal, Austria, between 2000 and 2008. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1087–1094.
- [79] Dunning, S. A., Massey, C. R., Rosser, N. J. (2009.): Structural and geomorphological controls on landslides in the Bhutan Himalaya using Terrestrial Laser Scanning, *Geomorphology*, 103(1), 17–29.
- [80] Prokop, A., Panholzer, H. (2009.): Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1921–1928.

- [81] Sturzenegger, M., Stead, D. (2009.): Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 267–287.
- [82] Rabatel, A., Deline, P., Jaillet, S., Ravanel, L. (2008.): Rock falls in high-alpine rock walls quantified by terrestrial lidar measurements: A case study in the Mont Blanc area. *Geophys. Res. Lett.*, 35.
- [83] Lim, M., Rosser, N. J., Allison, R. J., Petley, D. N. (2009.): Erosional processes in the hard rock coastal cliffs at Staithes, North Yorkshire. *Geomorphology*, 114 (1–2), 12–21.
- [84] Dewez, T., Gebrayel, D., Lhomme, D., Robin, Y. (2009.): Quantifying morphological changes of sandy coasts by photogrammetry and cliff coasts by lasergrammetry. *La Houille Blanche*, 1, 32–37.
- [85] Perroy, R.L., Bookhagen, B., Asner, G.P., Chadwick, O.A. (2010.): Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California. *Geomorphology* 118, 288–300.
- [86] Kanji, M.A., (2014.) Critical issues in soft rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. V6, I3, 186–195.
- [87] Johnston, I.W., Novelo, E.A., (1994.) Soil mechanics, rock mechanics and soft rock technology. *Geotechnical engineering*, 107 (1): 3-9.
- [88] Arbanas, Ž., Grošić, M., Briški, G. (2008.): Behaviour of Engineered Slopes in Flysch Rock Mass. *Proceedings of the 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium SHIRMS 2008*, 16.-19. September 2008, Perth, Australia / Potvin, Yves ; Carter, John ; Dyskin, Arcady and Jeffrey, Rob (ed). - Perth : Australian Centre for Geomechanics.
- [89] Anagnostopoulos, A., Schlosser, F., Kalteziotis, N., Frank, R. (Editors) (1993.): *Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks*, Proc. Int. Symposium ISSMFE / IAEG / ISRM, Athens, Greece, 1993, 3 volumes.
- [90] Evangelista, A., Picarelli, L. (1998.): *The Geotechnics of Hard Soils – Soft Rocks*. Proc. 2nd Int. Symp. Hard Soils – Soft Rocks, Naples, Italy.



- [91] Johnston, I.W. (1993.): Soft Rock Engineering. In: J.A. Hudson (Editor) Comprehensive Rock Engineering. Pergamon Press, Oxford, vol. 1, pp. 367-393.
- [92] Hawkins, A. B. (1998.): Aspects of rock strength. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. IAEG, vol. 57, n°1, June, 1998, pp. 17-30.
- [93] Terzaghi, K., Peck, R. (1967.): Soil mechanics in engineering practice. John Wiley and Sons, Ltd., New York.
- [94] Rocha, M. (1975.): Some problems related to the rock mechanics of low strength natural materials. Proceedings of the 5th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, pp. 489–514.
- [95] Mišćević, P. (2004.): Uvod u inženjersku mehaniku stijena. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu.
- [96] Franklin, J.A., Dusseault, M.B. (1989.): Rock Engineering. McGraw-Hill, New York, 600 pp.
- [97] Fookes, P.G., Gourley, C.S., Ohikere, C. (1988.): Rock weathering in engineering time. Quar. J. of Engin. Geology 21: 33-57.
- [98] Grotzinger, J., Jordan, T.H. (2010.): Understanding earth. 6th edition W.H. Freeman & Co. Ltd 650pp.
- [99] Cantón, Y., Solé-Benet, A., Queralt, I., Pini, R. (2001.): Weathering of a gypsum-calcareous mudstone under semi-arid environment at Tabernas, SE Spain: laboratory and field-based experimental approaches. Catena, 44, pp. 111-132.
- [100] Huisman, M. (2006.): Assessment of rock mass decay in artificial slopes. Technische Universiteit Delft . Phd thesis.
- [101] Bjerrum, L. (1967.): Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales. J. Soil Mech. Found. Div. ASCE 93, No. SM5, 3-49.
- [102] Barton, M.E. (1993.): Cohesive sand: The natural transition from sands to sandstones. Proc. of an International Symposium – Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rock, Athens, A.A. Balkema, pp 367-374.

- [103] Pinyol, N., Vaunat, J., Alonso, E.E. (2007.): A constitutive model for soft clayey rocks that includes weathering effects. *Geotechnique* 57, no. 2, 137-151.
- [104] Mišćević, P., Vlastelica, G. (2009.): Shear strength of weathered soft rock – proposal of test method additions // *Proceedings of the Regional Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2009, Rock Engineering in Difficult Ground Conditions - Soft Rocks and Karst / Vrkljan, Ivan (ur.). London : CRC Press/Balkema, The Netherlands, 303-307.*
- [105] Hutchinson, J.N. (2001): Reading the ground: Morphology and geology in site appraisal. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 34, pp. 7-50.
- [106] Bates, R.L., Jackson, J.A. (1995): *Glossary of Geology*. Third Edition. American Geological Institute. Alexandria, Virginia.
- [107] Kühnel, R.A. (2002.): Driving forces of rock degradation. *Proceedings Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities, Sevilla, Spain: pp. 11-17. Eds. Galán and Zezza, Balkema, Rotterdam.*
- [108] Nicholson, D.T., Lumsden, A.C., Hencher, S. R. (2000.): Excavation-induced deterioration of rock slopes. *Landslides in Research, Theory and Practice (Vol 3) 1105-1110.*
- [109] Campos, J. O., Paraguassu, A. B., Dobereiner, L., Soares, L., Frazão, E. B. (1993.): The geotechnical behaviour of Brazilian sedimentary rocks. *Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks, Proc. Int. Symp. ISSMFE / IAEG / ISRM, Athens, Greece, vol. 1, pp. 69-84.*
- [110] Grošić, M., Arbanas, Ž. (2013.): Određivanje parametara puzanja fliša temeljem višegodišnjeg praćenja ojačane padine. *Zbornik 6. Savjetovanja Hrvatskog geotehničkog društva. Zadar/Peruća 17.-19.6.2013.*
- [111] Czerewko, M.A., Cripps, J.C. (2001.): Assessing the durability of mudrocks using the modified jar slake index test. *The Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 34 (2):153-163.

- [112] Erguer, Z.A., Ulusay, R. (2009.): Assessment of physical disintegration characteristics of clay-bearing rocks: Disintegration index test and a new durability classification chart. *Engineering Geology* 105: 11-19.
- [113] Sabatakakis, N., Tsiambaos, G., Koukis, G. (1993.): Index properties of soft marly rocks of the Athens basin, Greece. *Geotech. Enging. of Hard soils-Soft rocks*. Eds. A. Anagnostopoulos. Rotterdam: Balkema. 275-279.
- [114] Santi, P.M. (1998.): Improving the jar slake, slake index, and slake durability tests for shales. *Environmental and Engineering Geoscience* 4(3): 385-396.
- [115] ASTM D 4644-04 (2004.): Standard test method for slake durability of shales and similar weak rocks.
- [116] Condan, G., Husnu, A. (2000.): New approaches to the characterization of clay bearing, densely jointed and weak rock masses. *Engineering Geology* 58: 1-23.
- [117] Moriwaki, Y., Mitchell, J.K. (1977.): The role of dispersion in the slaking of intact clay in Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects. *American Society for Testing and Materials* 623: 287-302. Eds. J.L. Sherard and R.S. Decker.
- [118] Gamble, J.C. (1971.): Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rock. Ph.D. thestis, University of Illinois.
- [119] Roje-Bonacci, T. (1998.): Parameter changes after weathering of soft rock in flysch, *Proc. Int. Sym. on Hard Soils-Soft Rock*, Naples, Italy, pp. 799-804.
- [120] Šestanović, S., Čagalj, M., Barčot, D., Urli, M. (1983.): Geotehnički radovi za temeljenje naselja "Pujanke" u Splitu. *Građevinar* 36/9, 371-376.
- [121] Workman, J., Weyer, L. (2012.): *Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near-infrared Spectroscopy*. CRC Press
- [122] García, Lerma J. L., Van Genechten, B., Heine E., Quintero M. S. (2008): *Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning Training Material Based on Practical Applications*, Version 4., Valencia, Spain: Universidad Politécnica de Valencia.

- [123] Burns, R. (1993.): Mineralogical Applications of Crystal Field Theory. Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 551p.
- [124] Gaffey, S.J., McFadden, L.A., Nash, D., Pieters, C.M. (1993.): Ultraviolet, Visible, and Near-infrared Reflectance Spectroscopy: Laboratory spectra of Geologic Materials. Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition (C. M. Pieters, and P.A.J. Englert, eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 43-78.
- [125] Hunt, G.R. (1977.): Spectral Signatures of Particulate Minerals in the Visible and Near Infrared. Geophysics, v. 42, p. 501-513.
- [126] Kvasnička, P. (2007.): Mehanika tla. Svaučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. 216p.
- [127] Mineralogical Society of America:  
<http://www.handbookofmineralogy.org/search.html?p=all> (1.12.2014.)
- [128] Mineralogy Database: <http://webmineral.com/> (1.12.2014.)
- [129] Hunt, G.R., Salisbury, J.W. (1971.): Visible and near infrared spectra of minerals and rocks, II -- Carbonates. Modern Geology, v. 2, p. 23-30.
- [130] Al-Rawas, A.A., Goosen, M.F.A. (2006.): Expansive soils - Recent Advances in Characterization and Treatment. Taylor & Francis Ltd.
- [131] Pontual, S., Merry, N., Gamson, P. (1997.): Spectral Analysis Guides for Mineral Exploration G-MEX, v. 1-8.
- [132] Gaffey, S.J. (1986.): Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55 microns): calcite, aragonite, and dolomite. American Mineralogist, Vol. 71, pages 151-162.
- [133] Rinnan, A., Van den Berg, F., Engelsens, S.B. (2009.): Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. Trends in Analytical Chemistry, Vol. 28, No. 10.
- [134] Martinčević Lazar, J., Vlastelica, G., Bernat, S., Miklin, Ž., Podolszki, L. (2013.): Verification of mineralogical composition of Kostanjek landslide sediments using a visible

- and near-infrared (VIS-NIR) spectrometer. Book of abstracts of the 4th Workshop of the Japanese-Croatian Project on "Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia" Split (Croatia), p. 19-20. 12-14.12.2013.
- [135] Kiš Erne, E., Ranogajec Jonjaua, G., Marinković-Nedučin, R., Vulić, T., Mesaroš-Borbelj, A., Oprijan, D. (2001.): Interkalacija oksida metala u strukturu glinenih minerala. *Acta periodica technologica*, Vol. 32, pp. 71-78.
- [136] Matijević, B., Blažić, M. (2008.): Primjena spektroskopskih tehnika i kemometrijskih metoda u tehnologiji mlijeka. *Mljekarstvo* 58 (2) 151-169.
- [137] Curtiss, B., Goetz, A. (2009.): Field Spectrometry: Scientific Workshop - Spectroscopy of Coastal Areas – Reference materials.
- [138] Savitzky, A.; Golay, M.J.E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry* 36 (8): 1627–39
- [139] Elith, J., Leathwick, J. R., Hastie, T. (2008.): A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, Volume 77, Issue 4, pages 802–813.
- [140] Friedman, J. H. (1999.): Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *IMS 1999 Reitz Lecture*.
- [141] Friedman, J. H. (1999.): Stochastic gradient boosting. *Stanford University*.
- [142] Andrić, I., (2014.): Primjena tehnologija temeljenih na hidroakustici, radaru i tlačnim senzorima kod praćenja i analize kretanja vode u kršu. Sveučilište u Splitu Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije. Doktorska disertacija.
- [143] Witten, I.H., Frank, E. (2000.): *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques with Java Implementation*. Morgan Kaufman Publishers: San Francisco, 2000.
- [144] Rumelhart, D.E. and McClelland, J. (1986.): *Parallel Distributed Processing*, Vol 1. Cambridge, MA: MIT Press.
- [145] Bishop, C. (1995.): *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford: University Press.

- [146] Garcia, L.A.G. (2013.): Crystallinity Variations of Smectite-illite and Kaolin Hydrothermal Alteration Minerals by using SWIR Spectroscopy. A Study of the Rodalquilar Au-deposit, SE Spain. Master Thesis, University of Twente.
- [147] Fisher, O. (1866.): On the disintegration of a chalk cliff, *Geological Magazine*, 3, 354–356.
- [148] Lehmann, O. (1933.): Morphologische Theorie der Verwitterung von Steinschlagwänden. *Vierteljahrsschrift der Naturforschende Gesellschaft in Zurich*, 78, 83–126.
- [149] Hutchinson, J.N. (1998.): A small-scale field check on the Fisher–Lehmann and Bakker–Le Heux cliff degradation models. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 913–926.
- [150] Petrie, G., Toth, C.K., (2008.): Introduction to laser ranging, profiling and scanning. In: Shan, J., Toth, C.K. (Eds.), *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. CRC Press / Taylor & Francis, London, pp. 1–28.
- [151] Kordić, B. (2014.): Razvoj metode trodimenzionalnoga terestričkoga laserskoga skeniranja kod određivanja i analize pomaka površine klizišta. Sveučilište u Zagrebu, Geodetski Fakultet. Doktorski rad
- [152] Teza, G., Galgaro, A., Zaltron, N., Genevois, R. (2007.): Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach. *Int. J. Remote Sens.* 28, 3425–3446.
- [153] Abellan, A., Calvet, J., Vilaplana, J. M., Blanchard, J. (2010.): Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology*, 119(3-4), 162–171.
- [154] Vlastelica, G., Mišćević, P., Fukuoka, H., Smailbegović, A. (2011.): First Experience with Ground Based LiDAR in Omiš and Duće Areas. Proc. of the 2nd Project Workshop on Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods. Rijeka (Croatia), 15-17 November 2011, pp. 37-41.

## **PRILOZI**



## Prilog 1

U nastavku prikazani su svi rezultati ispitivanja za uzorke 1-30 djelomično prikazani u Tablicama 3.2., 3.5. i 3.7..

| UZORAK 1                    | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks<br>točkaste<br>čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                             | 63,18                                 | 2,39                                         | 7,72                          | 11,80                         | 1,05                                                |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj<br>ponavljanja                   | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                                     |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)                     |
|                             | 1                                     | 91,92                                        | 82,35                         | 65,59                         | 37,67                                               |
|                             | 2                                     | 78,80                                        | 57,42                         | 37,82                         | 16,80                                               |
|                             | 3                                     | 63,02                                        | 40,41                         | 27,90                         | 14,87                                               |
|                             | 4                                     | 46,76                                        | 34,09                         | 24,98                         | 13,78                                               |

| UZORAK 2                    | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks<br>točkaste<br>čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                             | 46,03                                 | 2,21                                         | 7,79                          | 18,19                         | 0,35                                                |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj<br>ponavljanja                   | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                                     |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)                     |
|                             | 1                                     | 92,46                                        | 78,91                         | 47,47                         | 25,69                                               |
|                             | 2                                     | 73,79                                        | 53,86                         | 13,99                         | 5,08                                                |
|                             | 3                                     | 56,07                                        | 28,07                         | 4,14                          | 1,16                                                |
|                             | 4                                     | 33,60                                        | 15,18                         | 1,04                          | 0,36                                                |

| UZORAK 3                    | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 74,20                                 | 2,45                                         | 4,15                          | 10,39                         | 1,93                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 99,52                                        | 98,70                         | 95,90                         | 96,57                                         |
|                             | 2                                     | 98,51                                        | 97,11                         | 94,59                         | 89,82                                         |
|                             | 3                                     | 97,86                                        | 96,10                         | 92,27                         | 85,93                                         |
|                             | 4                                     | 97,41                                        | 95,24                         | 90,03                         | 82,62                                         |

| UZORAK 4                    | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 76,52                                 | 2,52                                         | 2,50                          | 7,88                          | 3,85                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 99,59                                        | 98,94                         | 97,50                         | 94,73                                         |
|                             | 2                                     | 98,61                                        | 97,38                         | 95,06                         | 90,21                                         |
|                             | 3                                     | 98,10                                        | 96,43                         | 92,80                         | 86,84                                         |
|                             | 4                                     | 97,68                                        | 95,75                         | 90,90                         | 83,96                                         |

| UZORAK 5                    | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 87,40                                 | 2,56                                         | 1,88                          | 6,28                          | 2,27                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 99,24                                        | 98,69                         | 96,97                         | 95,86                                         |
|                             | 2                                     | 99,09                                        | 97,96                         | 95,27                         | 93,36                                         |
|                             | 3                                     | 99,00                                        | 97,78                         | 94,29                         | 91,53                                         |
|                             | 4                                     | 98,33                                        | 96,72                         | 92,36                         | 88,98                                         |

| UZORAK 6                    | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 89,41                                 | 2,64                                         | 2,07                          | 3,29                          | 3,09                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 99,22                                        | 98,50                         | 96,91                         | 94,15                                         |
|                             | 2                                     | 98,71                                        | 97,49                         | 94,63                         | 90,04                                         |
|                             | 3                                     | 98,31                                        | 96,64                         | 92,98                         | 86,18                                         |
|                             | 4                                     | 97,88                                        | 95,72                         | 90,87                         | 82,59                                         |

| UZORAK 7                    | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 69,57                                 | 2,43                                         | 7,51                          | 12,10                         | 0,80                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 96,92                                        | 87,35                         | 69,78                         | 52,24                                         |
|                             | 2                                     | 88,62                                        | 68,84                         | 44,50                         | 32,28                                         |
|                             | 3                                     | 81,57                                        | 56,07                         | 29,09                         | 20,05                                         |
|                             | 4                                     | 72,05                                        | 42,13                         | 18,70                         | 12,10                                         |

| UZORAK 8                    | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 54,62                                 | 2,55                                         | 2,60                          | 7,33                          | 1,80                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 99,26                                        | 98,43                         | 96,42                         | 93,46                                         |
|                             | 2                                     | 98,77                                        | 97,26                         | 92,91                         | 89,13                                         |
|                             | 3                                     | 98,40                                        | 96,33                         | 90,64                         | 84,89                                         |
|                             | 4                                     | 98,02                                        | 95,27                         | 87,25                         | 80,34                                         |

| UZORAK 9                    | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 60,18                                 | 2,40                                         | 5,33                          | 10,05                         | 1,14                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 97,00                                        | 94,87                         | 89,42                         | 82,96                                         |
|                             | 2                                     | 95,86                                        | 91,47                         | 81,30                         | 70,07                                         |
|                             | 3                                     | 94,83                                        | 88,32                         | 73,69                         | 60,77                                         |
|                             | 4                                     | 93,69                                        | 85,38                         | 67,31                         | 53,56                                         |

| UZORAK 10                   | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 77,23                                 | 2,54                                         | 3,00                          | 5,40                          | 2,05                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 99,27                                        | 98,72                         | 97,64                         | 95,61                                         |
|                             | 2                                     | 98,94                                        | 97,81                         | 95,78                         | 91,97                                         |
|                             | 3                                     | 98,53                                        | 96,93                         | 94,26                         | 88,59                                         |
|                             | 4                                     | 98,36                                        | 96,35                         | 92,94                         | 85,75                                         |

| UZORAK 11                   | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 76,30                                 | 2,53                                         | 3,10                          | 6,41                          | 1,91                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 99,32                                        | 98,68                         | 97,35                         | 94,48                                         |
|                             | 2                                     | 98,93                                        | 97,69                         | 94,83                         | 88,10                                         |
|                             | 3                                     | 98,75                                        | 97,25                         | 92,62                         | 82,97                                         |
|                             | 4                                     | 98,18                                        | 94,09                         | 90,01                         | 79,51                                         |

| UZORAK 12                   | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 67,70                                 | 2,46                                         | 4,72                          | 9,53                          | 1,72                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 98,26                                        | 96,41                         | 92,19                         | 84,27                                         |
|                             | 2                                     | 96,95                                        | 91,73                         | 84,38                         | 67,75                                         |
|                             | 3                                     | 96,00                                        | 87,53                         | 76,51                         | 53,06                                         |
|                             | 4                                     | 94,34                                        | 82,13                         | 70,15                         | 44,94                                         |

| UZORAK 13                   | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 56,53                                 | 2,33                                         | 9,11                          | 14,68                         | 0,69                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 95,16                                        | 85,56                         | 53,03                         | 36,29                                         |
|                             | 2                                     | 90,86                                        | 52,14                         | 28,67                         | 13,51                                         |
|                             | 3                                     | 81,66                                        | 32,31                         | 17,93                         | 5,27                                          |
|                             | 4                                     | 73,26                                        | 23,74                         | 12,52                         | 2,26                                          |

| UZORAK 14                   | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 59,33                                 | 2,34                                         | 7,55                          | 11,90                         | 1,32                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 97,11                                        | 90,81                         | 88,23                         | 91,13                                         |
|                             | 2                                     | 95,45                                        | 85,09                         | 79,20                         | 84,20                                         |
|                             | 3                                     | 93,47                                        | 80,38                         | 71,67                         | 73,89                                         |
|                             | 4                                     | 90,73                                        | 77,10                         | 65,22                         | 62,77                                         |

|                                 |                                       |                                              |                               |                               |                                               |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>UZORAK 15</b>                | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|                                 | 75,91                                 | 2,51                                         | 3,21                          | 5,29                          | 1,64                                          |
| <b>INDEKSI TRAJNOSTI</b><br>(%) | <b>Broj ponavljanja</b>               | <b>Oznaka (vrijeme trajanja)</b>             |                               |                               |                                               |
|                                 |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                                 | 1                                     | 99,14                                        | 98,38                         | 96,38                         | 93,87                                         |
|                                 | 2                                     | 98,67                                        | 97,36                         | 93,73                         | 89,33                                         |
|                                 | 3                                     | 98,00                                        | 96,44                         | 91,16                         | 85,77                                         |
|                                 | 4                                     | 97,54                                        | 95,49                         | 89,07                         | 82,26                                         |

|                                 |                                       |                                              |                               |                               |                                               |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>UZORAK 16</b>                | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|                                 | 47,90                                 | 2,43                                         | 2,88                          | 10,07                         | 0,94                                          |
| <b>INDEKSI TRAJNOSTI</b><br>(%) | <b>Broj ponavljanja</b>               | <b>Oznaka (vrijeme trajanja)</b>             |                               |                               |                                               |
|                                 |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                                 | 1                                     | 98,67                                        | 96,24                         | 90,94                         | 79,38                                         |
|                                 | 2                                     | 96,84                                        | 92,43                         | 83,54                         | 63,30                                         |
|                                 | 3                                     | 95,87                                        | 89,64                         | 78,10                         | 52,16                                         |
|                                 | 4                                     | 94,80                                        | 87,02                         | 73,01                         | 44,11                                         |

|                                 |                                       |                                              |                               |                               |                                               |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>UZORAK 17</b>                | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|                                 | 51,60                                 | 2,48                                         | 2,27                          | 8,07                          | 0,82                                          |
| <b>INDEKSI TRAJNOSTI</b><br>(%) | <b>Broj ponavljanja</b>               | <b>Oznaka (vrijeme trajanja)</b>             |                               |                               |                                               |
|                                 |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                                 | 1                                     | 98,93                                        | 98,06                         | 93,39                         | 86,31                                         |
|                                 | 2                                     | 97,43                                        | 95,26                         | 87,72                         | 75,37                                         |
|                                 | 3                                     | 96,67                                        | 93,11                         | 83,12                         | 66,47                                         |
|                                 | 4                                     | 95,84                                        | 91,15                         | 79,04                         | 59,89                                         |

| UZORAK 18                   | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 40,20                                 | 2,34                                         | 7,50                          | 13,54                         | 0,58                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 98,81                                        | 82,51                         | 70,71                         | 67,18                                         |
|                             | 2                                     | 98,18                                        | 58,47                         | 50,80                         | 43,47                                         |
|                             | 3                                     | 97,80                                        | 50,42                         | 49,08                         | 42,62                                         |
|                             | 4                                     | 97,23                                        | 49,38                         | 48,51                         | 38,63                                         |

| UZORAK 19                   | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 51,80                                 | 2,45                                         | 3,34                          | 9,35                          | 2,22                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 97,97                                        | 96,04                         | 89,90                         | 84,36                                         |
|                             | 2                                     | 96,66                                        | 92,72                         | 83,79                         | 75,44                                         |
|                             | 3                                     | 95,54                                        | 89,94                         | 78,28                         | 66,69                                         |
|                             | 4                                     | 94,01                                        | 87,54                         | 73,02                         | 60,27                                         |

| UZORAK 20                   | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 65,60                                 | 2,36                                         | 4,59                          | 12,79                         | 1,82                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 98,19                                        | 97,64                         | 94,78                         | 92,52                                         |
|                             | 2                                     | 97,24                                        | 96,31                         | 91,88                         | 88,01                                         |
|                             | 3                                     | 96,66                                        | 95,22                         | 89,15                         | 84,16                                         |
|                             | 4                                     | 96,37                                        | 94,50                         | 86,90                         | 80,83                                         |



|                                 |                                       |                                              |                               |                               |                                               |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>UZORAK 21</b>                | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|                                 | 65,00                                 | 2,37                                         | 4,33                          | 12,41                         | 2,01                                          |
| <b>INDEKSI TRAJNOSTI</b><br>(%) | <b>Broj ponavljanja</b>               | <b>Oznaka (vrijeme trajanja)</b>             |                               |                               |                                               |
|                                 |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                                 | 1                                     | 98,64                                        | 97,73                         | 95,40                         | 91,53                                         |
|                                 | 2                                     | 97,87                                        | 96,27                         | 92,57                         | 86,07                                         |
|                                 | 3                                     | 97,39                                        | 95,15                         | 89,93                         | 81,85                                         |
|                                 | 4                                     | 97,25                                        | 94,48                         | 87,79                         | 78,23                                         |

|                                 |                                       |                                              |                               |                               |                                               |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>UZORAK 22</b>                | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|                                 | 58,80                                 | 2,25                                         | 9,91                          | 16,68                         | 2,19                                          |
| <b>INDEKSI TRAJNOSTI</b><br>(%) | <b>Broj ponavljanja</b>               | <b>Oznaka (vrijeme trajanja)</b>             |                               |                               |                                               |
|                                 |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                                 | 1                                     | 94,96                                        | 88,99                         | 77,21                         | 48,29                                         |
|                                 | 2                                     | 91,76                                        | 78,86                         | 60,03                         | 25,89                                         |
|                                 | 3                                     | 87,39                                        | 72,97                         | 48,49                         | 23,14                                         |
|                                 | 4                                     | 84,25                                        | 68,73                         | 40,85                         | 21,58                                         |

|                                 |                                       |                                              |                               |                               |                                               |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>UZORAK 23</b>                | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|                                 | 52,08                                 | 2,33                                         | 8,71                          | 13,73                         | 0,83                                          |
| <b>INDEKSI TRAJNOSTI</b><br>(%) | <b>Broj ponavljanja</b>               | <b>Oznaka (vrijeme trajanja)</b>             |                               |                               |                                               |
|                                 |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                                 | 1                                     | 92,85                                        | 51,98                         | 51,59                         | 25,62                                         |
|                                 | 2                                     | 86,03                                        | 25,46                         | 37,68                         | 18,73                                         |
|                                 | 3                                     | 77,11                                        | 11,65                         | 28,39                         | 15,08                                         |
|                                 | 4                                     | 62,92                                        | 6,23                          | 23,00                         | 11,76                                         |

| UZORAK 24                   | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 66,49                                 | 2,37                                         | 5,76                          | 12,90                         | 1,75                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 97,82                                        | 95,75                         | 91,11                         | 70,45                                         |
|                             | 2                                     | 96,33                                        | 91,68                         | 84,32                         | 59,51                                         |
|                             | 3                                     | 94,73                                        | 88,05                         | 77,69                         | 50,35                                         |
|                             | 4                                     | 93,43                                        | 84,46                         | 71,30                         | 43,46                                         |

| UZORAK 25                   | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 78,63                                 | 2,62                                         | 0,98                          | 3,25                          | 6,33                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 99,11                                        | 98,43                         | 97,42                         | 97,11                                         |
|                             | 2                                     | 98,88                                        | 97,72                         | 96,14                         | 95,38                                         |
|                             | 3                                     | 98,71                                        | 97,17                         | 95,18                         | 93,89                                         |
|                             | 4                                     | 98,53                                        | 96,70                         | 94,36                         | 92,56                                         |

| UZORAK 26                   | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
|                             | 74,13                                 | 2,50                                         | 4,82                          | 7,39                          | 1,93                                          |
| INDEKSI<br>TRAJNOSTI<br>(%) | Broj ponavljanja                      | Oznaka (vrijeme trajanja)                    |                               |                               |                                               |
|                             |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                             | 1                                     | 98,47                                        | 94,84                         | 87,15                         | 76,62                                         |
|                             | 2                                     | 96,80                                        | 90,52                         | 77,61                         | 69,88                                         |
|                             | 3                                     | 95,61                                        | 86,81                         | 68,95                         | 64,16                                         |
|                             | 4                                     | 94,73                                        | 83,41                         | 62,53                         | 59,90                                         |

|                                 |                                       |                                              |                               |                               |                                               |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>UZORAK 27</b>                | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|                                 | 79,77                                 | 2,66                                         | 0,71                          | 2,86                          | 5,98                                          |
| <b>INDEKSI TRAJNOSTI</b><br>(%) | <b>Broj ponavljanja</b>               | <b>Oznaka (vrijeme trajanja)</b>             |                               |                               |                                               |
|                                 |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                                 | 1                                     | 99,36                                        | 99,02                         | 98,08                         | 96,89                                         |
|                                 | 2                                     | 99,03                                        | 98,58                         | 96,92                         | 94,51                                         |
|                                 | 3                                     | 98,78                                        | 98,09                         | 95,92                         | 92,60                                         |
|                                 | 4                                     | 98,54                                        | 97,63                         | 94,91                         | 90,80                                         |

|                                 |                                       |                                              |                               |                               |                                               |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>UZORAK 28</b>                | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|                                 | 73,45                                 | 2,71                                         | 0,73                          | 1,04                          | 9,78                                          |
| <b>INDEKSI TRAJNOSTI</b><br>(%) | <b>Broj ponavljanja</b>               | <b>Oznaka (vrijeme trajanja)</b>             |                               |                               |                                               |
|                                 |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                                 | 1                                     | 99,61                                        | 99,32                         | 98,58                         | 97,32                                         |
|                                 | 2                                     | 99,28                                        | 98,85                         | 97,57                         | 94,84                                         |
|                                 | 3                                     | 99,11                                        | 98,46                         | 96,82                         | 93,44                                         |
|                                 | 4                                     | 98,93                                        | 98,09                         | 96,03                         | 92,84                                         |

|                                 |                                       |                                              |                               |                               |                                               |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>UZORAK 29</b>                | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|                                 | 68,66                                 | 2,70                                         | 0,58                          | 0,76                          | 6,14                                          |
| <b>INDEKSI TRAJNOSTI</b><br>(%) | <b>Broj ponavljanja</b>               | <b>Oznaka (vrijeme trajanja)</b>             |                               |                               |                                               |
|                                 |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)               |
|                                 | 1                                     | 99,61                                        | 99,16                         | 98,88                         | 98,04                                         |
|                                 | 2                                     | 99,38                                        | 98,77                         | 98,15                         | 96,80                                         |
|                                 | 3                                     | 99,22                                        | 98,48                         | 97,57                         | 95,75                                         |
|                                 | 4                                     | 99,11                                        | 98,20                         | 96,99                         | 94,56                                         |

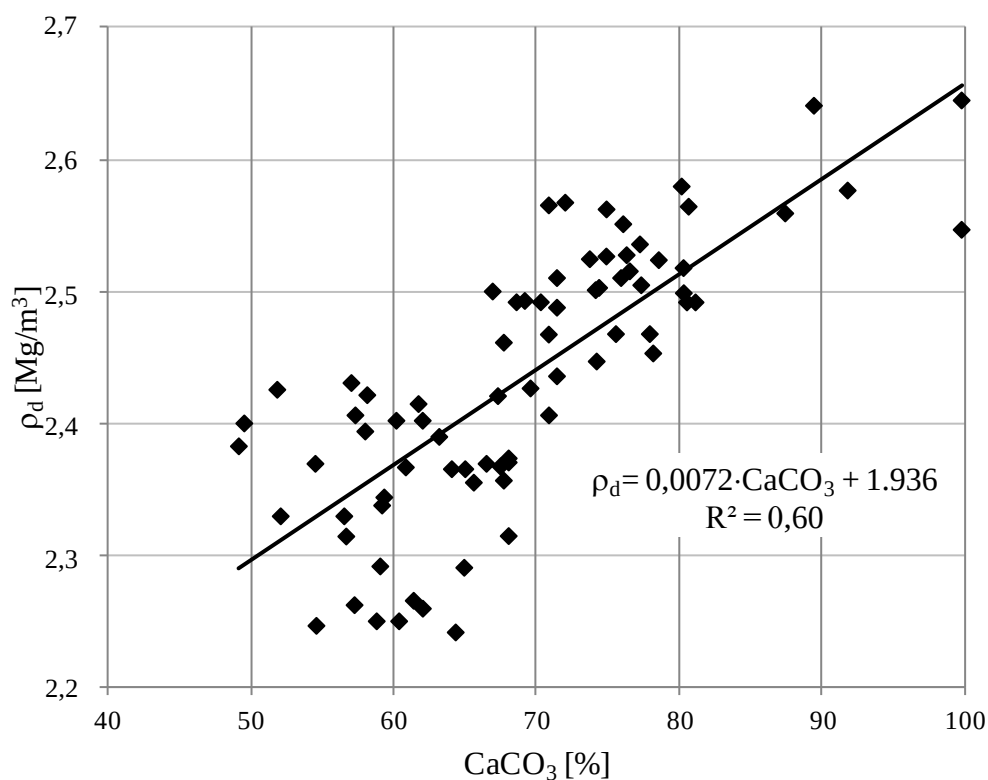
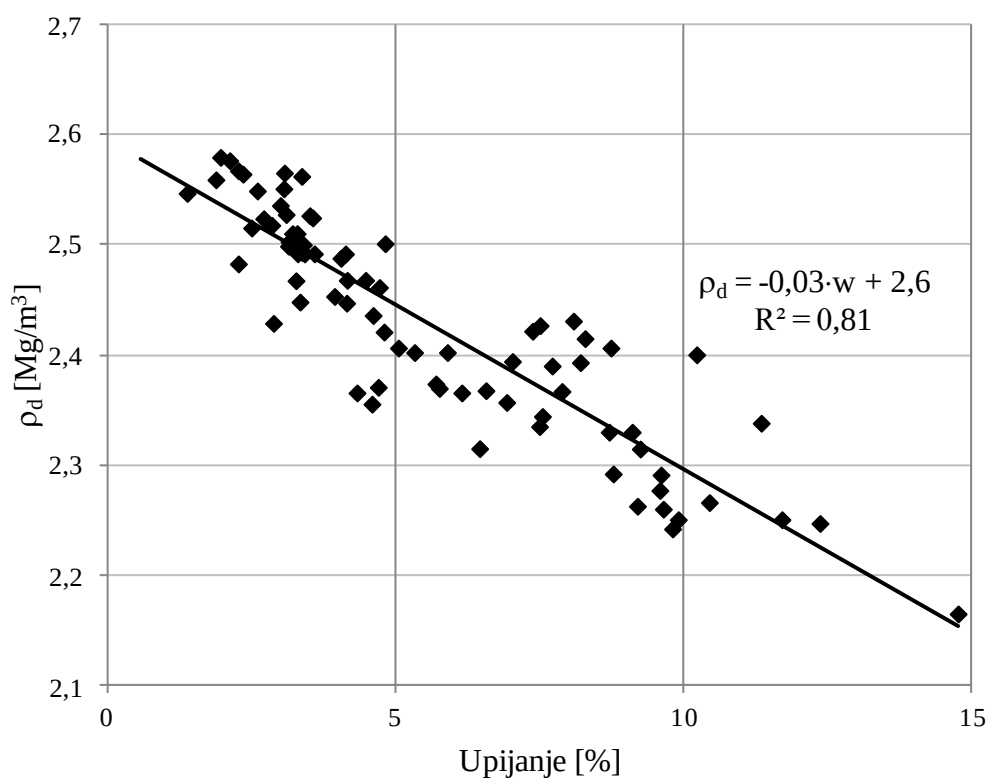
|                                         |                                       |                                              |                               |                               |                                                  |
|-----------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------|
| <b>UZORAK 30</b>                        | Udio karbonata<br>$\text{CaCO}_3$ (%) | Suha gustoća<br>$\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ ) | Upijanje vode<br>w (%)        | Porozitet<br>n (%)            | Indeks točkaste<br>čvrstoće<br>$I_{S(50)}$ (MPa) |
|                                         | 91,77                                 | 2,58                                         | 2,12                          | 4,95                          | 3,92                                             |
| <b>INDEKSI<br/>TRAJNOSTI</b><br><br>(%) | <b>Broj ponavljanja</b>               | <b>Oznaka (vrijeme trajanja)</b>             |                               |                               |                                                  |
|                                         |                                       | $\text{SDI}_{10}$<br>(10 min)                | $\text{SDI}_{25}$<br>(25 min) | $\text{SDI}_{60}$<br>(60 min) | $\text{SDI}_{120}$<br>(120 min)                  |
|                                         | 1                                     | 99,69                                        | 99,34                         | 98,66                         | 97,62                                            |
|                                         | 2                                     | 99,40                                        | 98,86                         | 97,64                         | 94,94                                            |
|                                         | 3                                     | 99,26                                        | 98,44                         | 96,82                         | 93,26                                            |
|                                         | 4                                     | 99,13                                        | 98,04                         | 95,95                         | 92,60                                            |

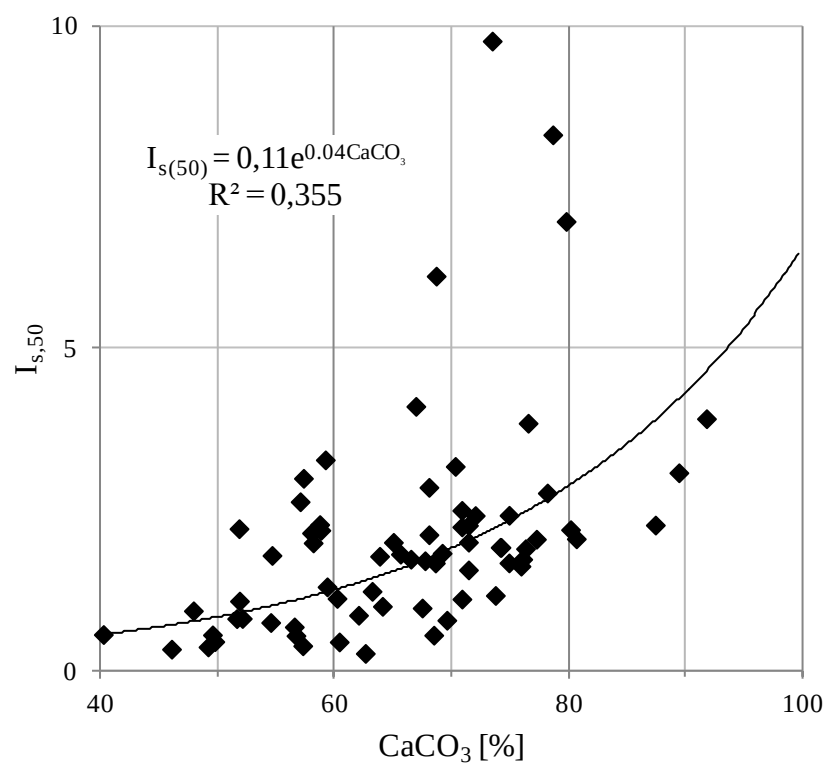
Ostali korišteni rezultati u ovom radu prethodno su publicirani u:

Miščević, P., Vlastelica, G. (2011.): Durability Characterization of Marls from the Region of Dalmatia, Croatia. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29: 771-781.

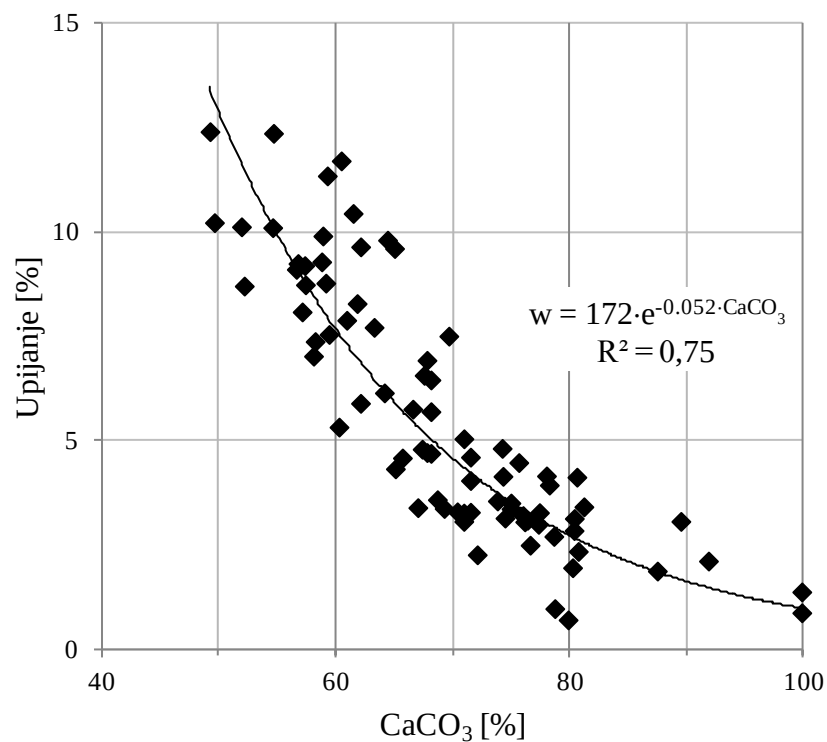
Miščević, P. (1996.): Utjecaj rastrošbe na primjenu meke stijene u geotehničkim konstrukcijama. Sveučilište u Splitu, Građevinski fakultet. Doktorska disertacija. 112 pp.

## Prilog 2

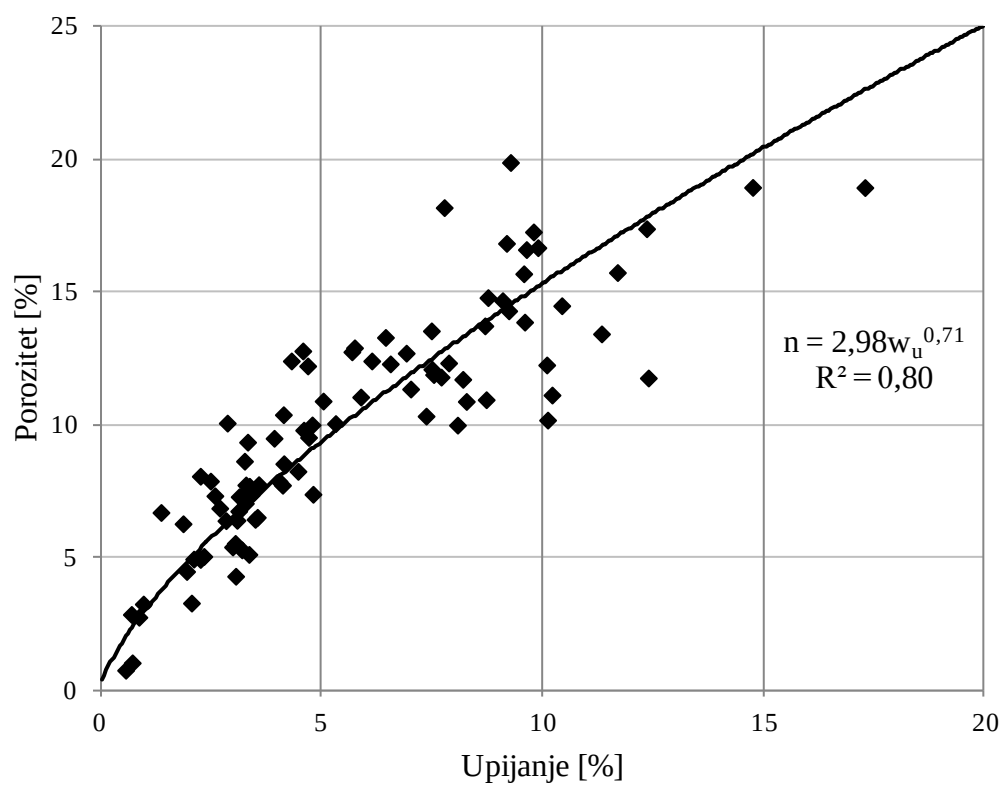
Slika P.1. Odnos suhe gustoće  $\rho_d$  i udjela  $\text{CaCO}_3$ Slika P.2. Odnos suhe gustoće  $\rho_d$  i upijanja  $w_u$



Slika P.3. Odnos indeksa točkaste čvrstoće  $I_{s,50}$  i udjela  $\text{CaCO}_3$



Slika P.4. Odnos upijanja  $w_u$  i udjela  $\text{CaCO}_3$



Slika P.5. Odnos poroziteta  $n$  i upijanja  $w_u$



## Prilog 3

U tablici P.3. prikazani su svi ulazni podaci očitani sa spektralnih otisaka potrebni za izračun parametra smanjene refleksije  $\Delta R$  (Izraz 4.1.), odnosno parametra  $R_{lin}$  koji predstavlja iznos refleksije dobiven linearnom interpolacijom između susjedna dva refleksijska vrha definiranog izrazom 4.2. (grafički prikaz na slici 4.16.).

*Tablica P.3.* Rezultati očitavanja karakterističnih apsorpcijskih vrhova na spektralnim otiscima korištenih u ovom radu u pojasu od 2250 nm do 2400 nm

| R.B. | Oznaka uzorka | CaCO <sub>3</sub> (%) | R <sub>max,L</sub> | V <sub>max,L</sub> (nm) | R <sub>max,D</sub> | V <sub>max,D</sub> (nm) | R <sub>min</sub> | V <sub>min</sub> (nm) | R <sub>lin</sub> | $\Delta R$ |
|------|---------------|-----------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|------------------|-----------------------|------------------|------------|
| 1    | K1            | 0,0                   | 0,524              | 2267                    | 0,468              | 2350                    | 0,454            | 2369                  | 0,455            | 0,001      |
| 2    | K2            | 0,0                   | 0,562              | 2267                    | 0,504              | 2350                    | 0,492            | 2369                  | 0,491            | -0,001     |
| 3    | K3            | 4,0                   | 0,513              | 2267                    | 0,458              | 2352                    | 0,444            | 2370                  | 0,446            | 0,002      |
| 4    | K5            | 25,0                  | 0,695              | 2268                    | 0,653              | 2366                    | 0,646            | 2370                  | 0,651            | 0,016      |
| 5    | UZ157         | 32,3                  | 0,710              | 2271                    | 0,669              | 2364                    | 0,661            | 2347                  | 0,677            | 0,016      |
| 6    | K4            | 33,0                  | 0,788              | 2266                    | 0,750              | 2368                    | 0,739            | 2347                  | 0,758            | 0,018      |
| 7    | UZ042         | 37,5                  | 0,587              | 2269                    | 0,573              | 2389                    | 0,559            | 2351                  | 0,578            | 0,018      |
| 8    | UZ033         | 38,2                  | 0,579              | 2275                    | 0,554              | 2376                    | 0,535            | 2340                  | 0,563            | 0,028      |
| 9    | UZ031         | 38,7                  | 0,589              | 2270                    | 0,571              | 2389                    | 0,550            | 2347                  | 0,578            | 0,028      |
| 10   | UZ148         | 38,8                  | 0,514              | 2277                    | 0,503              | 2382                    | 0,492            | 2348                  | 0,507            | 0,014      |
| 11   | UZ025         | 39,0                  | 0,536              | 2284                    | 0,525              | 2394                    | 0,503            | 2350                  | 0,529            | 0,026      |
| 12   | UZ067         | 39,1                  | 0,509              | 2274                    | 0,496              | 2378                    | 0,487            | 2361                  | 0,498            | 0,010      |
| 13   | UZ023         | 39,2                  | 0,590              | 2280                    | 0,570              | 2388                    | 0,555            | 2337                  | 0,579            | 0,025      |
| 14   | UZ035         | 39,8                  | 0,544              | 2274                    | 0,498              | 2365                    | 0,490            | 2354                  | 0,503            | 0,014      |
| 15   | UZ048         | 40,2                  | 0,552              | 2273                    | 0,542              | 2400                    | 0,520            | 2349                  | 0,546            | 0,025      |
| 16   | UZ024         | 43,1                  | 0,619              | 2269                    | 0,611              | 2391                    | 0,585            | 2345                  | 0,614            | 0,029      |
| 17   | K6            | 45,0                  | 0,833              | 2258                    | 0,803              | 2371                    | 0,788            | 2345                  | 0,810            | 0,021      |
| 18   | UZ077         | 46,0                  | 0,686              | 2273                    | 0,647              | 2378                    | 0,634            | 2355                  | 0,656            | 0,022      |
| 19   | UZ078         | 46,1                  | 0,715              | 2272                    | 0,674              | 2373                    | 0,663            | 2349                  | 0,684            | 0,021      |
| 20   | UZ037         | 46,5                  | 0,619              | 2280                    | 0,614              | 2399                    | 0,585            | 2340                  | 0,616            | 0,032      |
| 21   | UZ050         | 46,5                  | 0,556              | 2278                    | 0,549              | 2381                    | 0,524            | 2348                  | 0,551            | 0,028      |
| 22   | UZ011         | 47,3                  | 0,590              | 2266                    | 0,547              | 2370                    | 0,535            | 2349                  | 0,556            | 0,020      |
| 23   | UZ095         | 48,2                  | 0,635              | 2289                    | 0,623              | 2385                    | 0,600            | 2339                  | 0,629            | 0,028      |
| 24   | UZ028         | 48,8                  | 0,560              | 2267                    | 0,545              | 2379                    | 0,524            | 2349                  | 0,549            | 0,025      |
| 25   | UZ027         | 49,1                  | 0,578              | 2267                    | 0,580              | 2391                    | 0,549            | 2340                  | 0,579            | 0,030      |
| 26   | UZ030         | 50,0                  | 0,709              | 2250                    | 0,686              | 2377                    | 0,661            | 2345                  | 0,692            | 0,031      |
| 27   | UZ104         | 50,5                  | 0,686              | 2269                    | 0,640              | 2384                    | 0,630            | 2344                  | 0,656            | 0,026      |

Nastavak Tablice P.3.

|    |       |      |       |      |       |      |       |      |       |       |
|----|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|
| 28 | UZ105 | 51,0 | 0,711 | 2270 | 0,673 | 2385 | 0,660 | 2350 | 0,685 | 0,025 |
| 29 | UZ049 | 51,3 | 0,595 | 2273 | 0,584 | 2389 | 0,562 | 2348 | 0,588 | 0,026 |
| 30 | UZ106 | 51,5 | 0,715 | 2267 | 0,681 | 2370 | 0,670 | 2352 | 0,687 | 0,017 |
| 31 | UZ015 | 52,1 | 0,646 | 2270 | 0,602 | 2362 | 0,590 | 2346 | 0,610 | 0,020 |
| 32 | UZ047 | 52,1 | 0,727 | 2273 | 0,692 | 2373 | 0,671 | 2348 | 0,701 | 0,029 |
| 33 | UZ079 | 52,5 | 0,815 | 2267 | 0,773 | 2373 | 0,757 | 2345 | 0,784 | 0,027 |
| 34 | UZ100 | 53,3 | 0,711 | 2270 | 0,671 | 2371 | 0,659 | 2346 | 0,681 | 0,022 |
| 35 | UZ010 | 54,1 | 0,676 | 2270 | 0,636 | 2367 | 0,616 | 2342 | 0,647 | 0,031 |
| 36 | UZ007 | 54,3 | 0,596 | 2270 | 0,561 | 2373 | 0,543 | 2345 | 0,570 | 0,027 |
| 37 | UZ083 | 54,4 | 0,722 | 2261 | 0,691 | 2374 | 0,667 | 2341 | 0,700 | 0,033 |
| 38 | UZ029 | 54,5 | 0,661 | 2267 | 0,660 | 2391 | 0,627 | 2346 | 0,661 | 0,033 |
| 39 | UZ107 | 54,5 | 0,696 | 2269 | 0,666 | 2386 | 0,652 | 2350 | 0,675 | 0,023 |
| 40 | UZ108 | 54,5 | 0,701 | 2265 | 0,657 | 2376 | 0,646 | 2352 | 0,667 | 0,020 |
| 41 | UZ022 | 54,6 | 0,608 | 2268 | 0,564 | 2381 | 0,551 | 2348 | 0,577 | 0,026 |
| 42 | UZ139 | 54,6 | 0,794 | 2268 | 0,756 | 2374 | 0,736 | 2341 | 0,768 | 0,032 |
| 43 | UZ008 | 54,9 | 0,611 | 2270 | 0,568 | 2378 | 0,551 | 2341 | 0,583 | 0,032 |
| 44 | UZ034 | 54,9 | 0,715 | 2268 | 0,672 | 2372 | 0,654 | 2345 | 0,683 | 0,029 |
| 45 | UZ006 | 55,1 | 0,594 | 2271 | 0,566 | 2377 | 0,542 | 2342 | 0,575 | 0,033 |
| 46 | UZ096 | 55,3 | 0,729 | 2265 | 0,699 | 2374 | 0,683 | 2341 | 0,708 | 0,025 |
| 47 | UZ097 | 55,6 | 0,681 | 2268 | 0,649 | 2380 | 0,633 | 2341 | 0,661 | 0,028 |
| 48 | UZ098 | 55,6 | 0,716 | 2265 | 0,686 | 2371 | 0,666 | 2341 | 0,694 | 0,029 |
| 49 | UZ017 | 55,7 | 0,698 | 2264 | 0,655 | 2367 | 0,636 | 2345 | 0,664 | 0,028 |
| 50 | UZ075 | 55,8 | 0,545 | 2270 | 0,535 | 2378 | 0,516 | 2338 | 0,538 | 0,022 |
| 51 | UZ149 | 55,8 | 0,578 | 2275 | 0,551 | 2383 | 0,529 | 2342 | 0,561 | 0,032 |
| 52 | UZ021 | 56,1 | 0,686 | 2270 | 0,640 | 2366 | 0,625 | 2346 | 0,649 | 0,025 |
| 53 | UZ154 | 56,5 | 0,705 | 2270 | 0,668 | 2381 | 0,652 | 2348 | 0,679 | 0,027 |
| 54 | UZ063 | 56,8 | 0,605 | 2273 | 0,591 | 2403 | 0,571 | 2344 | 0,597 | 0,026 |
| 55 | UZ099 | 56,8 | 0,705 | 2270 | 0,667 | 2374 | 0,651 | 2342 | 0,679 | 0,029 |
| 56 | UZ073 | 57,3 | 0,611 | 2273 | 0,596 | 2378 | 0,578 | 2338 | 0,602 | 0,024 |
| 57 | UZ123 | 57,7 | 0,649 | 2285 | 0,635 | 2400 | 0,612 | 2345 | 0,642 | 0,030 |
| 58 | UZ158 | 57,9 | 0,676 | 2273 | 0,653 | 2382 | 0,642 | 2341 | 0,661 | 0,019 |
| 59 | UZ147 | 58,1 | 0,659 | 2268 | 0,627 | 2376 | 0,607 | 2341 | 0,638 | 0,031 |
| 60 | UZ046 | 58,8 | 0,691 | 2273 | 0,659 | 2370 | 0,639 | 2343 | 0,668 | 0,028 |
| 61 | UZ102 | 59,1 | 0,780 | 2265 | 0,738 | 2369 | 0,723 | 2350 | 0,746 | 0,024 |
| 62 | UZ109 | 59,1 | 0,698 | 2268 | 0,662 | 2386 | 0,650 | 2350 | 0,673 | 0,023 |
| 63 | UZ127 | 59,2 | 0,735 | 2270 | 0,700 | 2376 | 0,681 | 2350 | 0,709 | 0,027 |

Nastavak Tablice P.3.

|    |       |      |       |      |       |      |       |      |       |       |
|----|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|
| 64 | UZ167 | 59,3 | 0,765 | 2272 | 0,735 | 2364 | 0,716 | 2346 | 0,741 | 0,025 |
| 65 | UZ018 | 59,6 | 0,765 | 2270 | 0,724 | 2371 | 0,705 | 2348 | 0,733 | 0,028 |
| 66 | UZ132 | 59,8 | 0,741 | 2270 | 0,702 | 2368 | 0,684 | 2342 | 0,712 | 0,028 |
| 67 | UZ020 | 59,9 | 0,699 | 2277 | 0,661 | 2370 | 0,645 | 2346 | 0,671 | 0,026 |
| 68 | UZ101 | 60,2 | 0,688 | 2271 | 0,659 | 2374 | 0,645 | 2346 | 0,667 | 0,022 |
| 69 | UZ129 | 60,4 | 0,767 | 2269 | 0,730 | 2376 | 0,709 | 2346 | 0,741 | 0,032 |
| 70 | UZ014 | 60,5 | 0,694 | 2270 | 0,660 | 2383 | 0,638 | 2342 | 0,672 | 0,035 |
| 71 | UZ145 | 60,6 | 0,752 | 2270 | 0,710 | 2370 | 0,695 | 2344 | 0,721 | 0,025 |
| 72 | UZ070 | 60,8 | 0,751 | 2272 | 0,719 | 2371 | 0,694 | 2344 | 0,728 | 0,034 |
| 73 | UZ072 | 61,1 | 0,607 | 2270 | 0,597 | 2394 | 0,573 | 2344 | 0,601 | 0,028 |
| 74 | UZ128 | 61,8 | 0,707 | 2267 | 0,670 | 2368 | 0,647 | 2346 | 0,678 | 0,030 |
| 75 | UZ086 | 62,4 | 0,601 | 2260 | 0,565 | 2381 | 0,540 | 2346 | 0,576 | 0,036 |
| 76 | UZ076 | 63,2 | 0,718 | 2272 | 0,688 | 2376 | 0,667 | 2344 | 0,697 | 0,030 |
| 77 | UZ114 | 63,3 | 0,754 | 2268 | 0,720 | 2371 | 0,694 | 2339 | 0,730 | 0,036 |
| 78 | UZ122 | 63,8 | 0,779 | 2270 | 0,751 | 2367 | 0,728 | 2346 | 0,757 | 0,030 |
| 79 | UZ060 | 64,3 | 0,651 | 2268 | 0,637 | 2377 | 0,611 | 2346 | 0,641 | 0,030 |
| 80 | UZ065 | 64,3 | 0,745 | 2264 | 0,715 | 2374 | 0,690 | 2338 | 0,725 | 0,035 |
| 81 | UZ133 | 64,4 | 0,736 | 2270 | 0,695 | 2367 | 0,673 | 2345 | 0,704 | 0,031 |
| 82 | UZ057 | 64,6 | 0,723 | 2268 | 0,689 | 2378 | 0,664 | 2343 | 0,700 | 0,036 |
| 83 | UZ061 | 64,6 | 0,656 | 2269 | 0,624 | 2369 | 0,600 | 2349 | 0,631 | 0,031 |
| 84 | UZ074 | 64,6 | 0,597 | 2272 | 0,588 | 2386 | 0,566 | 2343 | 0,591 | 0,026 |
| 85 | UZ003 | 64,7 | 0,750 | 2264 | 0,714 | 2373 | 0,687 | 2340 | 0,725 | 0,037 |
| 86 | UZ117 | 64,7 | 0,602 | 2270 | 0,562 | 2373 | 0,538 | 2347 | 0,572 | 0,034 |
| 87 | UZ118 | 65,0 | 0,565 | 2269 | 0,532 | 2368 | 0,514 | 2340 | 0,542 | 0,028 |
| 88 | UZ084 | 65,1 | 0,710 | 2272 | 0,677 | 2379 | 0,649 | 2345 | 0,687 | 0,038 |
| 89 | UZ069 | 65,2 | 0,638 | 2267 | 0,630 | 2387 | 0,599 | 2341 | 0,633 | 0,034 |
| 90 | UZ134 | 65,3 | 0,814 | 2268 | 0,772 | 2374 | 0,750 | 2348 | 0,783 | 0,032 |
| 91 | UZ062 | 65,5 | 0,758 | 2270 | 0,731 | 2377 | 0,701 | 2338 | 0,740 | 0,040 |
| 92 | UZ088 | 65,5 | 0,660 | 2262 | 0,622 | 2373 | 0,598 | 2342 | 0,633 | 0,035 |
| 93 | UZ135 | 66,1 | 0,769 | 2269 | 0,732 | 2376 | 0,707 | 2341 | 0,744 | 0,038 |
| 94 | UZ016 | 66,6 | 0,770 | 2254 | 0,738 | 2374 | 0,708 | 2345 | 0,745 | 0,038 |
| 95 | UZ066 | 66,7 | 0,657 | 2270 | 0,645 | 2380 | 0,611 | 2343 | 0,649 | 0,038 |
| 96 | UZ131 | 66,7 | 0,692 | 2265 | 0,661 | 2368 | 0,636 | 2345 | 0,668 | 0,032 |
| 97 | UZ001 | 66,9 | 0,779 | 2264 | 0,744 | 2379 | 0,715 | 2340 | 0,756 | 0,041 |
| 98 | UZ019 | 67,2 | 0,721 | 2270 | 0,689 | 2392 | 0,662 | 2341 | 0,703 | 0,040 |
| 99 | UZ120 | 67,3 | 0,666 | 2270 | 0,649 | 2382 | 0,620 | 2344 | 0,655 | 0,035 |

Nastavak Tablice P.3.

|     |       |      |       |      |       |      |       |      |       |       |
|-----|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|
| 100 | UZ153 | 67,7 | 0,611 | 2271 | 0,578 | 2381 | 0,554 | 2345 | 0,589 | 0,035 |
| 101 | UZ119 | 67,9 | 0,696 | 2270 | 0,666 | 2373 | 0,639 | 2345 | 0,674 | 0,035 |
| 102 | UZ126 | 67,9 | 0,635 | 2271 | 0,618 | 2376 | 0,593 | 2340 | 0,624 | 0,031 |
| 103 | UZ040 | 68,3 | 0,682 | 2267 | 0,664 | 2391 | 0,626 | 2344 | 0,671 | 0,045 |
| 104 | UZ058 | 69,0 | 0,645 | 2271 | 0,641 | 2374 | 0,610 | 2342 | 0,642 | 0,032 |
| 105 | UZ009 | 69,1 | 0,694 | 2265 | 0,652 | 2378 | 0,621 | 2342 | 0,665 | 0,044 |
| 106 | UZ064 | 69,6 | 0,781 | 2264 | 0,758 | 2379 | 0,722 | 2339 | 0,766 | 0,044 |
| 107 | UZ138 | 69,6 | 0,734 | 2268 | 0,695 | 2380 | 0,668 | 2342 | 0,708 | 0,040 |
| 108 | UZ043 | 70,6 | 0,704 | 2265 | 0,673 | 2378 | 0,633 | 2345 | 0,682 | 0,049 |
| 109 | UZ012 | 71,3 | 0,656 | 2265 | 0,620 | 2373 | 0,588 | 2340 | 0,631 | 0,043 |
| 110 | UZ041 | 71,4 | 0,700 | 2268 | 0,672 | 2379 | 0,634 | 2339 | 0,682 | 0,047 |
| 111 | UZ044 | 71,4 | 0,698 | 2271 | 0,667 | 2388 | 0,632 | 2343 | 0,679 | 0,047 |
| 112 | UZ121 | 71,6 | 0,866 | 2270 | 0,837 | 2371 | 0,804 | 2346 | 0,844 | 0,040 |
| 113 | UZ082 | 71,7 | 0,559 | 2272 | 0,555 | 2383 | 0,533 | 2336 | 0,556 | 0,024 |
| 114 | UZ103 | 71,7 | 0,719 | 2265 | 0,688 | 2374 | 0,661 | 2344 | 0,697 | 0,035 |
| 115 | UZ110 | 71,7 | 0,620 | 2269 | 0,583 | 2387 | 0,552 | 2342 | 0,597 | 0,045 |
| 116 | UZ125 | 71,9 | 0,676 | 2265 | 0,654 | 2383 | 0,619 | 2346 | 0,660 | 0,042 |
| 117 | UZ140 | 71,9 | 0,701 | 2269 | 0,678 | 2388 | 0,644 | 2342 | 0,687 | 0,043 |
| 118 | UZ130 | 72,2 | 0,639 | 2267 | 0,628 | 2374 | 0,600 | 2345 | 0,631 | 0,032 |
| 119 | UZ045 | 72,3 | 0,695 | 2270 | 0,665 | 2372 | 0,633 | 2347 | 0,672 | 0,039 |
| 120 | UZ038 | 72,5 | 0,671 | 2264 | 0,662 | 2388 | 0,625 | 2339 | 0,666 | 0,041 |
| 121 | UZ116 | 72,5 | 0,769 | 2268 | 0,733 | 2373 | 0,702 | 2339 | 0,745 | 0,043 |
| 122 | UZ080 | 72,6 | 0,683 | 2259 | 0,673 | 2381 | 0,637 | 2336 | 0,677 | 0,040 |
| 123 | UZ092 | 73,4 | 0,809 | 2258 | 0,777 | 2381 | 0,735 | 2341 | 0,787 | 0,053 |
| 124 | UZ144 | 73,6 | 0,734 | 2265 | 0,712 | 2388 | 0,669 | 2339 | 0,721 | 0,052 |
| 125 | UZ039 | 73,9 | 0,728 | 2264 | 0,698 | 2387 | 0,655 | 2343 | 0,709 | 0,054 |
| 126 | UZ089 | 74,2 | 0,705 | 2261 | 0,674 | 2378 | 0,646 | 2345 | 0,683 | 0,037 |
| 127 | UZ111 | 74,6 | 0,603 | 2265 | 0,577 | 2388 | 0,540 | 2339 | 0,587 | 0,047 |
| 128 | UZ142 | 75,3 | 0,637 | 2266 | 0,610 | 2381 | 0,574 | 2340 | 0,619 | 0,045 |
| 129 | UZ146 | 75,3 | 0,685 | 2269 | 0,673 | 2386 | 0,637 | 2340 | 0,678 | 0,041 |
| 130 | UZ004 | 75,6 | 0,911 | 2267 | 0,889 | 2379 | 0,844 | 2340 | 0,896 | 0,053 |
| 131 | UZ032 | 75,6 | 0,643 | 2273 | 0,634 | 2390 | 0,589 | 2342 | 0,638 | 0,049 |
| 132 | UZ093 | 75,7 | 0,793 | 2266 | 0,765 | 2376 | 0,722 | 2340 | 0,775 | 0,053 |
| 133 | UZ168 | 75,9 | 0,662 | 2263 | 0,635 | 2384 | 0,603 | 2344 | 0,644 | 0,041 |
| 134 | UZ094 | 76,0 | 0,704 | 2264 | 0,673 | 2375 | 0,637 | 2341 | 0,682 | 0,045 |
| 135 | UZ152 | 76,3 | 0,684 | 2266 | 0,660 | 2381 | 0,620 | 2348 | 0,667 | 0,046 |

Nastavak Tablice P.3.

|                |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 136            | UZ090 | 76,5  | 0,706 | 2266  | 0,679 | 2374  | 0,644 | 2340  | 0,688 | 0,044  |
| 137            | UZ026 | 76,6  | 0,681 | 2267  | 0,663 | 2391  | 0,619 | 2341  | 0,670 | 0,051  |
| 138            | UZ151 | 77,2  | 0,710 | 2272  | 0,688 | 2388  | 0,644 | 2341  | 0,697 | 0,053  |
| 139            | UZ002 | 77,9  | 0,718 | 2266  | 0,692 | 2379  | 0,654 | 2344  | 0,700 | 0,046  |
| 140            | UZ143 | 77,9  | 0,720 | 2268  | 0,714 | 2395  | 0,664 | 2342  | 0,716 | 0,052  |
| 141            | UZ091 | 78,6  | 0,877 | 2273  | 0,850 | 2375  | 0,808 | 2341  | 0,859 | 0,051  |
| 142            | UZ141 | 78,8  | 0,731 | 2270  | 0,719 | 2388  | 0,670 | 2339  | 0,724 | 0,054  |
| 143            | UZ087 | 79,4  | 0,623 | 2262  | 0,619 | 2393  | 0,577 | 2340  | 0,620 | 0,044  |
| 144            | UZ113 | 79,4  | 0,702 | 2265  | 0,674 | 2382  | 0,631 | 2345  | 0,683 | 0,052  |
| 145            | UZ005 | 80,1  | 0,867 | 2263  | 0,841 | 2373  | 0,79  | 2340  | 0,849 | 0,059  |
| 146            | UZ112 | 80,5  | 0,634 | 2263  | 0,625 | 2390  | 0,578 | 2341  | 0,629 | 0,051  |
| 147            | UZ068 | 81,4  | 0,598 | 2263  | 0,572 | 2382  | 0,523 | 2342  | 0,581 | 0,058  |
| 148            | UZ136 | 87,4  | 0,822 | 2250  | 0,797 | 2386  | 0,729 | 2341  | 0,805 | 0,077  |
| 149            | T-3-C | 90,0  | 0,301 | 2189  | 0,255 | 2393  | 0,117 | 2337  | 0,257 | 0,140  |
| min.           |       | 0,0   | 0,301 | 2189  | 0,255 | 2350  | 0,117 | 2336  | 0,257 | -0,001 |
| maks.          |       | 90,0  | 0,911 | 2289  | 0,889 | 2403  | 0,844 | 2370  | 0,896 | 0,140  |
| $\bar{X}$      |       | 60,5  | 0,680 | 2267  | 0,652 | 2378  | 0,625 | 2344  | 0,659 | 0,034  |
| $\sigma$       |       | 14,75 | 0,084 | 8,32  | 0,082 | 9,20  | 0,084 | 5,77  | 0,084 | 0,015  |
| $C_v=\sigma/X$ |       | 0,24  | 0,124 | 0,004 | 0,127 | 0,004 | 0,134 | 0,002 | 0,128 | 0,432  |

Napomena:  $\bar{X}$  -srednja vrijednost,  $\sigma$  - standardna devijacija,  $C_v$  - koeficijent varijacije

## POPISI

## Popis kratica

|             |                                                                      |
|-------------|----------------------------------------------------------------------|
| ANN         | Artificial Neural Network                                            |
| ASD         | Analytical Spectral Devices                                          |
| ASTM        | American Society for Testing and Materials                           |
| DEM         | Digital Elevation Model                                              |
| DHMZ        | Državni Hidrometeorološki Zavod                                      |
| ENVI        | Exelis Visual Information Solutions                                  |
| FGAG        | Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije                     |
| ICP         | Iterative Closest Point                                              |
| ILRIS-3D-ER | Intelligent Laser Ranging and Imaging System with Enhanced Range     |
| ISRM        | International Society for Rock Mechanics                             |
| ISSMFE      | International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering   |
| ISSMGE      | International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering |
| LiDAR       | Light Detection and Ranging                                          |
| LSI         | Loss Slake Index                                                     |
| MIR         | Mid InfraRed                                                         |
| MLP         | Multi Layer Perceptor                                                |
| OGK         | Osnovna Geološka Karta                                               |
| PLT         | Point Load Test                                                      |
| RGB         | Red Green Blue                                                       |
| SDI         | Slake Durability Index                                               |
| TIN         | Triangulated Irregular Network                                       |
| TLS         | Terrestrial Laser Scanning                                           |
| UCS         | Unconfined Compressive Strength                                      |
| USGS        | United States Geological Survey                                      |
| VIS-NIR     | VISible and Near-InfraRed                                            |
| XRD         | X-Ray Diffraction                                                    |



## Popis slika

- Slika 1.1.* Primjeri antropogenog utjecaja: a) kamenolomi u širem području grada Splita (izvor: Google earth) i b) zasjecanje kosine na mikrolokaciji na području grada Splita.
- Slika 1.2.* Primjeri ogolina na Dalmatinskoj obali: a) kosina uz Jadransku magistralu u općini Podstrana i b) kosina iznad mjesta Duće u općini Dugi rat.
- Slika 1.3.* Građevna jama “Zdravstvene škole” u Splitu: a) urušavanje pokosa jame; b) Procijeđivanje vode kroz sekundarne pukotine (označeno crvenim strelicama).
- Slika 1.4.* a) Klizište uz obalu mora na prirodnom klifu u flišnoj naslazi (Split, lokacija Duilovo); b) "Konzola" od čvršćeg sloja pješčenjaka na kosini (diferencijalna rastrošba po kosini).
- Slika 1.5.* a) Prijenosni spektrometar TerraSpec 4 Explorer b) Slikoviti prikaz pojavnosti blisko-infracrvene svjetlosti (eng. near-infrared light).
- Slika 1.6.* a) Terestički laserski skener ILRIS-3D-ER b) Usporedba dvaju snimaka zasjeka s vremenskim odmakom od jedne godine.
- Slika 1.7.* Shema istraživanja i koncept disertacije.
- Slika 1.8.* Rasprostranjenost flišnih facijesa [c1].
- Slika 1.9.* Osnovna geološka karta za šire područje grada Splita (Hrvatski geološki institut).
- Slika 1.10.* Primjer flišne naslage s područja grada Splita.
- Slika 1.11.* Primjer lapora s područja grada Splita.
- Slika 2.1.* Razredba stijena prema jednoosnoj tlačnoj čvrstoći (UCS - eng. „Unconfined Compressive Strength“) prema više autora [d5].
- Slika 2.2.* Povezanost fizičke i kemijske rastrošbe (izmijenjeno [da3]).
- Slika 2.3.* Objašnjenje procesa dijageneze i učinka rasterećenja i ponovnog opterećenja strukture glinovitog gradiva [db3].
- Slika 2.4.* Primjer raspadanja lapora s područja Dalmacije: 1 - raspucavanje, 2 - ljuštenje [da2].
- Slika 2.5.* Dijagram sistematizacije egzogenih procesa [a1].
- Slika 2.6.* Tipični profili zasjeka i zone rastrošenosti u sedimentnim stijenskim masama prema ISRM-u [11]: (a) homogeni profil, (b) heterogeni profil.
- Slika 2.8.* a) Primjer razlomljenog boranog flišnog slijeda (lokacija Kaštelet, Split); b) Primjer rotacije flišnog slijeda do 90 stupnjeva (lokacija Makarska ul, Žnjan, Split).
- Slika 2.9.* a) Primjer geološkog profila zasjeka u flišu s članom koji je otporniji rastrošbi; b) Primjer zasjeka s istim geološkim profilom na lokaciji Kaštelet, Split.
- Slika 2.10.* a) Razvoj višestupnjevane rastrošbe i jednostavni mehanizam odvajanja bloka rotacijom; b) Zasjek s istim geološkim postavkama u poslovnoj zoni u Omišu, kao primjer moguće štete.
- Slika 3.1.* Primjer mogućih korelacija između pojedinih svojstava stijene [d1].

- Slika 3.2.* Primjer uzorkovanja na terenu upotrebom dijamantne pile.
- Slika 3.3.* Presjek dinamičkog uređaja za određivanje indeksa trajnosti.
- Slika 3.4.* Primjer ostatka nakon četvrtog ciklusa vrtnje za tri tipa lapora: (a) Tip I; (b) Tip II; (c) Tip III.
- Slika 3.5.* Odnos između  $SDI_{10}/SDI_{(vrijeme)}$  i trajanja ciklusa za uzorak 13. Prikazani su rezultati za 1 i 2 ponavljanja ciklusa vrtnje.
- Slika 3.6.* Odnos između indeksa trajnosti  $I_d$  i broja ponavljanja ciklusa vrtnje.
- Slika 3.7.* Odnos između udjela karbonata u stijeni i indeksa trajnosti nakon 4 ciklusa vrtnje.
- Slika 3.8.* Odnos između udjela karbonata u stijeni i suhe gustoće stijene.
- Slika 3.9.* Odnos između udjela karbonata u stijeni i upijanja vode.
- Slika 3.10.* Odnos indeksa trajnosti nakon četiri ciklusa vrtnje i indeksa točkaste čvrstoće.
- Slika 3.11.* Odnos modificiranog indeksa trajnosti nakon dva ciklusa vrtnje LSI i indeksa točkaste čvrstoće  $I_{s,50}$ .
- Slika 3.12.* Odnos modificiranog indeksa trajnosti nakon dva ciklusa vrtnje LSI i upijanja  $w_u$ .
- Slika 3.13.* Odnos modificiranog indeksa trajnosti nakon dva ciklusa vrtnje LSI i poroziteta  $n$ .
- Slika 3.14.* Odnos poroziteta  $n$  i upijanja  $w_u$ .
- Slika 3.15.* Odnos modificiranog indeksa trajnosti nakon dva ciklusa vrtnje LSI i udjela karbonata u stijeni.
- Slika 3.16.* Odnos modificiranog indeksa trajnosti nakon dva ciklusa vrtnje LSI i  $SDI_{10}/SDI_{60-1}$ .
- Slika 3.17.* Uzorak s tri međusobno gotovo okomita pukotinska sustava (1. i 3. - sekundarne pukotine; 2. - međuslojna pukotina). Na sekundarnim pukotinama uočava se tamno smeđa skrama.
- Slika 3.18.* Izmjereni nagib pokosa deponiranog rastrošenog lapora na dnu kosina (strelica), u rasponu  $\alpha = 31^\circ$  do  $38^\circ$ .
- Slika 3.19.* Priprema uzoraka za ispitivanje: a) uzorak obavljen mrežom prije ugradnje u plaster, b) primjer rezanja mreže ugrađenog uzorka u plaster za ispitivanje.
- Slika 3.20.* Simulacija procesa rastrošbe u laboratoriju sušenjem i vlaženjem uzorka u ciklusima: a) sušenja uzorka u sušioniku 24 sata, b) hlađenje uzorka pri laboratorijskoj temperaturi zraka, c) uranjanja uzorka u vodu na 24 sata, d) nakon odabranog broja ponavljanja a-c i ugradnje uzorka u plaster za ispitivanje vrši se smicanje u prijenosnom uređaju za direktno smicanje.
- Slika 3.21.* Rezultati direktnog smicanja za uzorak DS-3, lokacija Trstenik, Split: a) za prirodnu vlažnost – 0 ciklusa, b) primjer plohe loma iz seta za prirodnu vlažnost, c) nakon dva ciklusa simulirane rastrošbe, d) primjer plohe loma iz seta nakon dva ciklusa simulirane rastrošbe, e) nakon četiri ciklusa simulirane rastrošbe, f) primjer plohe loma iz seta nakon četiri ciklusa simulirane rastrošbe.
- Slika 3.22.* a) Raspucalost uzorka DS-6 (prije ugradnje) prilikom vlaženja kod drugog ciklusa rastrošbe, b) Primjer plohe loma nakon dva ciklusa rastrošbe.
- Slika 4.1.* Elektromagnetski spektar [g6].

- Slika 4.2.* Shematski prikaz interakcije fotona s mineralom. Elektromagnetsko zračenje se može aporbirati (NIR Apsorpcija), reflektirati (NIR Refleksija) ili proći kroz uzorak (NIR transmisija).
- Slika 4.3.* Prikaz energetskih raspona kod elektronskih i vibracijskih procesa za neke tipične spojeve u pojasu koji pokriva VIS-NIR spektrometar [g7].
- Slika 4.4.* Puni infracrveni spektar Kalcita ( $\text{CaCO}_3$ ) i dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) (Oznake 1,2,3 i 4 označavaju frekvencije osnovnih tonova  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ,  $\nu_3$  i  $\nu_4$ . [50])
- Slika 4.5.* Dijagram aktivnosti gline [g8]
- Slika 4.6.* Spektralni otisci Kalcita, Ilita, Montmorilonita i Kaolinita (USGS spectral library) [51] (Kemijske formule preuzete s [g12 i g13]).
- Slika 4.7.* Identifikacija mineraloških svojstava temeljem spektralnih otisaka u blisko infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra [g10].
- Slika 4.8.* Spektralni otisci odabranih lapora s područja Dalmacije.
- Slika 4.9.* Spektralni otisci uzoraka lapora, grupirani prema trajnosti (Tip I - crvena, Tip II - modra i Tip III - zelena boja).
- Slika 4.10.* Prva derivacija spektralnih otisaka uzoraka lapora sa slike 4.9.
- Slika 4.11.* Prva derivacija spektralnih otisaka uzoraka lapora sa slike 4.9. (uvećano područje 2000-2450 nm).
- Slika 4.12.* Druga derivacija spektralnih otisaka uzoraka lapora sa slike 4.9.
- Slika 4.13.* Spektralni otisci odabranih uzoraka s klizišta Kostanjek, Medvednica.
- Slika 4.14.* Kalcit izoliran iz naslage lapora s lokacije Pazdigrad, Split.
- Slika 4.15.* Spektralni otisci kalcita, dolomita i vapnenaca s označenim karakterističnim valnim duljinama za drugi gornji ton trećeg osnovnog tona i tri kombinacije vidljive u NIR spektru.
- Slika 4.16.* Prikaz smanjenja refleksije -  $\Delta R$  dobiven linearnom interpolacijom između dva susjedna refleksijska vrha.
- Slika 4.17.* Odnos između udjela kalcita ( $\text{CaCO}_3$ ) i povećane apsorpcije u pojasu oko 2340 nm - ( $\Delta R_{2340\text{nm}}$ ). Prikazana je i razredba karbonatnih stijena prema udjelu sadržaja kalcita i glinovitih sastavnica prema [11] (Tablica 1.1.).
- Slika 4.18.* Odnos između udjela kalcita ( $\text{CaCO}_3$ ) i povećane apsorpcije u pojasu oko 2340 nm - ( $\Delta R_{2340\text{nm}}$ ) za uzorke s udjelom  $\text{CaCO}_3$  u rasponu od 50 - 80%.
- Slika 4.19.* Distribucija rezidualnih vrijednosti u usporedbi s normalnom razdiobom: a) linearni model, b) logaritamski model.
- Slika 4.20.* Koncept kreiranja modela temeljenog na spektralnoj analizi (izmijenjeno [g18a])
- Slika 4.21.* Odnos između kvadrata prosječne pogreške i broja stabala korištenih za definiranje modela.
- Slika 4.22.* Rezultati analize regresijskih stabala: a) Regresijska veza za učeći set podataka, b) Histogram rezidualnih vrijednosti za učeći set podataka, c) Regresijska veza za testni set podataka, d) Histogram rezidualnih vrijednosti za testni set podataka.
- Slika 4.23.* Histogram značajnosti nezavisnih varijabli za definirani model

- Slika 4.24.* Rezultati analize neuralnom mrežom: a) Regresijska veza za učeći set podataka, b) Regresijska veza za testni set podataka, c) Regresijska veza za validacijski set podataka, d) Histogram rezidualnih vrijednosti za sve podatke.
- Slika 5.1.* Primjer razgradnje zasjeka za slučaj: a) ravnoteže erozije i rastrošbe; b) neravnoteže u korist rastrošbe (svijetlo sivo - rastrošeni materijal, tamno sivo - ostatak iz prethodnog intervala rastrošbe). [db5]
- Slika 5.2.* Zasjek na pilot lokaciji Žnjan u Splitu u razdoblju od 2003. do 2014. godine.
- Slika 5.3.* Položaj pilot lokacija - zasjeka na osnovnoj geološkoj karti za šire područje grada Splita (OGK 1:100.000, list Split i Omiš).
- Slika 5.4.* Pilot lokacije (I. dio).
- Slika 5.5.* Pilot lokacije (II. dio).
- Slika 5.6.* Fisher–Lehmannov model erozije uspravnog zasjeka.
- Slika 5.7.* Godišnja erozija zasjeka „Overton Down“, UK (izmijenjeno prema [lj3]).
- Slika 5.8.* Primjer brze početne izmjene profila na zasjeku izvedenom za potrebe privremene prometnice, lokacija Brnik, Split: a) neposredno nakon iskopa (srpanj 2013.); b) stanje nakon 7 mjeseci (veljača 2014.).
- Slika 5.9.* Bakker–Le Heuxov model erozije uspravnog zasjeka.
- Slika 5.10.* Primjer oblaka točaka s približno 4 milijuna točaka (Pilot lokacija „Žnjan 1“).
- Slika 5.11.* Interpretacija Fisher–Lehmannov-og modela na temelju rezultata opažanja izvršenih na Pilot lokaciji „Žnjan 1“.
- Slika 5.12.* Situacija i položaj zasjeka na pilot lokaciji „Žnjan 1“.
- Slika 5.13.* Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „Žnjan 1“ za navedene epohe mjerenja (a - f) s referentnom plohom.
- Slika 5.14.* Usporedba oblaka točaka za središnji dio zasjeka na pilot lokaciji „Žnjan 1“ za navedene epohe mjerenja (a - f) s referentnom plohom.
- Slika 5.15.* a) - c) Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „Žnjan 2“ za navedene epohe mjerenja; d) Karakteristični poprečni presjek.
- Slika 5.16.* a) - c) Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „Trstenik 1“ za navedene epohe mjerenja; d) Karakteristični poprečni presjek.
- Slika 5.17.* Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „Trstenik 1“ sa različitim skalama usporedbe
- Slika 5.18.* a) - d) Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „Duilovo 1“ za navedene epohe mjerenja; e) Područje opažanja.
- Slika 5.19.* Zabilježeno klizište na širem području pilot lokacije „Duilovo 1“.
- Slika 5.20.* Pilot lokacija „Gripe 1“ s karakterističnim poprečnim presjekom.
- Slika 5.21.* a) - b) Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji za navedene epohe mjerenja s referentnom plohom; c) Karakteristični poprečni presjek.
- Slika 5.22.* a) Pilot lokacija „Kaštelet 2“; b) - c) Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji za navedene epohe mjerenja s referentnom plohom.

- Slika 5.23.* a) - c) Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „10. kolovoz 1“ za navedene epohe mjerenja; d) Karakteristični poprečni presjek.
- Slika 5.24.* Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „10. kolovoz 2“ za navedene epohe mjerenja.
- Slika 5.25.* Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „10. kolovoz 4 i 5“ za navedene epohe mjerenja.
- Slika 5.26.* Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „10. kolovoz 4“ sa različitim skalama usporedbe.
- Slika 5.27.* Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji „Duće 2“ za navedene epohe mjerenja.
- Slika 6.1.* Shematski prikaz primjene rezultata istraživanja kod analiziranja stabilnosti postojećih zasjeka ili kod projektiranja novih.

## Popis tablica

- Tablica 1.1.* Razredba karbonatnih stijena prema udjelu sadržaja kalcita i glinovitih komponenti (prema EN 12407:2007) [11].
- Tablica 1.2.* Podaci o srednjim mjesečnim količinama oborina (mm) za razdoblje 1971.-2000. [f4]
- Tablica 2.1.* Vrednovanje stupnja rastrošbe stijene prema preporukama ISRM-a. [11]
- Tablica 3.1.* Mineraloški sastav uzoraka lapora iz naslage fliša na Splitskom poluotoku.
- Tablica 3.2.* Rezultati laboratorijskih ispitivanja: udio karbonata, suha gustoća stijene, upijanje vode, porozitet i indeks točkaste čvrstoće.
- Tablica 3.3.* Gamble-ova razredba na temelju  $I_{d2}$ .
- Tablica 3.4.* Prijedlog vizualne kategorizacije uzoraka nakon izvršena dva ciklusa vrtnje.
- Tablica 3.5.* Rezultati laboratorijskih ispitivanja trajnosti mekih stijena za uzorke 1-30.
- Tablica 3.6.* Rezultati laboratorijskih ispitivanja trajnosti mekih stijena za uzorke 31-70.
- Tablica 3.7.* Primjeri mjerenih vrijednosti posmične čvrstoće uzoraka lapora sa šireg područja Splita.
- Tablica 3.8.* Parametri posmične čvrstoće lapora u uvjetima laboratorijski simulirane rastrošbe (ispitano u uređaju za direktno smicanje stijena).
- Tablica 3.9.* Rezultati direktnog smicanja degradiranog lapora u uređaju za direktno smicanje tla, za ugradnju pri optimalnoj vlažnosti i upotrebom sedimenta iz uređaja za pokus trajnosti stijene, preuzeto iz [j20].
- Tablica 3.10.* Naprezanje pri slomu monolitnih uzoraka lapora kod Geotehničkih radova za temeljenje naselja "Pujanke" u Splitu, preuzeto iz [j21].
- Tablica 3.11.* Prijedlog razredbe prema trajnosti za potrebe analiza trajnosti zasjeka u laporima.
- Tablica 3.12.* Smjernice za primjenu postupka laboratorijski simulirane rastrošbe u mekim stijenama.
- Tablica 4.1.* Tipovi spektrometrije prema području elektromagnetskog spektra i promatranim procesima [g3].

- Tablica 4.2.* Mineraloški sastav odabranih uzoraka lapora iz naslage fliša sa Splitskog poluotoka i iz mjesta Duće, općina Dugi rat.
- Tablica 4.3.* Mineraloški sastav odabranih uzoraka s klizišta Kostanjek, Medvednica.
- Tablica 4.4.* Osnovni vibracijski tonovi i njihove kombinacije koje je moguće uočiti u NIR spektru (modificirano prema [50] i [g4]).
- Tablica 4.5.* Raspon očitavanja apsorpcije u pojasu oko 2340 nm grupiran prema udjelu  $\text{CaCO}_3$ .
- Tablica 4.6.* Predviđene i rezidualne vrijednosti  $\text{CaCO}_3$  prema dva odabrana modela.
- Tablica 4.7.* Karakteristike usvojene neuralne mreže.
- Tablica 5.1.* Potencijalni odnosi erozije i rastrošbe zasjeka.
- Tablica 5.2.* Osnovni podaci o pilot lokacijama i zasjecima.
- Tablica 5.3.* Tehničke specifikacije TLS ILRIS-3D-ER (Optech inc).
- Tablica 5.4.* Podaci o pribavljenim oblacima točaka na svim pilot lokacijama.
- Tablica 5.5.* Parametri korišteni za proračun Fisher-Lehmannovim modelom.
- Tablica 5.6.* Rezultati proračuna prema Fisher-Lehmannu i Bakker–Le Heuxu za „Žnjan 1“.
- Tablica 5.7.* Prosječni iznosi erozije u karakterističnom poprečnom presjeku na pilot lokaciji „Žnjan 1“.
- Tablica 5.8.* Sumarni prikaz najznačajnijih rezultata opažanja TLS-om na odabranim pilot lokacijama.

## Životopis

Goran Vlastelica dipl.ing.građ. rođen je 10. lipnja 1983. godine u Splitu, gdje je završio osnovnu i srednju školu (Graditeljska škola). Oslobođen je polaganja maturalnog ispita zbog odličnog uspjeha tijekom cjelokupnoga srednjoškolskog obrazovanja. 2001. godine upisao se na Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu. Diplomirao je 27. veljače 2009. godine na temu „Proračun nosive konstrukcije stambeno-poslovne zgrade“ kod Izv.prof.dr.sc. Borisa Trogrlića te stekao stručni naziv diplomirani inženjer građevinarstva. 1. svibnja 2009. godine na istom fakultetu, pri Katedri za geotehniku, zasniva radni odnos u svojstvu asistenta. Sudjeluje u nastavi održavajući vježbe iz kolegija „Mehanika tla i temeljenje“ na Preddiplomskom sveučilišnom studiju građevinarstva, „Geotehničko inženjerstvo“ i „Mehanika stijena“ na Diplomskom studiju građevinarstva te „Mehanika tla i temeljenje“ i „Inženjerska geologija i zemljani radovi“ na Stručnom studiju građevinarstva.

2009. godine upisuje Poslijediplomski znanstveni studij iz znanstvenog područja Tehničkih znanosti, znanstveno polje Građevinarstvo, smjer Geotehnika. Znanstveni rad ostvaruje kao znanstveni novak na projektu Ministarstva znanosti obrazovanja i športa „Modeliranje rastrošbe za potrebe proračuna geotehničkih konstrukcija u flišu“ te kao suradnik na bilateralnom japansko-hrvatskom projektu "Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje rizika klizanja i bujica u Hrvatskoj". U proteklom periodu objavio je u koautorstvu 18 znanstvenih radova u časopisima i zbornicima znanstvenih skupova u zemlji i inozemstvu.

Od 2009. do danas suradnik na preko 100 stručnih projekata, izvještaja o geotehničkim istražnim radovima, laboratorijskim ispitivanjima i revizijama projekata. Pod mentorstvom Prof.dr.sc. Predraga Miščevića 2013. uspješno dovršava komorski postupak za vježbenika kandidata za upis u Hrvatsku komoru inženjera građevinarstva. Od 2010. aktivni je član Hrvatskog geotehničkog društva, Međunarodnog društva za mehaniku stijena - ISRM te Međunarodnog društva za mehaniku tla i geotehničko inženjerstvo - ISSMGE.