Utjecaj trošenja na rezidualnu posmičnu čvrstoću sitnozrnastih litoloških članova fliša

Vivoda Prodan, Martina

Doctoral thesis / Disertacija

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering in Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet u Rijeci**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:157:512247

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository

DIGITALNA KNJIŽNICA

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Martina Vivoda Prodan

UTJECAJ TROŠENJA NA REZIDUALNU POSMIČNU ČVRSTOĆU SITNOZRNASTIH LITOLOŠKIH ČLANOVA FLIŠA

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof.dr.sc. Željko Arbanas

Rijeka, 2016.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Martina Vivoda Prodan

THE INFLUENCE OF WEATHERING PROCESS ON RESIDUAL SHEAR STRENGTH OF FINE GRAINED LITHOLOGICAL FLYSCH COMPONENTS

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2016

Mentor rada: prof.dr.sc. Željko Arbanas

Doktorski rad obranjen je dana _____ u/na _____, pred povjerenstvom u sastavu:

1. izv.prof.dr.sc. Snježana Mihalić Arbanas, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, predsjednica povjerenstva i vanjska članica

2. doc.dr.sc. Sanja Dugonjić Jovančević, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, članica

3. prof.dr.sc. Željko Arbanas, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, član mentor

ZAHVALA

Posebno hvala mentoru prof.dr.sc. Željku Arbanasu na stručnom vodstvu i poticaju tijekom izrade ovog doktorskog rad te na nesebično prenesenom znanju i podršci koje mi je pružio svih ovih godina.

Hvala ocjenjivačima disertacije, izv.prof.dr.sc. Marti Mileusnić, izv.prof.dr.sc. Snježani Mihalić Arbanas, doc.dr.sc. Sanji Dugonjić Jovančević i doc.dr.sc. Vedranu Jagodniku, koji su korisnim ispravcima i konstruktivnim komentarima pridonijeli da doktorski rad bude bolji.

Zahvaljujem mojim kolegama s Katedre za geotehniku, Sanji, Vedranu i Josipu na prijateljstvu i preuzimanju dijela obaveza u nastavi kako bi mi olakšali izradu doktorskog rada.

Hvala prof.dr.sc. Čedomiru Bencu i kolegici Petri na savjetima i knjigama vezanim uz geologiju i mineraloške značajke područja istraživanja.

Veliko hvala izv.prof.dr.sc. Marti Mileusnić na susretljivosti i pomoći oko tumačenja rezultata mineraloških analiza.

Hvala izv.prof.dr.sc. Snježani Mihalić Arbanas na podacima o mineralnom sastavu fliša u Vinodolskoj dolini.

Zahvaljujem Branku Kordiću na izradi geodetskog snimka potrebnog za izradu modela klizišta Krbavčići II u Istri.

Hvala laborantima Juraju Stelli, Ivi Čakariću te Zoranu Sereniju na pomoći tijekom pripreme uzoraka za laboratorijskog ispitivanja.

Veliko hvala Japanskoj agenciji za međunarodnu suradnju (Japan International Cooperation Agency, JICA) i Japanskoj agenciji za znanost i tehnologiju (Japan Science and Technology Agency, JST) na donaciji uređaja za prstenasto smicanje, ICL-1, i programa LS-Rapid potrebnih za izradu doktorskog rada. Hvala prof.dr.sc. Kyojiu Sassa na poduci tijekom dvomjesečnog boravka na Sveučilištu u Kyotu.

Ovaj je doktorski rad nastao kao rezultat rada u okviru projekta Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci (RC.2.2.06-0001) koji je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH.

Hvala Državnom hidrometeorološkom zavodu (DHMZ) na podacima o dnevnim i mjesečnim oborinama izmjerenim na meteorološkim postajama na području istraživanja. Hvala i doc.dr.sc. Josipu Rubiniću na savjetima tijekom obrade istih.

Hvala obitelji i dragim prijateljima na brizi, potpori i razumijevanju tijekom studija.

Hvala dragim roditeljima za ljubav i potporu tijekom mog cjelokupnog školovanja.

Hvala mom Marinu na bezuvjetnoj podršci, strpljenju te ljubavi i razumijevanju tijekom doktorskog studija.

SAŽETAK

U ovom doktorskom radu prikazani su rezultati istraživanja utjecaja trošenja na rezidualnu posmičnu čvrstoću i postojanost sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase na području sjeverne Istre, doline Rječine i Vinodolske doline. Nekompetentni, sitnozrnasti litološki članovi flišnog kompleksa trošenjem značajno mijenjaju fizičko mehaničke značajke. U naslagama fliša česta je pojava klizišta pri čemu se klizna ploha formira ili na kontaktu pokrivača i flišne stijene ili kroz trošne slojeve flišne stijenske mase. Uslijed klizanja dolazi do usitnjavanja stijenske mase na kliznoj plohi, a čvrstoća materijala uslijed nastalih deformacija pada s vršnih na rezidualne vrijednosti. Za reaktiviranje umirenih klizišta po istim kliznim plohama mjerodavne su rezidualne vrijednosti posmične čvrstoće materijala na istima. Utjecaj trošenja na vrijednosti rezidualne posmične čvrstoće sitnozrastih litoloških članova iz naslaga fliša proveden je laboratorijskim ispitivanjima uzoraka različitih stupnjeva trošnosti uređajem za izravno smicanje i prstenasto smicanje. Također su ispitane jednoosna tlačna čvrstoća te postojanost uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti. Određene su promjene mineralnog sastava istih sitnozrastih litoloških članova fliša različite trošnosti nastalih u procesu trošenja. Provedene su numeričke simulacije reaktiviranja klizišta Krbavčići II u sjevernoj Istri i klizišta Valići u dolini Rječine korištenjem rezidualnih parametara čvrstoće za različite stupnjeve trošnosti sitnozrnastih litoloških članova fliša. Pokazano je da trošenje sitnozrnastih litoloških članova fliša ima značajan utjecaj na pad rezidualne posmične čvrstoće te da trošenje ovih materijala utječe na reaktiviranje umirenih klizišta u flišnoj stijenskoj masi.

ABSTRACT

Investigation results of the influence of weathering process on the residual shear strength and durability of fine grained lithological flysch components in the area of north Istria, Rječina Valley and Vinodol Valley are presented in this doctoral theises. Physical and mechanical properties of incompetent, fine grained flysch lithoilogcal members significantly change due to weathering. Landslide occurrences in flysch deposits are frequent and slip surface is formed at the contact of surficial deposits and flysch rock mass or inside the weathered flysch rock mass. Rock mass defragmentation at the slip surface occurs due to sliding and shear strength decreases from peak to residual values thorugh occured displacements. These residual strength values of the slip surface material are competent for the dormant landslide reactivation along the same slip surface. Weathering effect on the residual shear strength values of fine grained lithological flysch components are investigated by laboratory tests on samples of different weathering grades in direct shear and ring shear apparatus. Also uniaxial compressive strenth and durability of fine grained lithological flysch rock mass samples with different weathering grades are investigated. Mineralogical composition of the same fine grained lithological flysch components of different weathering grades is determined. Numerical simulation of the Krbavčići II landslide in north Istria and Valići landslide in the Rječina Valley reactivation are conducted with residual strength parameters of different weathering grades of fine grained lithological flysch components. It is proved that weathering process has significant effect on the residual shear strength decrease of fine grained lithological flysch components and that weathering of those materials causes the dormant landslide reactivation in the flysch rock mass.

KLJUČNE RIJEČI

fliš, trošenje, postojanost, klizište, rezidualna posmična čvrstoća, mineralogija, numeričko modeliranje

KEY WORDS

flysch, weathering, durability, landslide, residual shear strength, mineralogy, numerical modelling

SADRŽAJ

ZAHVALA I

SAŽETAK III

ABSTRACT IV

KLJUČNE RIJEČI, KEY WORDS V

SADRŽAJ VI

1. UVOD 1

1.1. CILJEVI ISTRAŽIVANJA 2

1.2. PLAN ISTRAŽIVANJA I METODOLOGIJA 2

1.3. HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA 6

1.4. SADRŽAJ DOKTOROG RADA 6

2. ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA 8

2.1. GEOLOŠKE ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA 8

2.2. KLIMATSKE ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA 12

2.3. HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA 19

2.4. SEIZMIČKE ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA 20

3. OPĆENITO O FLIŠU I PROCESIMA TROŠENJA U FLIŠU 22

3.1. FLIŠ 22

3.1.1. Sitnozrnaste (pelitne) klastične sedimentne stijene 25

3.2. MEKE STIJENE 27

3.3. PROCESI TROŠENJA I DENUDACIJE U FLIŠU 30

3.3.1. Fizičko trošenje mekih stijena 32

3.3.2. Kemijsko trošenje mekih stijena 34

3.3.3. Stupnjevi trošnosti flišne stijenske mase 36

3.3.4. Erozija i pokreti masa u flišu 38

3.3.4.1. Erozija u flišu 39

3.3.4.2. Pokreti masa u flišu 41

4. UTJECAJ TROŠENJA NA GEOTEHNIČKE I MINERALOŠKE ZNAČAJKE SITNOZRNASTIH LITOLOŠKIH ČLANOVA FLIŠA 44

4.1. PREGLED REZULTATA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA 44

4.2. DEFINIRANJE STUPNJEVA TROŠNOSTI 48

4.3. PRIKUPLJANJE I PRIPREMA UZORAKA 51

4.4. GEOTEHNIČKE ZNAČAJKE SITNOZRNASTIH LITOLOŠKIH ČLANOVA FLIŠA 57

4.4.1. Fizičko mehaničke značajke sitnozrnastih litoloških članova fliša *57*
4.4.2. Rezidualna posmična čvrstoća sitnozrnastih litoloških članova fliša *58*
4.4.3. Ispitivanje čvrstoće u točki (PLT) sitnozrnastih litoloških članova fliša *62*
4.4.4. Postojanost sitnozrnastih litoloških članova fliša *64*
4.5. MINERALOŠKE ZNAČAJKE SITNOZRNASTIH LITOLOŠKIH ČLANOVA FLIŠA **67**
4.5.1. Kapacitet kationske zamjene *67*
4.5.2. Rendgenska difrakcijska analiza *68*
4.5.3. Fazna analiza originalnog uzorka *68*
4.5.4. Fazna analiza frakcije čestica < 2 μm *69*
4.5.5. Kriteriji za prepoznavanje i definiranje minerala glina *70*
4.6. POSTUPAK I REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA **73**
4.6.1. Utjecaj trošenja na geotehničke značajke sitnozrnastih litoloških članova fliša *73*
4.6.1.1. Postupak i rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša *73*
4.6.1.2. Postupak i rezultati ispitivanja fizičko mehaničkih značajki sitnozrnastih litoloških članova fliša *78*
4.6.1.3. Postupak i rezultati ispitivanja rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša u uređaju za prstenasto smicanje *83*
4.6.1.4. Postupak i rezultati ispitivanja rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša u uređaju za izravno smicanje *91*
4.6.1.5. Postupak i rezultati ispitivanja postojanosti sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti iz Istre *103*
4.6.1.5.1. Postupak i rezultati ispitivanja postojanosti laboratorijskim oponašanjem procesa sušenja i vlaženja 103
4.6.1.5.2. Postupak i rezultati ispitivanja postojanosti sitnozrnastih litoloških članova fliša dinamičkim uređajem za ispitivanje postojanosti 108
4.6.2. Utjecaj trošenja na mineraloške značajke sitnozrnastih litoloških članova fliša *115*
4.6.2.1. Utjecaj trošenja na mineraloške značajke sitnozrnastih litoloških članova fliša iz Istre *116*
4.6.2.2. Utjecaj trošenja na mineraloške značajke sitnozrnastih litoloških članova fliša iz doline Rječine *126*

5. NUMERIČKE ANALIZE I SIMULACIJE PONAŠANJA KLIZIŠTA U FLIŠU 134

5.1. UVOD I PREGLED REZULTATA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....134

5.1.1. Numeričko modeliranje programom LS-Rapid 136

5.1.2. Klizište Krbavčići II u Istri 140

5.1.3. Klizište Valići u dolini Rječine 142

5.2. REZULTATI ANALIZA STABILNOSTI I NUMERIČKIH SIMULACIJA PONAŠANJA KLIZIŠTA.....144

5.2.1. Rezultati modeliranja klizišta Krbavčići II u Istri 144

5.2.2. Rezultati modeliranja klizišta Valići u dolini Rječine.....153

6. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA.....161

LITERATURA 165

POPISI 178

POPIS SLIKA.....178

POPIS TABLICA 187

ŽIVOTOPIS AUTORA..... 189

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA..... 191

1. UVOD

Promatrajući mnogobrojne procese pokreta mase u flišnom području Istre i Hrvatskog primorja, zanimljivo je utvrditi koji su parametri značajni i koji procesi utječu na moguće aktiviranje i reaktiviranje klizišta na padinama u flišu.

Predmet istraživanja ovog doktorskog rada su nekompetentni litološki članovi flišne stijenske mase na području istraživanja koji obuhvaća sjevernu Istru, dolinu Rječine i Vindolsku dolinu. Flišni tereni na području istraživanja su izgrađeni od različitih litoloških članova gdje se izmjenjuju nekompetentni litološki članovi kao što su prahoviti i glinoviti šejlovi, siltiti i lapori, a mogu sadržavati i kompetentne litološke članove poput pješčenjaka, breča, konglomerata i vapnenaca. Kompetentne stijene su stijene veće čvrstoće, krutosti i otpornosti na djelovanje trošenja i erozije dok su nekompetentne stijene, stijene manje čvrstoće, plastičnije i manje otpornosti na djelovanje procesa trošenja i erozije.

Pojava pokreta masa i erozije uslijed trošenja nekompetentnih, sitnozrnastih litoloških članova na flišnom terenu je česta. Uslijed klizanja dolazi do pada posmične čvrstoće materijala s vršne na njezinu rezidualnu vrijednost. Vršna čvrstoća tla je najveća moguća vrijednost posmičnog otpora koji se mobilizira pri relativno malim posmičnim deformacijama, dok je rezidualna čvrstoća tla posmični otpor nakon razvoja velikih posmičnih deformacija i mjerodavan je za mogući posmični otpor materijala na kliznoj plohi gdje su se velike deformacije već dogodile.

Kako se u doktorskom radu razmatra mogućnost reaktiviranja umirenih klizišta, odnosno ponašanje materijala na kliznoj plohi koji je uslijed prethodnih klizanja već doživio značajne posmične deformacije, znanstveni interes ovog doktorskog rada je istraživanje parametara rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša. Klizanjem dolazi do usitnjavanja stijenske mase na kliznoj plohi, odnosno materijali na kliznoj plohi predstavljaju poremećenu flišnu stijensku masu kroz koju se klizanje dogodilo, a kroz nastalo poremećenje omogućeno je dotjecanje vode i daljnje trošenje stijenske mase u području klizne plohe.

Predmet istraživanja ovog doktorskog rada je utjecaj trošenja na rezidualnu posmičnu čvrstoću sitnozrnastih litoloških članova fliša, odnosno na moguće reaktiviranje umirenih klizišta s kliznom plohom u sitnozrnastim, nekompetentnim litološkim članovima fliša.

1.1. CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Utvrđeni su sljedeći cijevi istraživanja:

- Odrediti utjecaj trošenja na promjene mineralnog sastava sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase.
- Odrediti utjecaj trošenja na veličinu rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase.
- Odrediti utjecaj trošenja na postojanost sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase.
- Numeričkim simulacijama ponašanja odabranih umirenih klizišta numerički analizirati utjecaj trošenja i rezidualne posmične čvrstoće na mogućnost njihovog reaktiviranja.

1.2. PLAN ISTRAŽIVANJA I METODOLOGIJA

Plan i metodologija istraživanja mogu se podijeliti u pet faza i to: 1. definiranje stupnjeva trošnosti sitnozrnastih litoloških članova fliša, 2. uzorkovanje i priprema uzoraka, 3. laboratorijska ispitivanja uzoraka, 4. mineraloške analize, 5. numeričke simulacije klizišta koje obuhvaćaju geodetsko snimanje klizišta, odabir ulaznih parametara i provedbu 2D i 3D analiza stabilnosti klizišta.

Istraživanje je provedeno kroz sljedeće korake:

- **Definiranje stupnjeva trošnosti**

Za određivanje stupnjeva trošnosti sitnozrnastih litoloških članova fliša na izdancima u području istraživanja korištena je metoda predložena od Ündül & Tuğrul (2012). Stupnjevi trošnosti su definirani na osnovu promjene boje stijene, stanja

diskontinuiteta, očuvanosti originalne strukture stijene i jednoosne tlačne čvrstoće stijenske mase, σ_{ci}, dobivene pokusom Schmidtovim čekićem.

- **Uzorkovanje i priprema uzoraka**

Prikupljanje uzoraka sitnornastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti provedeno je na području sjeverne Istre, doline Rječine i Vinodolske doline. Uzorci flišne stijenske mase iz sjeverne Istre i Vinodolske doline uzeti su na istom profilu trošnosti te se za iste može pretpostaviti da potječu iz identičnih naslaga i izvorno su bili istog mineralnog sastava. Uzorkovane su i istaložene naslage s dna akumulacije Valići podrijetlom iz fliša. Uzorci iz doline Rječine nisu uzeti s istog profila već s nekoliko bliskih lokacija budući da u dolini Rječine nije bilo dostupnog cjelovitog profila u kojem su bili prisutni svi stupnjevi trošnosti sitnozrnastih litoloških članova fliša. S obzirom da se iz meke stijenske mase u pravilu ne mogu uzeti neporemećeni uzorci stijenske mase različite trošnosti, uzeti su poremećeni uzorci koji su naknadno obrađeni i usitnjeni uređajem za usitnjavanje metodom Los Angeles do stupnja koji odgovara inženjerskom tlu. Pretpostavljeno je da ovo stanje odgovara stanju materijala na kliznoj plohi, kada zbog naprezanja i deformacija uslijed klizanja, dolazi do prirodnog usitnjavanja materijala. Postojeće klizne plohe predstavljaju oslabljene dijelove stijenske mase na kojima se proces trošenja odvija brže nego u ostalim dijelovima padine, uslijed izloženosti zraku i vodi.

- **Laboratorijska ispitivanja**

Poremećenom materijalu je uslijed deformacija tijekom klizanja došlo do pada posmične čvrstoće s vršnih na rezidualne vrijednosti te je stoga odgovarajuće promatrati rezidualne zakone ponašanja materijala. Laboratorijska ispitivanja provedena su u Laboratoriju za geotehniku na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Laboratorijskim ispitivanjima određene su specifična gustoća, granulometrijski sastav, Atterbergove granice pripremljenog materijala. Uređajem za izravno smicanje u normalno konsolidiranim dreniranim uvjetima i uređajem za prstenasto smicanje u normalno konsolidiranim nedreniranim uvjetima i uvjetima porasta pornog pritiska određeni su rezidualni parametri posmične čvrstoće pripremljenog materijala. Korišteni uređaj za prstenasto smicanje, ICL-1, omogućuje ispitivanje uzoraka tla pri normalnim naprezanjima do 1 MPa i pornim pritiscima u nedreniranim uvjetima do 1MPa. Uzorci su prije ispitivanja u potpunosti saturirani standardnim postupkom te

su ugrađeni u posmičnu ćeliju koja je ispunjena deaeriranom vodom. Ugrađeni uzorci su ispitani do sloma u uvjetima porasta pornog pritiska kojim se simulira porast razine podzemne vode što odgovara prirodnim uvjetima pokretanja klizišta izazvanih dugotrajnim oborinama. Također su ispitani i u nedreniranim uvjetima s konstantnom brzinom smicanja. Ispitivalo se sve do stanja dinamičke ravnoteže budući da se uređajem za prstenasto smicanje mogu postići beskonačne deformacije. Pripremljeni uzorci su ispitani u uređaju za izravno smicanje u potpuno saturiranom stanju s konstantnom brzinom smicanja. Nakon ispitivanja u uređaju za izravno smicanje, mikroskopom je analizirana promjena uzorka nakon usitnjavanja i smicanja u odnosu na izvorno stanje. Provedena su i ispitivanja tlačne čvrstoće u točki PLT (eng. *Point Load Test*) metodom te postojanosti, simulacijom sušenje-vlaženje i uređajem za ispitivanje postojanosti, intaktnih uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša iz Istre različitih stupnjeva trošnosti.

- **Mineraloške analize**

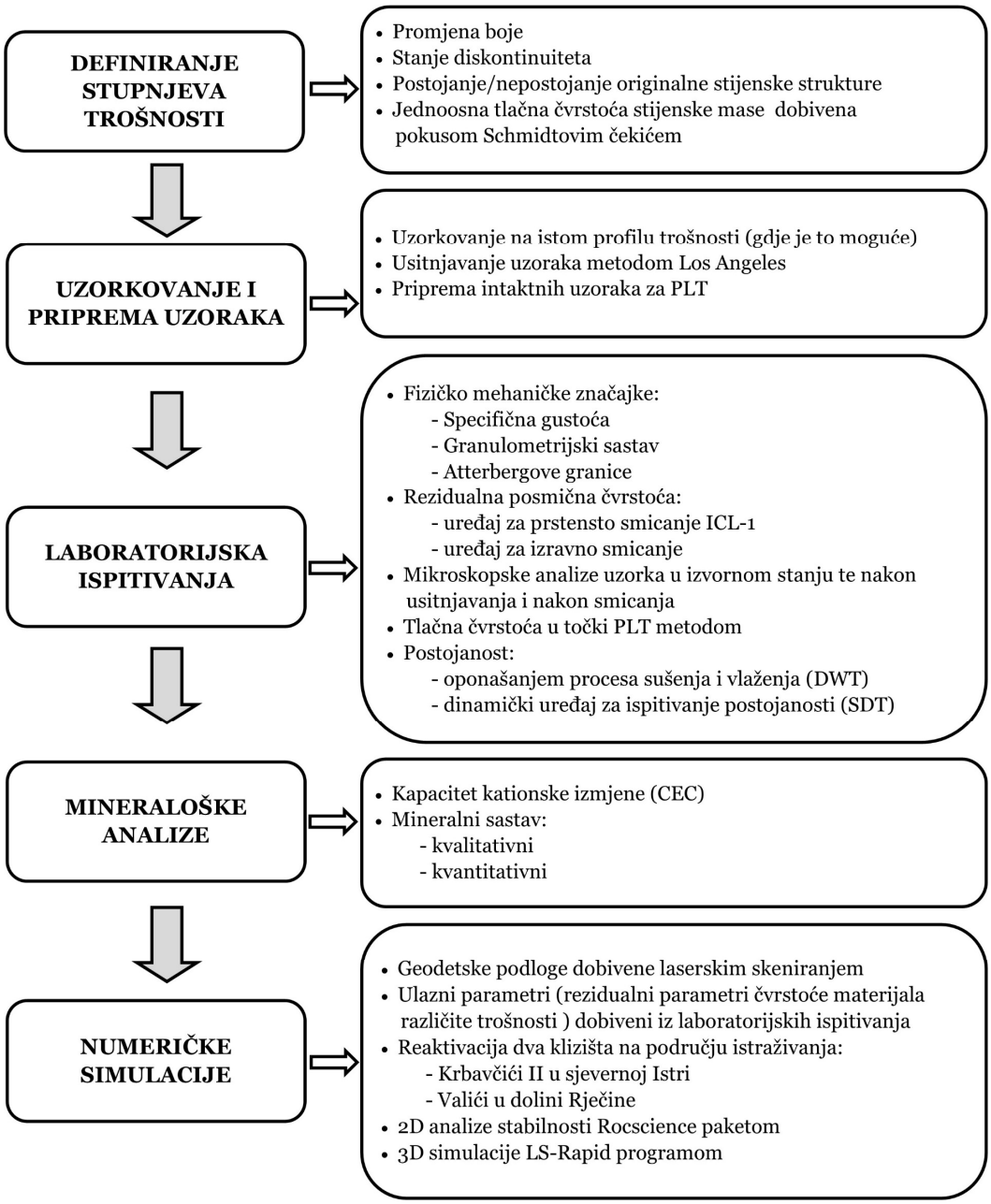
Mineraloške analize provedene su na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u Zagrebu samo na uzorcima sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti iz Istre i doline Rječine. Mineralni sastav uzoraka određen je primjenom rendgenske difrakcije na prahu korištenjem Philipsovog difraktometra s CuKpα zračenjem, grafitnim monokromatorom, automatskim divergentnim slitom i 0.1° ulaznim slitom. Udio minerala u uzorcima određen je na temelju difraktograma originalnih uzoraka, te otapanjem puferom Na-acetat/octena kiselina (pri pH 5) koji otapa kalcit, te nakon otapanja HCl 1:1 koja otapa klorit. Na temelju rezultata otapanja određene su količine kalcita i klorita, a usporedbom s difraktogramima standarda određeni su ostali prisutni minerali u ispitanim uzorcima. Faznom analiza frakcije čestica < 2 μm dobivena je difrakcijska slika tretiranjem orijentiranih uzoraka frakcije čestica < 2 μm i to saturiranjem magnezijem i kalijem te žarenjem na 300°C i nakon toga i na 550°C. Kapacitet kationske zamjene određen je saturiranjem uzoraka s Cu-trietilenetetraminom te mjerenjem promjene boje spektrometrom.

- **Numeričke simulacije**

Numeričke simulacije provedene su LS-Rapid programom (Sassa et al. 2010) za trodimenzionalnu simulaciju modela klizišta Krbavčići II u sjevernoj Istri i klizišta Valići u dolini Rječine. Dvodimenzionalne analize stabilnosti i određivanje dubine

klizne plohe provedene su Rocscience programskim paketom, programima Slide i Phase. Geodetska podloga za simulaciju klizišta Valići u dolini Rječine dobivena je laserskim skeniranjem iz zraka provedenim 2012. godine, a geodetska podloga za simulaciju klizišta Krbavčići II u Istri, laserskim skeniranjem iz zraka provedenim 2016. godine. Ulazni parametri za provedbu simulacija su rezidualni parametri čvrstoće materijala različite trošnosti dobiveni prethodno opisanim laboratorijskim ispitivanjima čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša.

Shematski prikaz metodologije prikazan je na Slici 1.1.



Slika 1.1 *Shema istraživanja doktorskog rada*

1.3. HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA

Na osnovi rezultata preddisertacijskih istraživanja usvojene su sljedeće hipoteze istraživanja:

- Trošenjem sitnozrnastih litoloških članova fliša dolazi do promjene mineralnog sastava što utječe na pad rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša.
- Pad rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša značajno utječe na proces reaktiviranja umirenih klizišta u naslagama fliša.

1.4. SADRŽAJ DOKTOROG RADA

Ovaj doktorski rad se sastoji od sažetka, šest glavnih poglavlja, popisa korištene literature te popisa slika i tablica. Šest glavnih poglavlja podijeljeno je na potpoglavlja, kako je opisano u nastavku.

U prvom poglavlju **Uvod** opisana je motivacija za izradu doktorskog rada, svrha i ciljevi istraživanja i hipoteze rada. Opisan je plan i metodologija istraživanja te kratki prikaz sadržaja rada.

U drugom poglavlju **Značajke područja istraživanja** daje se pregled geoloških, klimatskih, hidrogeoloških i seizmičkih značajki područja istraživanja.

Treće poglavlje **Općenito o flišu i procesima trošenja u flišu** prikazuje postojeća saznanja vezana uz procese trošenja i denudacije naslaga flišne stijenske mase. Kroz definicije i pregled literature opisani su osnovni pojmovi korišteni u radu kao što su meke stijene, sedimentne stijene i fliš, te procesi trošenja, erozije i pokreta masa u flišnoj stijenskoj masi.

Unutar četvrtog poglavlja **Utjecaj trošenja na geotehničke i mineraloške značajke sitnozrnastih litoloških članova fliša** dan je pregled postojećih saznanja, relevantnih radova i istraživanja o geološkim, inženjerskogeološkim, geotehničkim i mineraloškim značajkama fliša. Opisan je način definiranja stupnjeva trošnosti, postupak prikupljanja i pripreme uzoraka te način određivanja fizičko

mehaničkih značajki, rezidualne posmične čvrstoće pripremljenih uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti. Opisan je postupak ispitivanja tlačne čvrstoće u točki, postojanosti uzoraka sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz područja sjeverne Istre te provedeni postupci određivanja mineraloških značajki uzoraka iz područja sjeverne Istre i doline Rječine. Na kraju poglavlja prikazani su rezultati provedenih laboratorijskih ispitivanja na uzorcima sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti s ciljem određivanja utjecaja trošenja na njihove mineraloške i geotehničke značajke.

Peto poglavlje **Numeričke analize i simulacije ponašanja klizišta u flišu** opisuje korištenje kompjuterskog programa LS-Rapid za numeričke simulacije ponašanja klizišta i programskog paketa Rocscience za dvodimenzionalne analize stabilnosti padine. Na temelju rezultata laboratorijskih ispitivanja sitnozrnastih litoloških članova fliša provedene su 2D analize stabilnosti i 3D simulacije klizišta Krbavčići II u sjevernoj Istri te klizište Valići u dolini Rječine za različite stupnjeve trošnosti materijala.

U šestom poglavlju **Zaključci i smjernice za daljnja istraživanja** su na osnovu dobivenih rezultata doneseni opći zaključci: trošenje sitnozrnastih litoloških članova fliša ima značajan utjecaj na pad rezidualne posmične čvrstoće te da trošenje ovih materijala značajno utječe na reaktiviranje umirenih klizišta u flišnoj stijenskoj masi. Opisane su i smjernice daljnjih znanstvenih istraživanja.

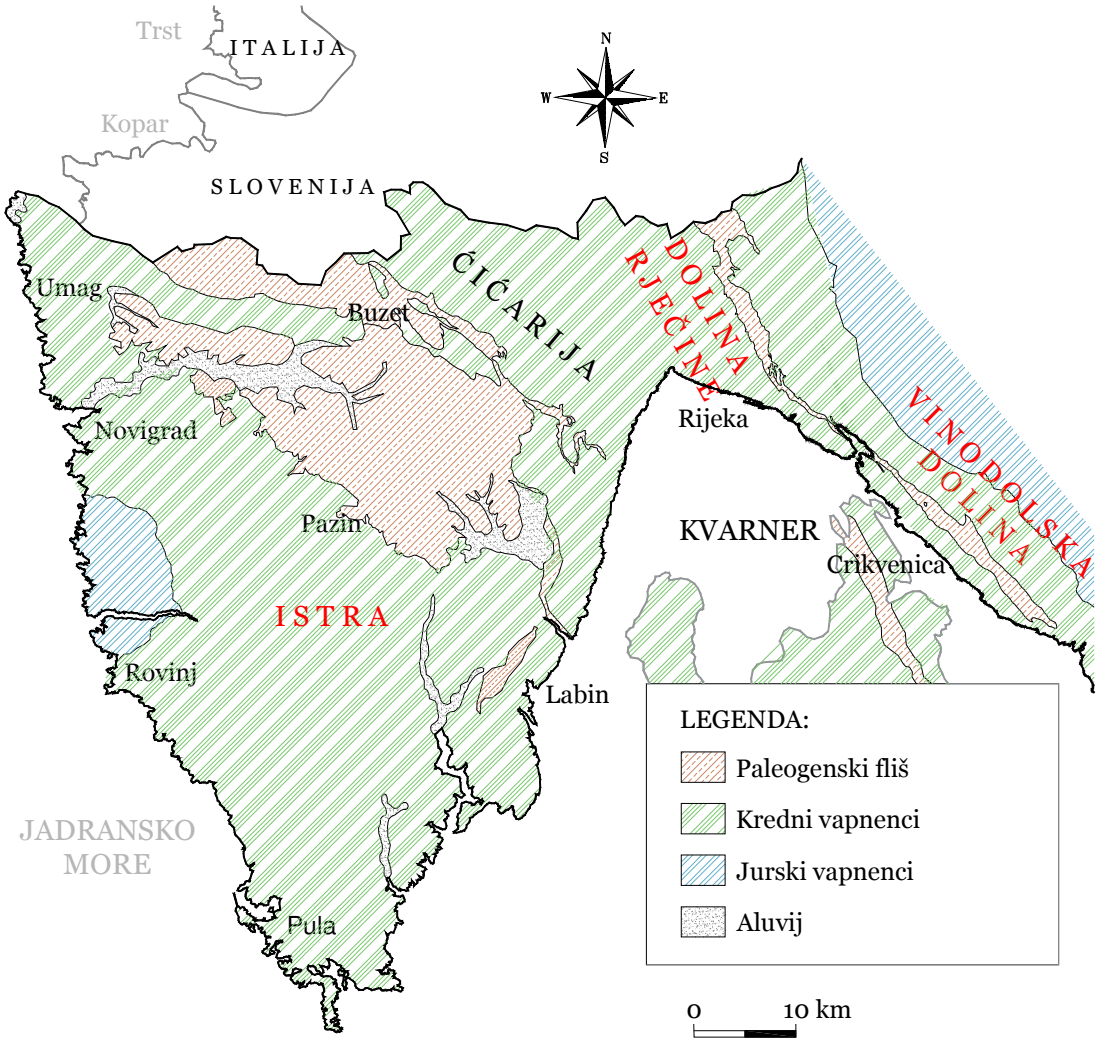
2. ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

Područje istraživanja ovog doktorskog rada obuhvaća sjeveroistočni dio Istre, dolinu Rječine i Vinodolsku dolinu, sličnih geoloških, klimatskih, hidrogeloških i tektonskih značajki. Karakteriziraju ga naslage fliša.

2.1. GEOLOŠKE ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

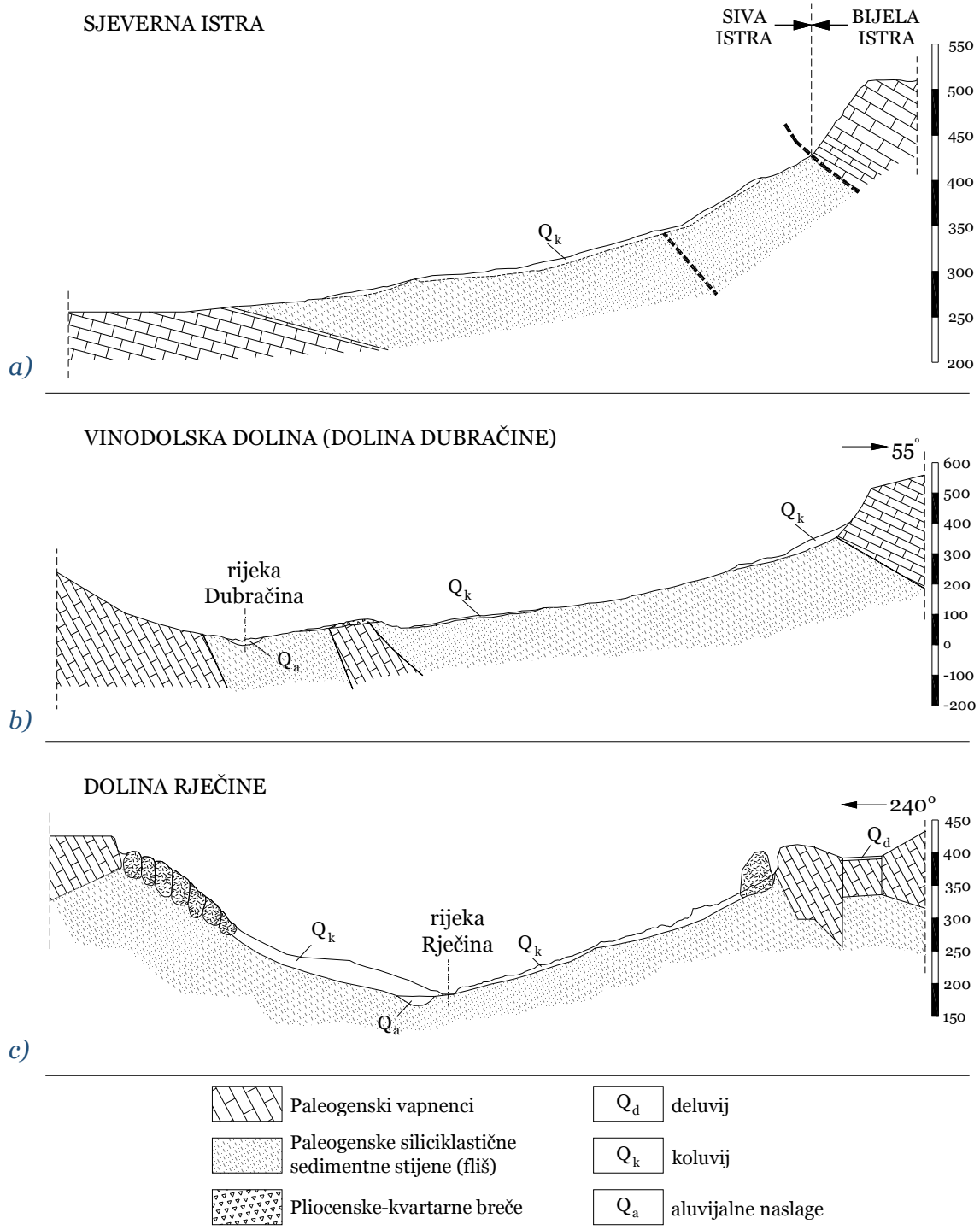
Geološku građu Istre jasno određuju tri područja koja se podudaraju s povijesnim regijama utvrđenim od strane domaćeg stanovništva: 1. Crvena Istra: jursko-kredno-paleogenska karbonatna zaravan južne i zapadne Istre, 2. Bijela Istra: kredno-paleogenski karbonatno-klastični pojas s ljuskavom građom u istočnoj i sjeveroistočnoj Istri (od Plomina preko Učke u Ćićariju), te 3. Siva Istra: paleogenski flišni bazen srednje Istre (Velić et al. 1995; Velić & Vlahović 2009). U dolini Rječine i Vinodolskoj dolini vrhove bokova doline izgrađuju kredni i paleogenski vapnenci, dok hipsometrijski niže dijelove, uključujući i dio doline, izgrađuju paleogenske naslage fliša (Velić & Vlahović 2009; Aljinović et al. 2010; Benac et al. 2014). Geološka građa područja istraživanja prikazana je na Slici 2.1.

U ovom doktorskom radu se pod pojmom flišni stijenski kompleks podrazumijeva izmjena nekompetentnih litoloških članova kao što su prahoviti i glinoviti šejlovi, siltiti i lapori, a može sadržavati i kompetentne litološke članove poput pješčenjaka, breča, konglomerata i vapnenaca (Marinos & Hoek 2001). Naslage flišnog kompleksa u Istri imaju gotovo horizontalni položaj slojeva, osim uz rasjedne geološke granice u zoni Ćićarije na sjeveroistoku i masiva Učke na istoku, gdje je flišna stijenska masa znatnije deformirana (Velić & Vlahović 2009). Morfogenetski razvoj padina oblikovanih u siliciklastičnim stijenama u podnožju Ćićarije i u podnožju Učke je sličan razvoju padina u zoni Klana-Dolina Rječine-Draška dolina-Bakarski zaljev-Vinodolska dolina (Benac et al. 2009), Slika 2.2. Njihova značajka je, s jedne strane, intenzivna tektonska poremećenost pa stoga i deformiranost, a s druge strane, mjestimično debele nakupine potencijalno nestabilnih deluvijalno koluvijalnih naslaga nastalih miješanjem materijala iz raspadnutih i erodiranih flišnih stijena te gravitacijskog transporta krupnozrnastih odlomaka s karbonatnih uzvišenja (Benac 1994; Arbanas et al. 2006).



Slika 2.1 *Geološka karta područja istraživanja (modificirano prema Velić & Vlahović 2009)*

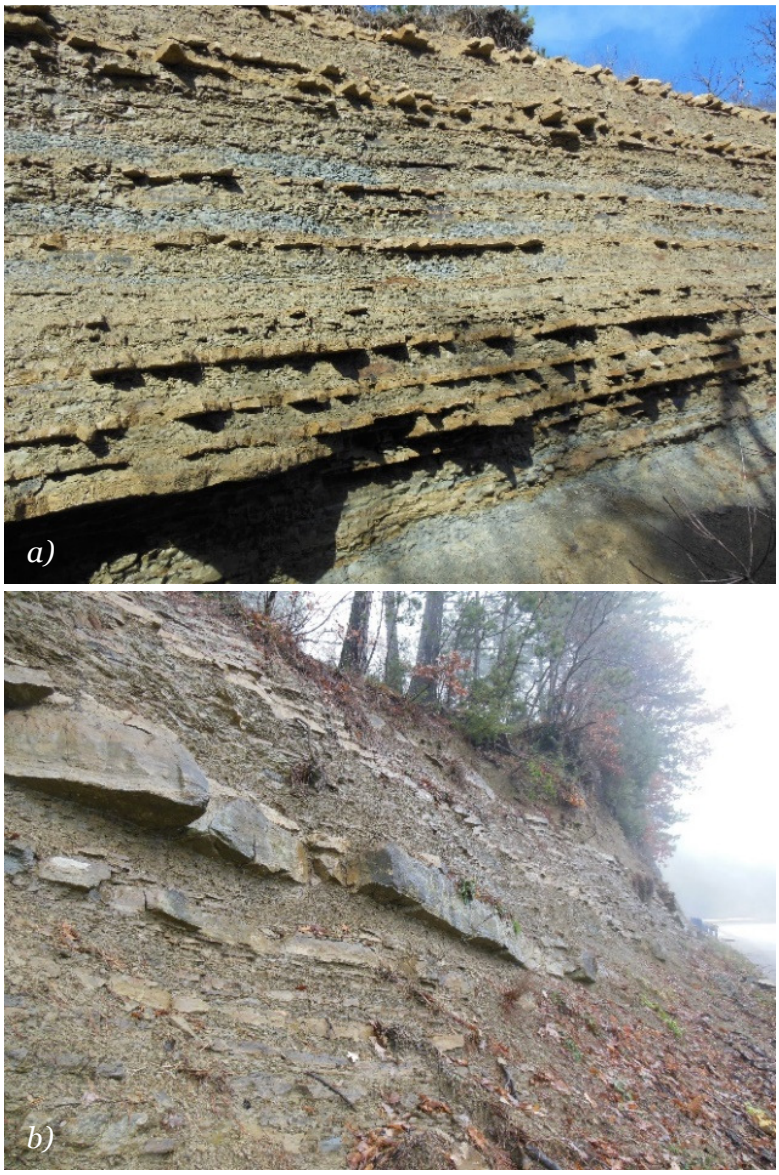
Kinematika strukturnih elemenata cijele tektonske jedinice dolina Rječine-Bakarski zaljev-Vinodolska dolina se svodi na odnos relativno krutih karbonatnih stijena i relativno plastičnih siliciklastičnih stijena tijekom istodobnog deformiranja. Deformacije su osobito izražene na kontaktu vapnenaca i flišnog kompleksa gdje su relativno kruti vapnenački blokovi utisnuti u duktiliniju flišnu stijensku masu (Benac et al. 2009; Arbanas et al. 2006) (Slika 2.2 i 2.3).



Slika 2.2 *Poprečni geološki presjeci: a) Sjeverne Istre, b) Vinodolske doline i c) doline Rječine (modificirano prema Arbanas et al. 2006; Blašković 1999; Benac et al. 2010)*

Slika 2.3 *Snimke iz zraka kontakta vapnenaca i fliša u: a) sjevernoj Istri (fotografirao: A. Medica, 2015), b) dolini Rječine (fotografirao: Ž. Arbanas, 2012), c) Vinodolskoj dolini (fotografirao: D. Kalajžić, 2015)*

Flišna stijenska masa odlikuje se velikom litološkom heterogenošću zbog čestog vertikalnog i lateralnog izmjenjivanja raznovrsnih litoloških članova kao što su lapori, siltiti i sitnozrnasti pješčenjaci i slojevi kalkarenita na području sjeverne Istre (Arbanas et al. 2006) (Slika 2.4), odnosno lapori, siltiti, šejlovi i sitnozrnasti pješčenjaci u dolini Rječine (Benac et al. 2005; Benac et al. 2009). Flišna stijenska masa je slabe vodopropusnosti te podložna trošenju i eroziji te je stoga gotovo u potpunosti prekrivena trošnim površinskim materijalom sastavljenim od mješavine gline, praha, pijeska i odlomaka do blokova pješčenjaka višemetarske debljine (Benac et al. 2005) (Slika 2.2). U flišnom kompleksu u području Vinodolske doline dominiraju sitnozrnasti intervali nad pješčenjacima i biokalkruditima (Aljinović et al. 2010). Sitnozrnasti intervali su determinirani kao lapori, prahoviti lapori, kalcitični glinoviti siltiti, siltiti i glinoviti siltiti (Jurak et al. 2005).

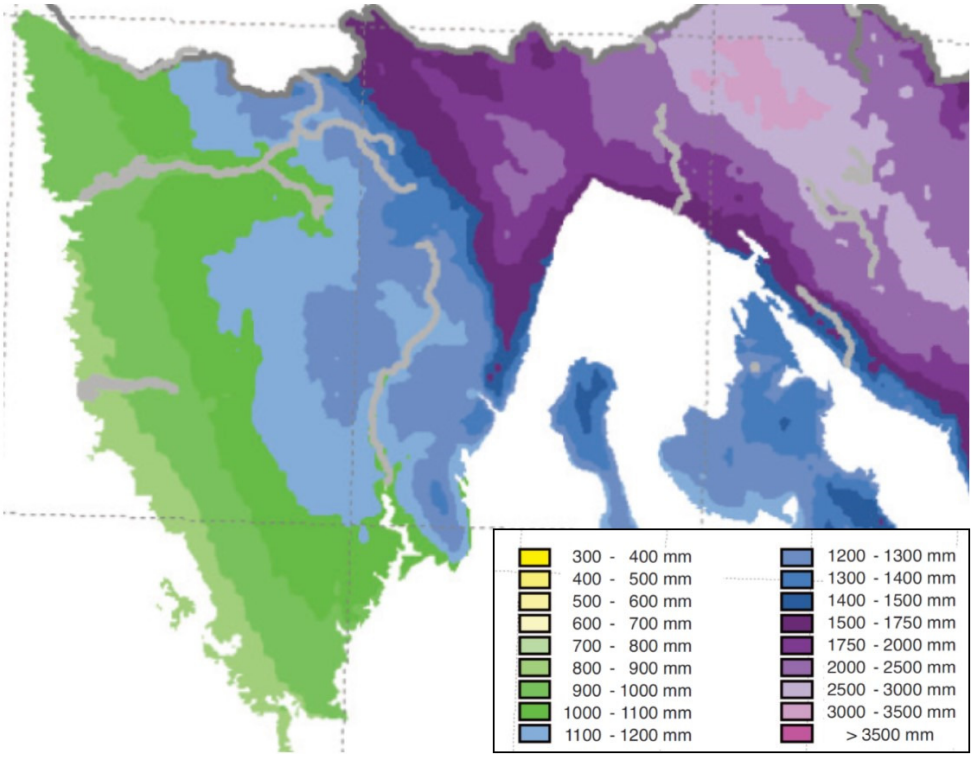


Slika 2.4 *Sukcesivna izmjena lapora, siltita i pješčenjaka u sjevernoj Istri na lokaciji: a) Brus, b) Krbavčići*

2.2. KLIMATSKE ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

Na području sjeverne Istre, doline Rječine i Vinodolske doline prevladavajući utjecaj na trošenje flišne stijene ima proces sušenje-vlaženje, na koji izravno utječe vremenska raspodjela oborina, temperature i vjetra. U nastavku slijedi kratki opis klimatskih značajki područja istraživanja. Prema Zaninović et al. (2008), srednja godišnja količina oborine na području Hrvatske kreće se u rasponu od 300 mm do malo više od 3500 mm (Slika 2.5). Godišnji hod mjesečnih količina oborina 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 pripadaju toplom dijelu godine (travanj do rujan) i tip hoda u kojem najmanje oborine ima mjesec u hladnom dijelu godine (listopad do ožujak). Prvom tipu pripada područje Istre, cijelo jadransko priobalje, otoci i dalmatinsko zaleđe. Na tom području glavni maksimum mjesečnih količina oborina nastupa u studenom, a glavni minimum mjesečnih količina oborina u srpnju. U Istri su ljetni mjeseci srpanj i kolovoz ekstremno sušni mjeseci čija vrijednost percentila 2 iznosi manje od 10 mm. Na kvarnerskom priobalju kojem pripadaju dolina Rječine i Vinodolska dolina, ekstremno sušni ljetni mjeseci mogu dosegnuti i do 20 mm oborine. Područje kvarnerskog priobalja ljeti je nešto kišovitije od ostalog dijela jadranske obale. Vjerojatnost pojavljivanja sušnih razdoblja najveća je u primorskoj Hrvatskoj. Na sjevernom Jadranu najkišovitije razdoblje je od studenog do svibnja dok trajanje sušnih razdoblja iznosi od 11 do 20 dana i najčešće je u srpnju i kolovozu iako se može očekivati tijekom cijele godine (Zaninović et al. 2008).



Slika 2.5 *Karta srednjih godišnjih količina oborina za područje istraživanja (Zaninović et al. 2008)*

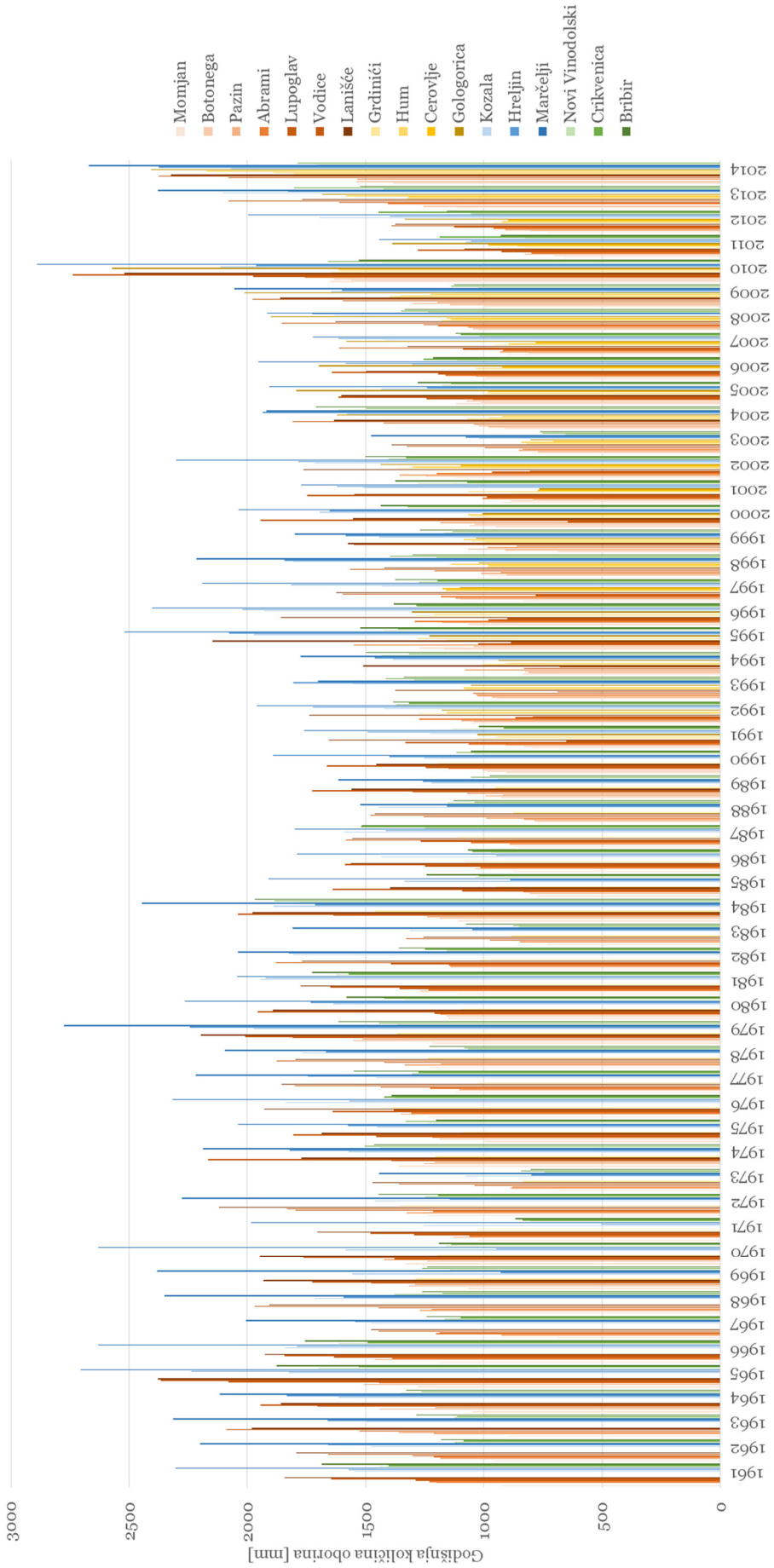
Podaci o količinama oborina na području istraživanja, dobiveni mjerenjima u trajanju od 18 do 54 godine, dobiveni su od Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) i to za 17 mjerodavnih mjernih postaja: 11 mjernih postaja mjerodavnih za područje

srednje i sjeveroistočne Istre (Abrami, Vodice, Lupoglav, Pazin, Lanišće, Momjan, Botonega, Cervolje, Gologorica, Grdinići i Hum); tri mjerne postaje mjerodavne za područje doline Rječine (Kozala, Marčelji i Hreljin); te tri mjerne postaje mjerodavne za područje Vinodolske doline (Crikvenica, Novi Vinodolski i Bribir).

U Tablici 2.1 dane su srednje godišnje količine oborina po pojedinim mjernim postajama na području istraživanja. Hod godišnje količine oborina na mjernim postajama na području istraživanja za razdoblje od 1961. do 2014. godine prikazan je na Slici 2.6.

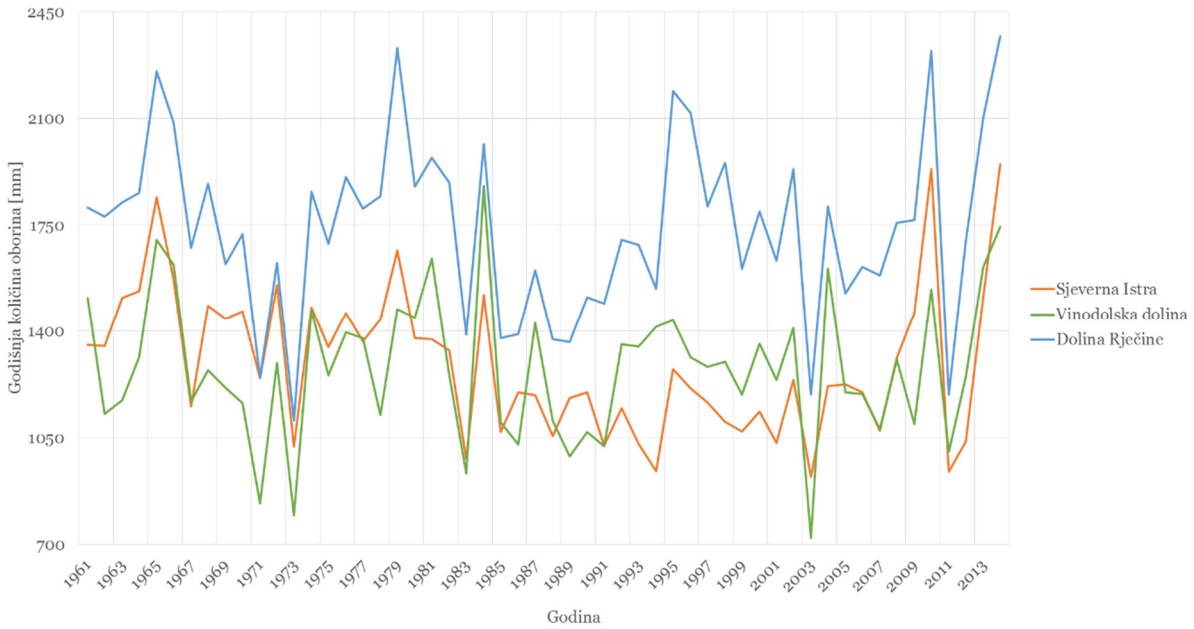
Tablica 2.1 *Popis mjernih stanica, vrijednosti srednjih godišnjih količina oborina (eng. Mean Annual Precipitation, MAP) i mjernih razdoblja (prema podacima DHMZ-a)*

Mjerna stanica		MAP [mm]	Mjerno razdoblje	
			od – do [god]	ukupno trajanje [god]
Sjeverna Istra				
1	Abrami	1169,54	1961. - 2014.	54
2	Vodice	1633,27	1961. - 2014.	54
3	Lupoglav	1302,18	1961. - 2014.	54
4	Pazin	1116,51	1961. - 2012.	52
5	Lanišće	1722,34	1961. - 2014.	54
6	Momjan	1007,64	1961. - 2014.	54
7	Botonega	1017,07	1988. - 2014.	27
8	Cerovlje	1126,25	1997. - 2014.	18
9	Gologorica	1411,81	1991. - 2014.	24
10	Grdinići	1132,03	1969. - 2014.	46
11	Hum	1124,79	1991. - 2014.	24
Dolina Rječine		1742.58		
1	Kozala	1574,42	1961. - 2014.	54
2	Marčelji	2090,41	1961. - 2014.	54
3	Hreljin	1562,90	1961. - 2014.	54
Vinodolska dolina		1281.45		
1	Crikvenica	1267,63	1961. - 2014.	54
2	Novi Vinodolski	1235,95	1961. - 2014.	54
3	Bribir	1328,23	1961. - 2013.	53



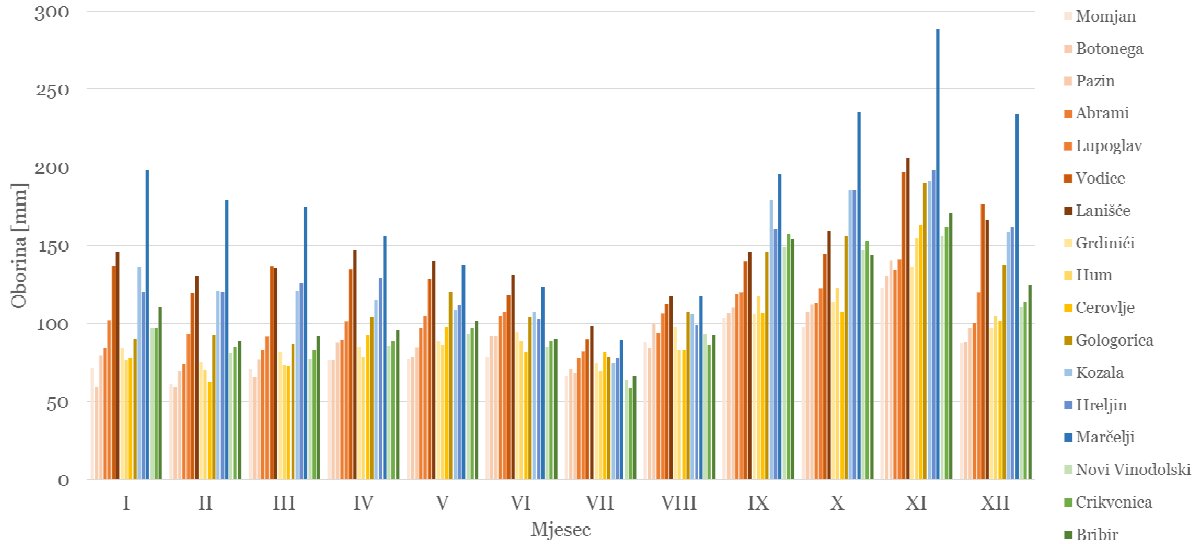
Slika 2.6 *Godišnje količine oborina izmjerene na mjernim postajama Kozala, Marčelji i Hreljin (dolina Rječine), Abrami, Vodice, Lupoglav, Pazin, Lanišće, Momjan, Botonega, Cerovlje, Gologorica, Grdinići i Hum (srednja i sjeveroistočna Istra) te Novi Vinodolski, Crikvenica i Bribir (Vinodolska dolina), za razdoblje od 1961. do 2014. godine (prema podacima DHMZ-a)*

Slika 2.7 prikazuje srednje godišnje količine oborina za područje sjeverne Istre, doline Rječine i Vinodolske doline ovisno o broju aktivnih mjernih postaja u razdoblju od 1961. do 2014. godine.



Slika 2.7 *Godišnje količine oborina na području istraživanja za razdoblje od 1961. do 2014. godine (prema podacima DHMZ-a)*

Podaci srednjih mjesečnih količina oborina izmjerenim na mjernim postajama na području istraživanja za razdoblje od 1961. do 2014. godine prikazani su na Slici 2.8. i u Tablici 2.2

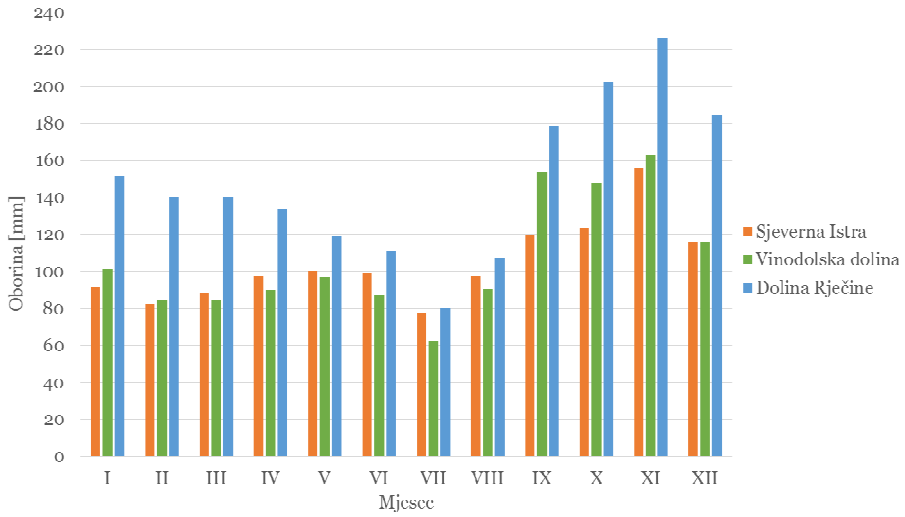


Slika 2.8 *Srednje mjesečne količine oborina izmjerene na mjernim postajama Kozala, Marčelji i Hreljin (dolina Rječine), Abrami, Vodice, Lupoglav, Pazin, Lanišće, Momjan, Botonega, Cerovlje, Gologorica, Grdinići i Hum (srednja i sjeveroistočna Istra) te Novi Vinodolski, Crikvenica i Bribir (Vinodolska dolina), za razdoblje od 1961. do 2014. godine (prema podacima DHMZ-a)*

Tablica 2.2 *Podaci o srednjim mjesečnim količinama oborina (mm) za mjerne postaje na području istraživanja za razdoblje od 1961. do 2014. godine (prema podacima DHMZ-a)*

Mjerna stanica		Mjesec											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Sjeverna Istra		**91,49**	**82,34**	**88,36**	**97,52**	**100,3**	**99,33**	**77,85**	**97,50**	**119,8**	**123,36**	**155,84**	**115,9**
1	Abrami	83,86	73,70	82,93	89,21	96,95	104,59	77,96	94,11	118,72	113,21	133,77	100,52
2	Vodice	136,92	119,55	136,48	134,60	128,60	118,17	89,50	112,35	139,29	144,56	197,05	176,19
3	Lupoglav	102,15	93,19	91,64	101,30	104,45	107,25	82,16	106,50	119,96	122,46	140,50	119,93
4	Pazin	79,41	69,45	76,68	87,84	84,62	92,14	67,90	100,05	109,92	111,79	140,11	96,62
5	Lanišće	145,65	130,46	135,37	146,62	140,13	130,93	98,21	117,33	145,68	159,33	206,06	166,55
6	Momjan	71,39	60,79	70,51	76,48	77,58	78,48	66,13	87,94	103,39	97,91	122,60	87,33
7	Botonega	58,87	58,67	65,10	76,45	78,86	91,79	70,76	84,19	106,64	107,36	130,65	87,74
8	Cerovlje	78,02	62,18	72,57	92,56	97,38	81,82	81,66	82,52	106,36	107,19	162,56	101,43
9	Gologorica	89,71	92,46	86,45	103,96	120,18	103,82	78,60	107,28	145,58	156,15	190,13	137,50
10	Grdinići	83,99	75,40	81,13	84,83	88,80	94,18	74,35	97,34	105,48	113,99	135,94	96,59
11	Hum	76,43	69,85	73,07	78,90	86,22	88,92	69,12	82,91	117,19	123,05	154,85	104,28
Dolina Rječine		**151,57**	**139,87**	**140,44**	**133,4**	**119,3**	**111,1**	**80,5**	**107,5**	**178,8**	**202,1**	**226,1**	**184,8**
1	Kozala	136,17	120,45	120,71	115,18	108,86	107,22	74,46	106,08	179,24	185,68	191,25	158,81
2	Marčelji	198,39	179,14	174,87	155,87	137,48	123,31	89,35	117,15	196,16	235,02	288,85	234,25
3	Hreljin	120,15	120,04	125,73	129,27	111,66	102,65	77,64	99,36	161,04	185,54	198,13	161,19
Vinodolska dolina		**101,16**	**84,55**	**84,15**	**89,75**	**97,11**	**87,60**	**62,55**	**90,52**	**153,52**	**147,55**	**162,74**	**116,07**
1	Crikvenica	96,69	84,65	83,21	88,33	96,91	88,44	58,26	86,12	157,37	152,44	161,23	113,96
2	Novi Vinodolski	96,47	80,62	77,09	85,22	93,08	84,83	63,88	93,00	149,16	146,69	156,07	109,86
3	Bribir	110,32	88,38	92,16	95,69	101,34	89,54	65,50	92,44	154,03	143,51	170,92	124,38

Na Slici 2.9 prikazane su srednje mjesečne količine oborina za područje sjeverne Istre, doline Rječine i Vinodolske doline u razdoblju od 1961. do 2014. godine. Podaci o srednjim mjesečnim oborinama potvrđuju prethodnu konstataciju da je na području istraživanja studeni najkišovitiji, a srpanj najsušniji mjesec u godini.



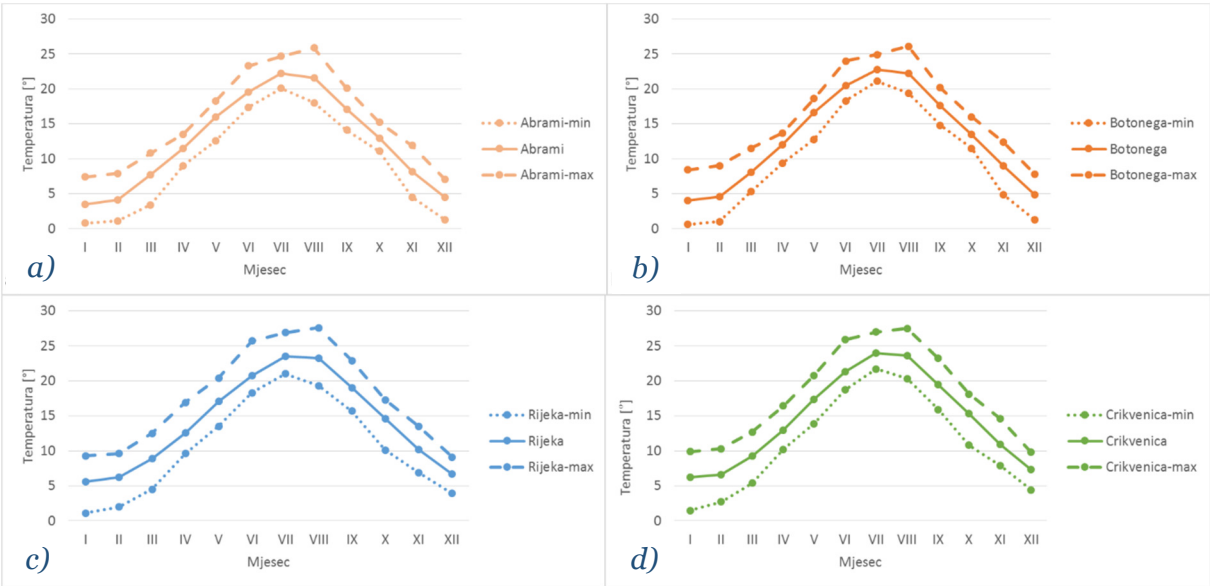
Slika 2.9 *Srednje mjesečne količine oborina na području istraživanja za razdoblje od 1961. do 2014. godine (prema podacima DHMZ-a)*

Podaci o temperaturama zraka na području istraživanja za razdoblje od 1961. do 2014. godine dobiveni su od Državnog hiderometorološkog zavoda, DHMZ-a i to za dvije mjerne postaje, Abrami i Botonega, mjerodavne na području srednje i sjeveroistočne Istre, mjernu postaju Kozala mjerodavnu za područje doline Rječine i mjernu postaju Crikvenica mjerodavnu za područje Vinodolske doline. Srednja i sjeverna Istra ima srednju godišnju temperaturu zraka blizu 13 °C dok je na području sjevernog primorja srednja godišnja temperatura zraka viša, i kreće se od 14°C za područje doline Rječine do 14,5 °C za područje Vinodolske doline (Tablica 2.3).

Tablica 2.3 *Popis mjernih stanica sa srednjim godišnjim temperaturama (eng. Mean Annual Temperature, MAT) prema podacima DHMZ-a*

Mjerna stanica		MAT [°]	Mjerno razdoblje [god]	
			od – do [god]	ukupno trajanje [god]
Sjeverna Istra		12,7		
1	Abrami	12,41	1981. - 2014.	34
2	Botonega	12,98	1987. - 2014.	27
Dolina Rječine		14.03		
1	Kozala	14,03	1961. - 2014.	54
Vinodolska dolina		14.53		
1	Crikvenica	14,53	1961. - 2014.	54

Godišnji hod temperature zraka ima oblik jednostrukog vala s maksimumom ljeti, u mjesecu kolovozu te minimumom zimi, u mjesecu siječnju (Slika 2.10).



Slika 2.10 *Godišnji hod minimalne, srednje i maksimalne temperature s mjernih postaja: a) Abrami i b) Botonega na području sjeverne i sjeveroistočne Istre, c) Kozala na području doline Rječine i d) Crikvenica na području Vinodolske doline, za mjerno razdoblje do 2014. godine (prema podacima DHMZ-a)*

2.3. HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

Područje istraživanja izgrađeno je od karbonatnih i klastičnih naslaga različitih hidrogeoloških značajki, odnosno imaju veću ili manju vodopropusnost ili nepropusnost, pa uvjetuju, tektonskim pokretima stvorene, podzemne ili viseće barijere i za površinske i za podzemne vodene tokove. Na području istraživanja razlikuju se dva kompleksa različita po kretanju površinske i podzemne vode: vodopropusne karbonatne stijene i vodonepropusne klastične naslage fliša.

Vodopropusnost karbonatnih stijena je različita, a prema (Benac 1994) razlikuju se: dobro vodopropusni pločasti do dobro uslojeni, gromadasti te brečasti i fosiliferni vapnenci jurske, kredne i eocenske starosti; srednje vodopropusni dolomiti i vapnenci u izmjeni te vapnenci s lećama dolomita pretežito kredne starosti; i slabo vodopropusne dolomitične breče kredne starosti i vapnenačke breče paleogenske starosti. Propusnost karbonatnih stijena također ovisi o stupnju njihove raspucanosti i okršenosti. Za kredne vapnence specifična je pukotinsko-kavernozna poroznost. Karakterizira ih vrlo velika apsorpcija površinske vode s niskim koeficijentom otjecanja. Karbonatne stijene predstavljaju kolektor podzemnih voda u kojem je vrlo složena dinamika vode, a koja se događa duboko u krškom podzemlju (Benac 1994). U područjima u čijem sastavu prevladavaju karbonatne stijene, rijeke su uz pomoć vodom nošenoga materijala usjekle duboke i strme kanjone (Dugonjić Jovančević 2013).

Klastične naslage mogu biti pretežno nepropusne ili nepropusne (flišne naslage) te slabo propusne do nepropusne s međuzrnskom poroznosti (kršje, šljunak, pijesak, pjeskovite gline i gline kvartarne starosti). Karakteristike područja gdje prevladavaju sitnozrnasti litološki članovi flišne stijenske mase su niska do izrazito niska vodopropusnost i visoki koeficijent otjecanja pa se na takvim terenima javlja hidrografska mreža povremenih tekućica, koji se aktiviraju u razdobljima povećanih oborina i imaju erozijsko djelovanje (Dugonjić Jovančević 2013). U kišnim razdobljima, na padinama prekrivenima glinovito-prahovitim padinskim naslagama i korom trošenja flišnih naslaga djelomično se pojavljuje površinsko tečenje, a dio vode se procjeđuje po samom kontaktu površinskih naslaga i fliša. Posljedično dolazi i do djelomične saturacije površinskih naslaga i povećanih pritisaka uslijed tečenja

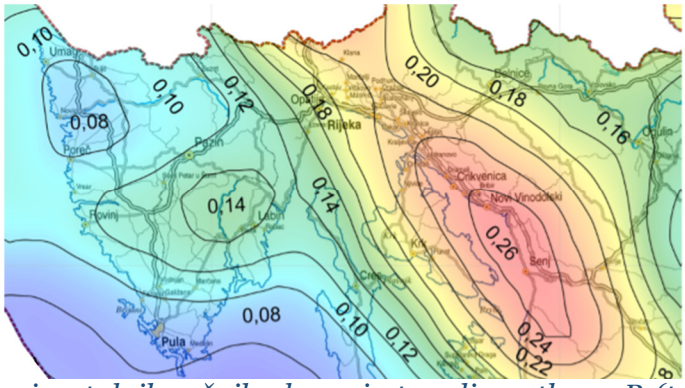
podzemne vode, što rezultira postupnom degradacijom naslaga u vidu trošenja te postupnim snižavanjem parametara čvrstoće materijala. Trošenje zahvaća površinsku zonu naslaga fliša na kontaktu s padinskim naslagama, gdje višestruko i dugotrajno vlaženje kontakta najprije dovodi do zona oslabljenja materijala, a u konačnici i do nastanka plohe sloma kada naprezanja dosegnu vrijednosti rezidualne čvrstoće materijala.

2.4. SEIZMIČKE ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

Poluotok Istra spada u područja smanjene seizmičke aktivnosti dok je područje Rijeke i Vinodola seizmički aktivno (Herak et al. 2011). Seizmotektonska aktivnost je povećana u zoni prosječne širine 30 km koja se proteže od Ilirske Bistrice i Klane preko Rijeke i Vinodola. Osnovna značajka seizmičnosti ovog područja jest pojava većeg broja relativno slabijih potresa u seizmički aktivnim razdobljima. Žarišta potresa nalaze se relativno plitko, na dubinama od svega dva do 30 km te su zato potresi lokalni i obično ne zahvaćaju šire područje. Epicentralna područja su u Klani, samoj Rijeci, istočno od Omišlja i između Bribira i Grižana u Vinodolskoj dolini. Najjači potres na području istraživanja dogodio se 1916. godine u zoni Bribir-Grižane, magnitude M = 5,8 i intenziteta 7-8° MCS s dubinom žarišta na 18 km. Istraživanja pokazuju da je uzrok seizmičke aktivnosti regionalno izraženo podvlačenje Jadranske ploče pod Dinaride u dubini, a bliže površini strukturno-geološke promjene u obliku navlačenja. To se odražava na površini pojačanim neotektonskim pokretima. Lokalna posljedica tih zbivanja su pomaci blokova po paraklazama recentno aktivnih rasjeda (Benac 1994).

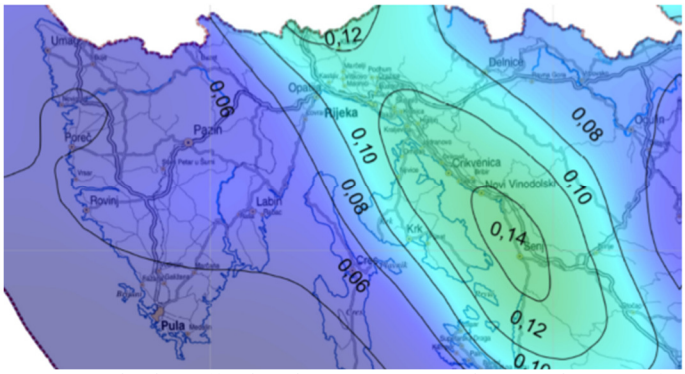
Herak et al. (2011) izradili su kartu potresnih područja Republike Hrvatske izrađenu u približnom mjerilu 1:800.000. Vrijednosti prikazane na karti u vidu izolinija odgovaraju horizontalnim vršnim ubrzanjima tla tipa A (a_{gR}) koja se u prosjeku javljaju tijekom povratnog razdoblja od T_{NCR}= 95 i 475 godina. Tlo tipa A se odnosi na osnovnu stijenu prema klasifikaciji u Eurocode-u 8. Ubrzanja su izražena u jedinicama gravitacijskog ubrzanja g (1g=9,81 m/s^2). Iznosi horizontalnih vršnih ubrzanja na karti prikazani su izolinijama s rezolucijom 0,02 g. Numerički navedene vrijednosti odnose se na prostor između dvije susjedne izolinije. Povratna razdoblja koriste se za procjenu ukupnog broja potresa koji se mogu očekivati tijekom nekog duljeg razdoblja.

Karta horizontalnih vršnih ubrzanja temeljnog tla a_{gR} (za temeljno tlo tipa A), s vjerojatnosti premašaja 10% u 50 godina za povratno razdoblje T_{NCR}=475 godina za područje istraživanja prikazana je na Slici 1.11. Vrijednost a_{gR} kreće se od 0,10g do 0,12g za područje Istre, 0,22g za dolinu Rječine i 0,22g do 0,24g za Vinodolsku dolinu.



Slika 2.11 *Karta horizontalnih vršnih ubrzanja temeljnog tla, agR (temeljno tlo tipa A) s vjerojatnosti premašaja 10 % u 50 godina za poredbeno povratno razdoblje TNCR=475 god. (Herak et al. 2011)*

Karta horizontalnih vršnih ubrzanja temeljnog tla a_{gR} (za temeljno tlo tipa A), s vjerojatnosti premašaja 10% u 10 godina za povratno razdoblje T_{NCR}=95 godina za promatrano područje prikazana je na Slici 2.12. Vrijednost a_{gR} iznosi 0,06g za područje Istre, kreće se od 0,10g do 0,12g za dolinu Rječine i 0,12g za Vinodolsku dolinu.



Slika 2.11 *Karta horizontalnih vršnih ubrzanja temeljnog tla, a_{gR} (temeljno tlo tipa A) s vjerojatnosti premašaja 10 % u 10 godina za poredbeno povratno razdoblje T_{NCR}=95 god (Herak et al. 2011)*

Prilikom izrade numeričkih simulacija reaktivacije umirenih klizišta u Istri i dolini Rječine potresno opterećenje nije uzeto u obzir. Rekativacije klizišta analizirane su samo za podizanje razine podzemne vode kao jedini okidač klizišta budući da su sva dosadašnja klizišta na području istraživanja bila pokrenuta uslijed velikih količina oborina.

3. OPĆENITO O FLIŠU I PROCESIMA TROŠENJA U FLIŠU

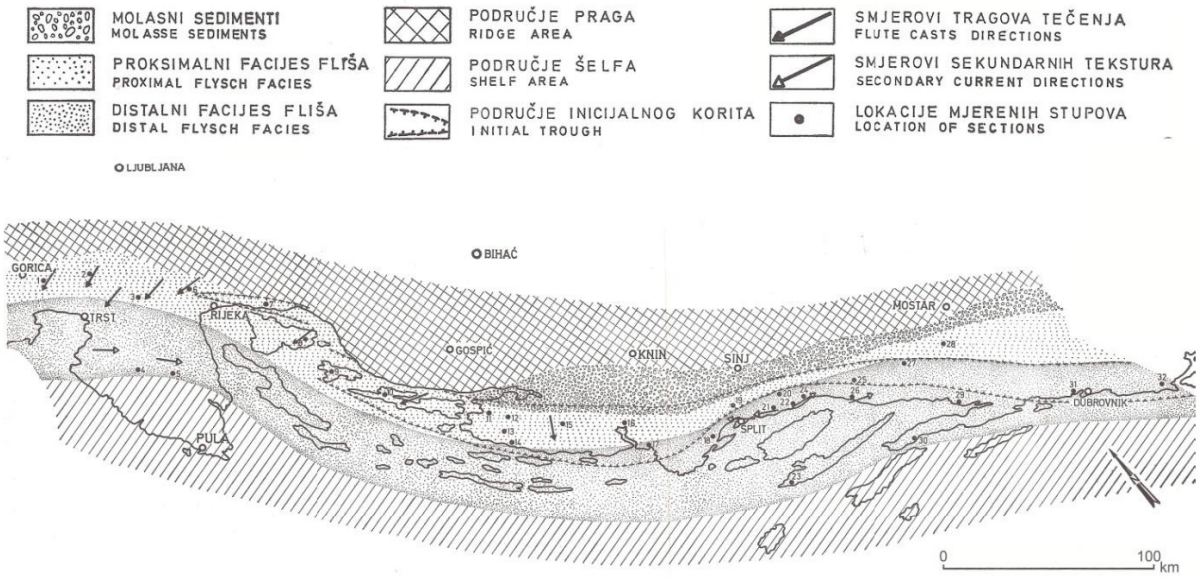
Flišna stijenska masa se sastoji od nekomepetentnih litoloških članova podložnih mehaničkom i kemijskom trošenju i kompetentnih litloških članova otpornijih na trošenje (Mihljević & Prelogović 1992). Trošenjem se značajno degradiraju fizičko mehaničke značajke nekompetentnih sitnozrnastih litloških članova fliša zbog čega postaju podložni procesima erozije i pokreta masa. U ovom poglavlju opisan je fliš i meke stijene kojima fliš pripada kroz osnovne definicije i značajke te pregled dosadašnjih istraživanja. Također je dan i opis procesa trošenja i njegova podjela i utjecaj na flišnu stijensku masu, te definicije i oblici procesa erozije i pokreta masa u flišnoj stijenskoj masi na području istraživanja.

3.1. FLIŠ

Fliš (eng. *flysch*) je opisni termin za kompleks litološki heterogenih klastičnih sedimentnih stijena nastalih turbiditnim tokovima, odnosno podmorskim klizanjima sedimenata. Ti sedimenti su prethodno nastali kao posljedica brze erozije okolnog uzdignutog gorja. Za flišni kompleks karakteristična je sukcesivna izmjena klastičnih sedimentnih stijena kao što su šejl, siltit i lapor i pješčenjak. Fliš može sadržavati i breče, konglomerate i vapnence (Benac 2016). Termin fliš uveo je švicarski geolog Bernhard Studer (1827) i dolazi od njemačke riječi "*fliessen*" što znači teći, vjerojatno označavajući učestala klizanja tla u području navedenih geoloških formacija. Fliš se također može definirati kao sinorogeni sediment kontroliran tektonskim pokretima nastao gravitacijskim tečenjem i taloženjem hidroplastične terigene suspenzije. Rezultat tog taloženja u idealnim uvjetima predstavlja Bouma sekvencija nastala taloženjem iz jedne turbiditne struje (Tišljar 2004).

Prema Marinčiću (1981) jadranski flišni bazen je dio velikog flišnog bazena koji se prostire od Gorice u Italiji sve do Albanije; na sjeveroistoku do linije Trnovski Gvozd-dolina Rječine-Vinodolska dolina-sjeveroistočne obale otoka Krka, Raba i Paga, zatim Bukovica-Dabrarsko Polje u Hercegovini, a prema jugozapadu do središnje Istre i na većinu jadranskih otoka (Slika 3.1). Taj veliki sedimentacijski sistem nastao je tijekom pirinejske orogenetske faze na kraju paleogenskog razdoblja. Tektonski pokreti iz tog geološkog razdoblja, zajedno s onim naknadnim, uzrokovali su oblikovanje boranih i

rasjednih struktura pružanja SZ-JI. Promjenom smjera kretanja Jadranske tektonske mikroploče prema sjeveru promijenjen je smjer regionalnog naprezanja od SI-JZ prema S-J. Konačni oblik geoloških struktura postignut je tektonskom reaktivacijom, uz desne pomake uzduž reversnih rasjeda od gornjeg pliocena do danas (Korbar 2009). Posljedica tih tektonskih pokreta bila je mjestimično jako suženje dijelova flišnog sedimentacijskog bazena u jadranskom pojasu i reducirano pojavljivanje tih stijena na površini terena (Velić & Vlahović 2009).

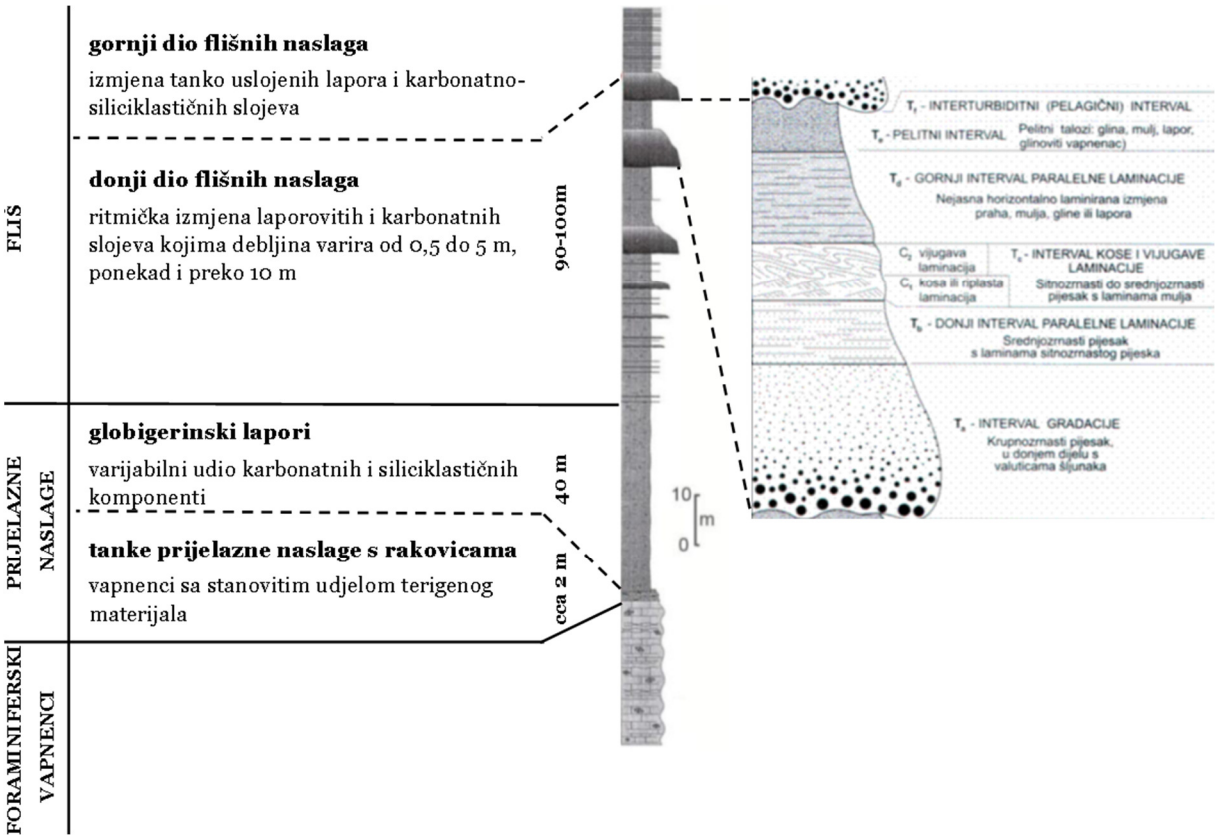


Slika 3.1 *Rasprostranjenost flišnih facijesa (Marinčić 1981)*

Sedimenti flišne serije izgrađuju velika područja u sjevernom djelu Istarskog poluotoka pod nazivom „Siva Istra“. U literaturi to područje poznato je pod nazivom Pazinski paleogenski bazen (Polšak & Šikić 1973), na sjeveru i istoku omeđen planinskim masivima Ćićarije i Učke, na zapadu i jugozapadu seže do linije ušća Dragonje – Buje – Pazin – Čepićko polje, a na sjeverozapadu bazen se proteže do Trsta, odnosno tone u more. Na širem području Rijeke sediment flišne serije nalazi se u uskom pojasu koji se pruža od Ilirske Bistrice do Bakarskog zaljeva i nastavlja se jugoistočno u Vinodolsku dolinu (Marinčić 1981).

Područje središnje Istre izgrađuju vrlo nepostojane i erodibilne naslage globigerinskih lapora i fliša. Stratigrafski odnos i ukupnu debljinu laporovitih i flišnih naslaga središnje Istre prikazuje geološki stup na Slici 3.2. Bazu flišnom kompleksu čine

foraminiferski vapnenci i tanke prijelazne naslage s rakovicama i globigerinski lapori. Fliš središnje Istre ima ukupnu debljinu od 90 do 100 m te se može podijeliti na donji i gornji dio. Ritmička izmjena laporovitih i karbonatnih slojeva kojima debljina varira od 0,5 do 5 m, ponekad i preko 10 m, karakterizira donji dio flišnog kompleksa. Karbonatni slojevi se sastoje od foraminiferskih breča, konglomerata, arenita i siltita. Česti su i karbonatni megaslojevi debljine i do 40 metara. Gornji dio flišnog kompleksa sastoji se od tanko uslojenih lapora i karbonatno-siliciklastičnih turbiditnih slojeva koji predstavljaju samo gornje dijelove Bouma sekvencije s intervalima Tb-e, Tc-e i Td-e (Bergant et al. 2003).



Slika 3.2 *Shematski geološki stup profila Kotli u središnjoj Istri (prema Bergant et al. 2003; Tišljar 2004)*

Veći dio flišnog kompleksa u Istri nije tektonski znatnije poremećen te je položaj slojeva horizontalan do subhorizontalan. Na takvim naslagama izražena je diferencijalna erozija. Od rezistentnijih članova formirana su uzvišenja na kojima su izgrađeni mnogi istarski gradovi (npr., Hum, Buzet, Motovun, Boljun i dr.). Riječne doline uglavnom su prekrivene korom raspadanja fliša koja je vodotocima tu i naplavljena (Arbanas 1982).

Ukupna debljina naslaga fliša je često vrlo velika (od stotinu do nekoliko tisuća metara) premda može biti značajno reducirana erozijom ili rasjedanjem. U geotehničkom smislu, flišna stijenska masa ima sljedeće karakteristike (Marinos & Hoek 2001):

- heterogenost, alteracija kompetentnih i nekompetentnih članova;
- prisutnost minerala glina;
- tektonski zamor i smičući diskontinuiteti;
- niska vodopropusnost zbog prisutnosti minerala glina gdje slobodno dreniranje nije moguće.

3.1.1. Sitnozrnaste (pelitne) klastične sedimentne stijene

Sitnozrnaste klastične sedimentne stijene (eng. *argillaceous sedimentary rocks*) sastoje se pretežno (> 50 %) od zrnaca i čestica dimenzija praha i gline (< 0,063 mm). Podjela pelitnih sedimenata zasniva se na međusobnim odnosima sadržaja praha i gline, stupnju litifikacije te unutarnjim teksturno-strukturnim značajkama, kao što je prikazano Tablicom 3.1 (Tišljar 2004).

Tablica 3.1 *Sitnozrnasti klastični sedimenti (peliti) (Tišljar 2004)*

		udio gline (d<0,004 mm) 0	1/3	2/3	100%
Nevezano		**Prah** (eng. *silt, alevrit)*	**Mulj** (eng. *mud*)	**Glina** (eng. *clay*)	
Vezano	homogeno	**Prahovnjak (siltit)** (eng. *siltstone*)	**Muljnjak** (eng. *mudstone*)*	**Glinjak** (eng. *claystone*)	
	lisnato	**Lisnati prahovnjak** (eng. *silty shale*)	**Lisnati muljnjak** (eng. *mud shale*)*	**Lisnati glinjak** (eng. *clay shale*)*	
		100% udio praha (d<0,063 mm)	2/3	1/3	0
granica dijageneza-metageneza					
		kvarcni agilit (kvarcni slejt) (eng. *quartz slate*)	argilit (slejt) (eng. *slate*)		
* - Strani termini usvojeni u našoj terminologiji U pelitske stijene se još ubrajaju: - Les ili prapor, - Lapor					

Siltit ili prahovnjak kao vezana pelitna stijena, i *silt ili prah* kao nevezani pelitni sediment, pretežno se sastoji (više od 2/3) od zrnaca dimenzija praha ili silta, tj. od zrnaca promjera od 0,004 do 0,063 mm. Prevladavajući detritični sastojak siltita su uglata zrnca kvarca, a značajni su sastojak sitna zrnca feldspata i listići tinjca te do 33% učešća minerala gline. Neke inačice siltita sadrže i znatnu količinu karbonata, uglavnom kalcitnog cementa ili sitnozrnastog karbonatnog detritusa, pa se takva stijena naziva kalcitični prahovnjak ili kalcitični siltit. Siltiti su u pravilu masivne, debelouslojene, čvrsto litificirane, homogene, rjeđe i horizontalno ili koso laminirane stijene (Tišljar 2004).

Glina kao nevezana i *glinjak* kao vezana stijena sastoje se više od 2/3 glinovite komponente. Gline i glinjaci, obično, kao glavni sastojak sadrže jednu od sljedećih skupina minerala - illitnu, smektitnu ili montmorilonitnu i kaolinitnu skupinu, te manji ili veći udio klorita, a ponegdje i glaukaonita (Tišljar 2004).

Šejlovi su tankolaminirane ili lisnate sitnozrnaste pelitno-klastične stijene pretežito sastavljene od siliciklastičnog materijala koji je po granulometrijskom sastavu smjesa čestica dimenzija glina i zrnaca dimenzija praha ili silta

Mulj kao nevezani talog ili *muljnjak* kao vezana stijena sadrži između 1/3 i 2/3 prahovite i glinovite komponente. Muljnjak je čvrsto litificirana stijena koja je homogena smjesa, za razliku od šejlova koji se odlikuju tankom laminacijom i lisnatošću (Tišljar 2004).

Les ili *prapor* je homogeni, neslojeviti, slabo litificirani, dobro sortirani i izrazito porozni pelitno-klastični sediment koji se po granulometrijskom sastavu odlikuje visokim sadržajem zrna srednjeg ili krupnog praha ili silta, tj. zrncima promjera pretežito od 0,015 do 0,05 mm. Osim tih zrnaca les obično sadrži i zrnca dimenzija sitnog praha i od 10 do 20% čestica dimenzija gline, a ponegdje i mali udio zrna dimenzija sitnog i srednjeg pijeska (Tišljar 2004).

Lapori su miješane karbonatno-glinovite stijene sastavljene od varijabilnih udjela kriptokristalastog i mikrokristalastog kalcita i od sitnozrnastog detritusa pelitnih dimenzija, prije svega gline. Dio kalcita može biti kemogenog porijekla, tj. nastati

izlučivanjem iz morske ili jezerske vode, a dio može biti najsitniji karbonatni detritus. Laporom se obično smatra stijena koja sadrži između 20-80% gline i 80-20% kalcita. 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 su homogene, mekane i nepotpuno litificirane stijene. Stupanj litifikacije raste s porastom udjela kalcita i detritusa dimenzija silta. Dugotrajno vlaženi vodom raspadaju se u glinovito-kalcitičnu slabo plastičnu masu tla (Tišljar 2004).

3.2. MEKE STIJENE

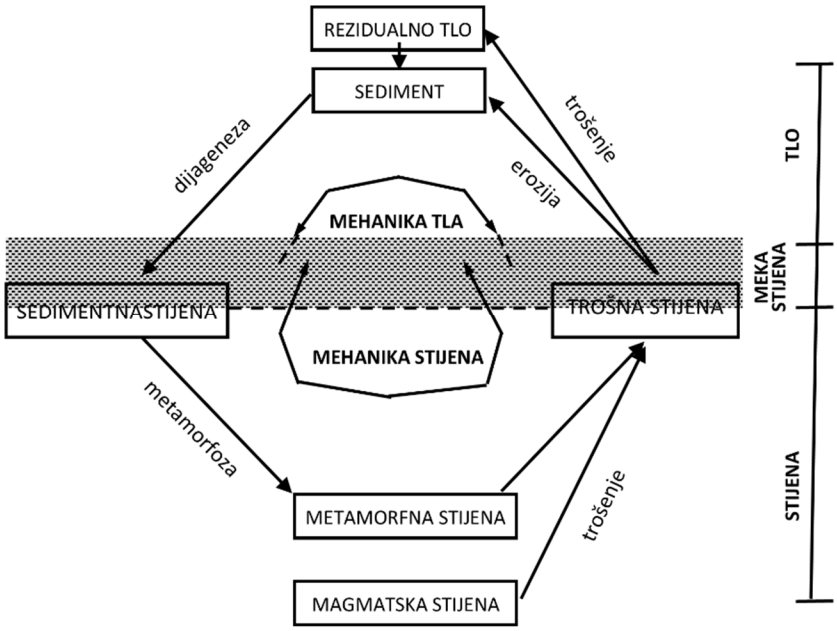
Flišna stijena spada u meke stijene koje prema Kanjiju (2014) predstavljaju vrlo složen geološki materijal budući da često iskazuju nepoželjno ponašanje i značajke poput niske čvrstoće, raspadanja, usitnjavanja, plastičnog ponašanja, kalavosti i brzog trošenja tijekom izloženosti atmosferilijima ili vodi. Pojedine vrste stijena imaju prirodno nisku čvrstoću dok se nekima čvrstoća smanjuje zbog procesa trošenja. Pregled različitih mekih stijena prikazan je Tablicom 3.2.

Tablica 3.2 *Vrste mekih stijena (Kanji 2014)*

Vrsta	Podvrste
Sedimentne stijene	Klastične stijene: muljnjaci, šejlovi, siltiti, pješčenjaci, konglomerati i breče, lapori; Evaporitne stijene: slane stijene, karnalit; Topive stijene: vapnenci, dolomiti i gips; i ugljen
Magmatske stijene	Vulkanski konglomerati, breče i lahar; bazaltna breča; piroklastične naslage, vulkanski pepeo, tuf i ignimbrit; i produkti trošenja kristalinskih stijena
Metamorfne stijene	Glineni škriljavac, filit, škriljavac, cementirani kvarcit, vulkanske naslage

Terminologija prema (Benac 2016)

Meke stijene nalaze se u području prijelaza iz tla u stijene. Stijene, meke stijene i tlo su međusobno povezani geološkim procesima cementacije i trošenja, a granice među njima su promjenjive (Nickmann et al. 2006). Zemljina kora je izložena fizičkim i kemijskim procesima koji kontinuirano pretvaraju stijene u tlo i obrnuto (Dobereiner & Freitas 1986), kao što je prikazano na Slici 3.3.

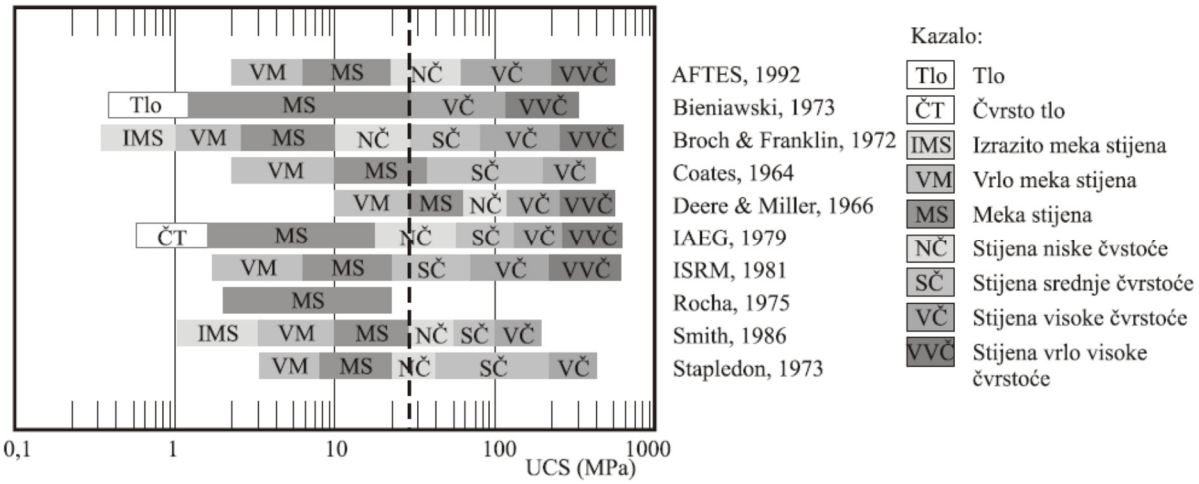


Slika 3.3 *Shematski prikaz procesa transformacije unutar geoloških materijala (prema Dobereiner & Freitas 1986)*

Čvrstoća mekih stijena je na granici uobičajenih vrijednosti karakterističnih za tla i stijene. U pojedinim slučajevima su premale čvrstoće za upotrebu laboratorijske opreme koja se koristi za stijene, a ponekad prečvrste za opremu koja se koristi za ispitivanje značajki tla (Johnston & Novello 1994). Uzorkovanje mekih stijena za potrebe ispitivanja je vrlo zahtjevno. Upotreba građevinske mehanizacije i prijenosnih pila na terenu omogućuje dobivanje neporemećenog – intaktnog uzorka iz mekih stijena, ali na malim dubinama (površinsko uzorkovanje ili u istražnim jamama) uz veliki utrošak vremena i energije. S druge strane istraživačkim bušenjem je vrlo teško, a često i nemoguće dobiti neporemećeni uzorak iz meke stijene. Bez obzira na pridjev „meka“, meke stijene su ipak dovoljne čvrstoće da je nužno bušenje s upotrebom vode za isplaku. Budući da bušenje rotirajućim dijamantnim krunama iziskuje vodeno hlađenje, s upotrebom vode dolazi do ispiranja jezgre kroz isplaku i do prvih učinaka trošenja jezgre te nije moguće dobiti neporemećeni uzorak (Vlastelica 2015).

Pojedine nacionalne norme (norma DIN 4022 T1 ili ASTM norma D 4644 za ispitivanjem trajnosti stijene) svrstavaju meke stijene u grupu stijena. Međutim, za razliku od tvrdih stijena, meke stijene se raspadaju u kratkom vremenskom razdoblju (od nekoliko dana do nekoliko godina) kada su izložene utjecaju vode i atmosferilija. Takav gubitak čvrstoće mekih stijena je u normalnim uvjetima nepovratan (Nickmann et al. 2006).

Brojni autori (Clerici 1992; Johnston 1993; Klein 2001) klasificirali su intaktnu meku stijenu prema jednoosnoj tlačnoj čvrstoći, UCS (eng. *Unconfined Compressive Strength*) u različitim ljestvicama i terminima (Slika 3.4). Prema Clerici (1992) meke stijene pripadaju stijenama kada UCS iznosi manje od 20 MPa ili statički modul elastičnosti ima vrijednost između 15 i 2000 MPa. Johnston (1993) u izvješću Tehničkog odbora ISSMFE (*International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*) predlaže svrstavanje mekih stijena u stijene kada UCS iznosi između 0,5 i 25 MPa. Meka stijena prema ISRM-u (1981) s vrijednosti UCS između 0,25 i 25 MPa pripada izrazito mekim do mekim stijenom u tunelskom projektiranju (Klein 2001). Kada se usporede najčešće korištene klasifikacije stijena prema jednoosnoj tlačnoj čvrstoći, kod većine gornja granica od 25 MPa udovoljava predloženom kriteriju. Hoek (1999) opisuje stijenu mekom kada je UCS manji od približno jedne trećine *in situ* naprezanja koji djeluju na iskopanu stijensku masu. S druge strane, donju granicu između meke stijene i tla je teško utvrditi. Terzaghi & Peck (1967) predložili su SPT=50 i UCS=0,4 MPa kao granice za materijale koji se ponašaju bliže stijenama nego tlima. Dobereiner (1984) je predložio UCS=0,5 MPa kao donju granicu jednoosne tlačne čvrstoće meke stijene. Rocha (1975) razlikuje tlo i stijenu na temelju rezultata pokusa uranjanjem uzorka u vodu: ukoliko se uzorak u potpunosti ne raspadne s jednim uranjanjem, određuje ga kao meku stijenu. Baud & Gambin (2011) preložili su kriterij zasnovan na vrijednosti graničnog pritiska između 2 i 10 MPa dobivenog ispitivanjem presiometrom.



Slika 3.4 *Klasifikacija stijena prema jednoosnoj tlačnoj čvrstoći, UCS (modificirano prema Galván 1999)*

3.3. PROCESI TROŠENJA I DENUDACIJE U FLIŠU

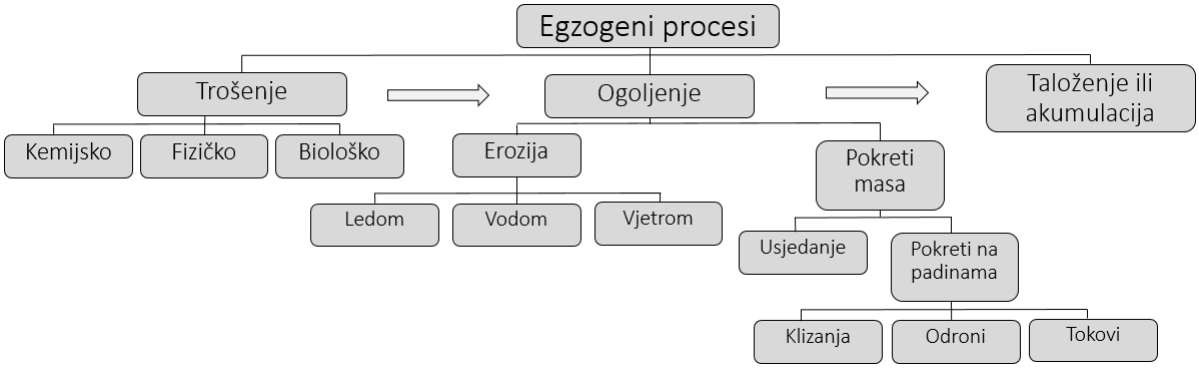
Trošenje (eng. *weathering*) je proces promjene i usitnjenja stijene ili tla na ili blizu Zemljine površine fizičkim, kemijskim ili biološkim procesima djelujući na boju, teksturu, sastav, čvrstoću i oblik. Trošenje je *in situ* proces prilikom kojega se ne odvija nikakav transport (Selby 1993; Geological Society of London 1995).

Fizičko trošenje stijena podrazumijeva njihovo razaranje u manje komadiće pri čemu ne dolazi do promjene kemijskog i mineralnog sastava. Dakle, stijenski materijal se usitnjava kao rezultat sila unutar stijenske mase. Proces raspadanja dovodi do stvaranja rezidualnog materijala koji se sastoji od minerala i dijelova stijene nepromijenjenih u odnosu na originalnu stijenu (Gulam 2012).

Kemijsko trošenje uključuje sve procese koji dovode do kemijskih i/ili mineralnih promjena na ili ispod površine Zemlje. Pri kemijskom trošenju dio primarnih minerala zbog slabe otpornosti na trošenje nestaje, izlužuje se ili se pretvara u nove minerale koji su stabilni u uvjetima trošenja (Tišljar 2004).

Biološko trošenje može uzrokovati i fizičke i kemijske promjene pod utjecajem organskih procesa (Pope et al. 1995) pa se u literaturi često svrstava kao podgrupa fizičkog i/ili kemijskog trošenja. Na primjer, djelovanje organizama je dvojako: fizičko razaranje stijena uzrokovano je rastom korijenja drveća, dok je kemijsko trošenje uzrokovano djelovanjem organskih kiselina iz korijenja drveća.

Trošenje je egzogeni proces, uz denudaciju i taloženje ili akumulaciju (Gulam 2012), kao što je prikazano na Slici 3.5. Denudacija uključuje eroziju, ali i sve ostale pokrete masa, kao što su klizanja, odroni i dr. Pojmovi trošenja i erozije se često zamjenjuju, iako je razlika ovih procesa jasno definirana. Trošenje je proces raspadanja stijene, dok je erozija proces odnošenja usitnjenih komada stijene, s mjesta gdje su nastali na mjesto gdje se nakupljaju (prema Gulam 2012). Naravno, trošenje i erozija se mogu odvijati i istovremeno. Za nastanak klizišta na flišnim padinama važni su egzogeni procesi.



Slika 3.5 *Dijagram sistematizacije egzogenih procesa (Gulam 2012)*

Proces trošenja se događa kroz geološku povijest i, uz eroziju, oblikuje Zemljin reljef. Na proces trošenja utječu fizičke značajke stijena poput veličine zrna, tvrdoće, vodopropusnosti, stupnja cementacije kao i mineralni sastav. Stijene flišnog kompleksa su podložne mehaničkom i kemijskom trošenju. Flišna stijenska masa može imati značajno različite fizičko mehaničke značajke ovisno o litologiji i stupnju trošenja. Sitnozrnaste stijene su, kao nekompetentni članovi flišnog stijenskog kompleksa, izrazito podložne trošenju djelovanjem atmosferilija te značajno mijenjaju fizičko mehaničke značajke u relativno kratkom vremenskom intervalu trošenja. Međutim, pješčenjaci, vapnenci i konglomerati su, kao litološki kompetentni članovi fliša, značajno otporniji na utjecaje egzodinamičkih sila (Benac 1994).

U ovom istraživanju promatraju se nekompetentni, sitnozrnasti litološki članovi flišne stijenske mase značajno osjetljivi na trošenje. Sitnozrnasti litološki članovi fliša su materijali koji su u inženjerskom vremenu izrazito nepostojani, tj. brzo se troše. Stoga je važno definirati postojanost (eng. *durability*) kao pojam vezan uz proces trošenja u inženjerskom vremenu. Postojanost se definira kao sposobnost stijene da se odupre raspadanju u određenom vremenskom periodu, a osim o značajkama materijala ovisi o sljedećim vanjskim parametrima: zatečeno stanje trošnosti stijene, iznos naprezanja tijekom izvođenja radova u stijeni, klima te topografske i hidrološke značajke okoline (Fookes et al. 1988).

Proces trošenja flišne stijenske mase značajno utječe na dva glavna procesa na padinama izgrađenim od flišne stijenske mase, na proces erozije i pojavu klizišta. Na taj način mogu nastati potencijalno nestabilne naslage.

Procesi trošenja i erozije su u pravilu jako spori, no u nekim geološkim sredinama i situacijama proces trošenja je vrlo brz te kao takav može izazvati velike probleme u inženjerskom smislu. Kod mekih stijena proces trošenja se odvija u vrlo kratkom vremenskom razdoblju te se može govoriti o postojanosti gradiva unutar inženjerske vremenske skale (Miščević 2004). Slika 3.6 prikazuje značajno raspadanje flišne stijenske mase koja je bila izložena utjecaju atmosferilija tijekom sedam godina. Postepenim trošenjem se svježa flišna stijenska masa pretvorila u rezidualno tlo i promijenila svoje mineraloške i mehaničke značajke.

Slika 3.6 *Pogled na promjene uslijed trošenja flišne stijenske mase unutar kliznog tijela i na bočnom ožiljku u: a) kolovozu 2005. godine, b) siječnju 2013. godine*

3.3.1. Fizičko trošenje mekih stijena

Fizičko trošenje se u sitnozrnastim litološkim članovima fliša događa zajedničkim ili pojedinačnim djelovanjem sljedećih faktora koji uzrokuju razaranje stijenskog materijala u manje dijelove bez promjene mineralnog sastava (Selby 1993):

Promjena polja naprezanja. Potencijal bubrenja se dodatno povećava s rasterećenjem stijene. Ako se glinovito tlo u procesu dijageneze poveže vezivom pod djelovanjem visokih pritisaka, u stijenama ostaje „zarobljen“ visoki potencijal bubrenja u slučaju rasterećenja (Pinyol et al. 2007).

Insolacija uzrokuje razlaganje stijena kao rezultat širenja i skupljanja uzrokovanih temperaturnim promjenama. Dijelovi stijena izloženi insolaciji na površini terena se

šire više od dijelova stijene dublje ispod površine, zbog čega dolazi do razlika u naprezanjima, koje uzrokuje raspadanje stijenske mase. Relativno male temperaturne varijacije u kratkom vremenskom periodu mogu biti značajne u procesu raspadanja (Dixon 2006).

Rast ledenih kristala u pukotinama stijenske mase je jedan od glavnih procesa fizičkog trošenja u područjima utjecaja hladnih klimatskih uvjeta, gdje rast kristala leda uzrokuje nastanak polja naprezanja zbog promijene volumena, ali i migraciju nesmrznute vode prema rastućim ledenim lećama (Walder & Hallet 1986; Selby 1993).

Rast kristala soli u pukotinama stijena uzrokuje sile dovoljne velike da uzrokuju porast naprezanja i dezintegraciju stijenskog materijala. Proces fizičkog trošenja potaknut rastom kristala soli može biti uzrokovan isparavanjem vode što uzrokuje povećanje koncentracije soli, hlađenjem vode, hidratacijom zbog dodavanja vode u solna ležišta i zagrijavanjem soli.

Izmjena sušenja i vlaženja uzrokuje raspadanje ili kalanje sitnozrnastih stijena, odnosno stijena koje sadrže minerale gline. Polarne molekule vode adsorbiraju se na negativno nabijenu površinu minerala glina, a kod bubrećih minerala apsorbiraju se i u međuslojni prostor. To uzrokuje razdvajanje čestica stijenske mase, a daljnjim sušenjem stijene dolazi do smanjenja volumena. Ponovnim vlaženjem i sušenjem smanjuje se otpor stijene pucanju i naposljetku dolazi do raspadanja i oslabljivanja stijenske mase. Širenje i skupljanje minerala gline, poput montmorilonita, u stijenama bogatim glinom je osnovni proces trošenja koji može uzrokovati brzi gubitak čvrstoće i klizanje (Selby 1993).

Djelovanje organizama. Fizičko trošenje uzrokovano djelovanjem organizama se naziva biofizičko trošenje, a uzrokovano je rastom korijenja u pukotinama, aktivnostima lišajeva (Chen et al. 2000), algi i bakterija.

Fizičko trošenje uzrokovano je tektonikom i atmosferilijama od kojih je za sitnozrnaste litološke članove fliša najznačajniji proces sušenja i vlaženja, odnosno primarni uzrok degradacije flišne stijenske mase (Cardoso & Alonso 2009; Gulam 2012).

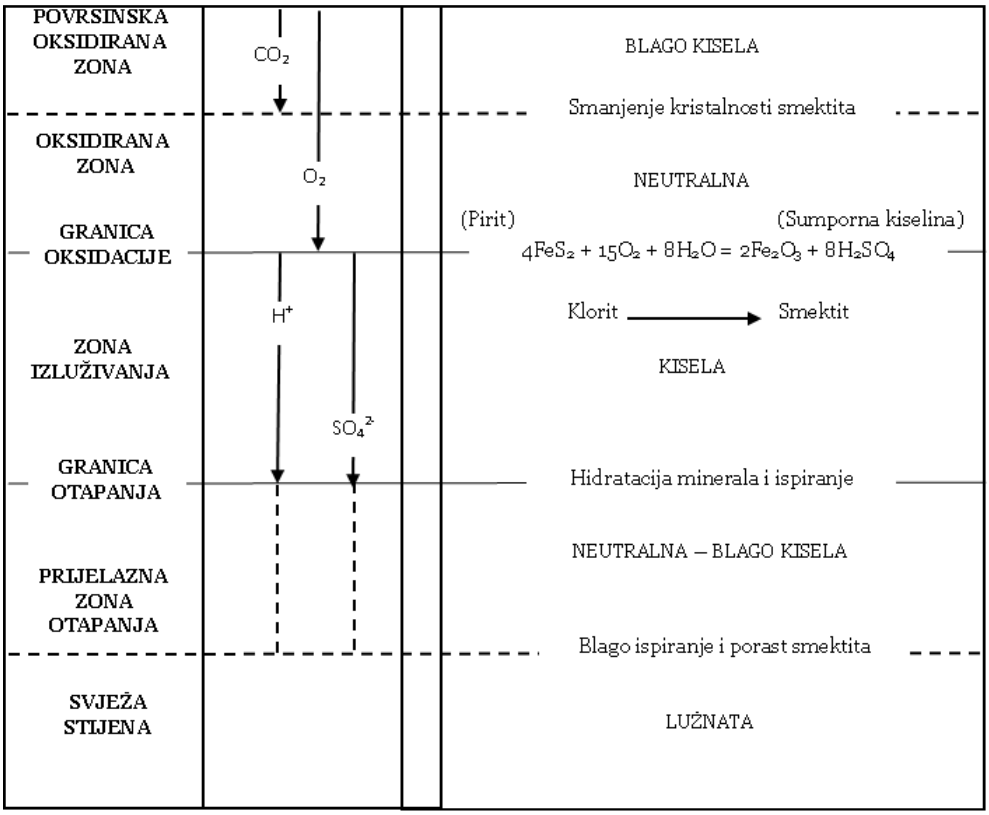
3.3.2. Kemijsko trošenje mekih stijena

Kemijsko trošenje je proces razbijanja stijenske mase uslijed kemijskih reakcija, odnosno uslijed djelovanja ugljične kiseline, vode i kisika na minerale u stijenskoj masi. Nužni preduvjeti kemijskog trošenja su povoljna temperatura i dovoljno oborina, te je stoga u suhoj klimi kemijsko trošenje neznatno. Kemijsko trošenje je intenzivnije u materijalima s razvijenim pukotinama i prslinama, odnosno gdje je prethodilo fizičko trošenje (Selby 1993).

Hidroliza uzrokuje kemijsko trošenje silikatnih i karbonatnih minerala i može se opisati kao proces primanja pozitivno nabijenih vodikovih iona i oslobađanja alkalijskih te zemljoalkalijskih elemenata i silicija. Proces tvorbe novih minerala ovisan je o kiselosti vode. Pri kemijskom trošenju primarnih minerala matične stijene u zoni trošenja procesima hidrolize i izluživanja kao i oksidacije, pod utjecajem vode mogu nastati potpuno novi autigeni minerali (Tišljar 2004).

Oksidacija je vrlo važan čimbenik kemijskog trošenja kojim se mijenjaju boja, poroznost, volumen i mineralni sastav stijene uz tvorbu autigenih minerala. Kisik je glavni uzročnik oksidacijskih procesa te je granica oksidacijske zone razina stagnirajuće podzemne vode koja u pravilu više ne sadrži slobodni kisik, odnosno nema oksidirajuće djelovanje (Tišljar 2004).

Chigira & Oyama (2000) su proučavali mehanizam i utjecaj kemijskog trošenja u sedimentnim stijenama u Japanu. U procesu kemijskog trošenja oksidacija pirita u oksidacijskoj zoni ima posebnu važnost, kao i transformacija klorita u smektit u zoni izluživanja. Na karakterističnom profilu trošenja izdvojili su tri zone: svježu stijenu (eng. *fresh rock*), zonu izluživanja (eng. *dissolved zone*) i oksidiranu zonu (eng. *oxidized zone*), kao što je prikazano na Slici 3.7. Kisik s površine terena doseže granicu oksidacije gdje pirit oksidira u sumpornu kiselinu. Sumporna kiselina propagira u dubinu i otapa stijenski materijal tvoreći tako zonu izluživanja gdje je čvrstoća stijene smanjena. Utvrđeno je da porast količine smektita na granici oksidacije te značajan pad čvrstoće u zoni izluživanja mogu dovesti do pojava nestabilnosti. To dokazuju česte pojave klizišta u zonama izgrađenim od muljnjaka čija se klizna ploha nalazi duž ili ispod granice oksidacije.



Slika 3.7 *Shema glavnih procesa trošenja u muljnjacima (prema Chigira 1990)*

Flišna stijenska masa podložna je i kemijskom trošenju, što značajno utječe na promjenu njenih fizičko mehaničkih svojstava. Najočitije je izluživanje $CaCO_3$ komponente i oksidacijski procesi te bubrenje. Kemijsko trošenje osobito je izraženo u sitnozrnastim litološkim članovima fliša, posebice varijetetima siltita. Postupnom razgradnjom svježe flišne stijenske mase nastaje zona trošnog fliša izgrađena od glinovito-prahovitog materijala koji se nakon trošenja ponaša kao inženjersko tlo, a ne kao ishodišna stijenska masa.

Mjestimične akumulacije erodiranih naslaga izrazito su nestabilne te je stoga trošni fliš podložan eroziji i klizanju (Arbanas et al. 1999). Proces vremenskog trošenja flišne stijenske mase vidljiv kroz profil po dubini te je moguće razlikovati različite stupnjeve trošnosti stijenske mase od svježe stijenske mase (FR) do rezidualnog tla (RS).

3.3.3. Stupnjevi trošnosti flišne stijenske mase

Na idealno razvijenom i sačuvanom profilu trošnosti u stijenskim masama istovrsne litologije, stupnjevi trošnosti se pojavljuju u kontinuiranom slijedu. Geološke strukture, osobito rasjedi, mogu utjecati na razvoj profila trošnosti, jer omogućavaju penetraciju različitih agenasa. Vargas (1953), Ruxton & Berry (1957), Knill & Jones (1965), Ward et al. (1968), Fookes & Horswill (1970), Neilson (1970), Lama & Vutukuri (1978), Sancio & Brown (1980), Geological Society of London (1995), Eberhardt et al. (2005) daju opise i klasifikaciju trošenja stijenske mase. Nekoliko međunarodnih društava je predložilo standardne klasifikacije koje se najviše koriste i imaju široku primjenu, poput Međunarodnog društva za mehaniku stijena (Brown 1981), Nacionalnog Instituta za norme u Velikoj Britaniji (BSI 1981) i Međunarodnog društva za inženjersku geologiju (IAEG 1981).

Najčešće korištena klasifikacija stupnjeva trošnosti stijenske mase (Brown 1981) prikazana je Tablicom 3.3 gdje je stijenska masa podijeljena na šest različitih stupnjeva trošnosti stijenske mase od svježe stijenske mase, FR (eng. *fresh*), slabo trošne stijene, SW (eng. *slightly weathered*), umjereno trošne stijene, MW (eng. *moderately weathered*), jako trošne stijene, HW (eng. *highly weathered*) i potpuno trošne stijene, CW (eng. *completely weathered*) do rezidualnog tla, RS (eng. *residual soil*).

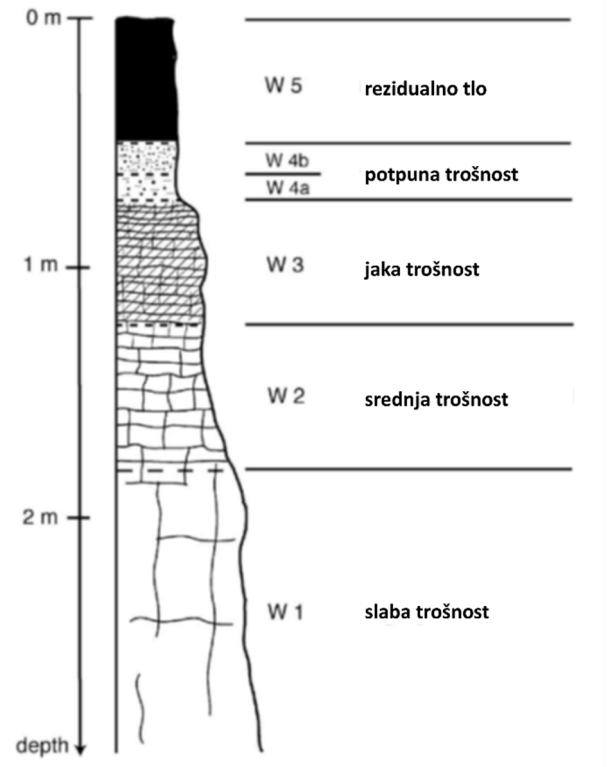
Na temelju stupnjevanja trošnosti, na profilu trošnosti je moguće izdvojiti tri osnovne jedinice: stijena, stijena-i-tlo i tlo. Pri tome se stupnjevi I, II i III smatraju stijenskom masom; stupanj IV je prijelazni, jer posjeduje čvrstoću slabe stijenske mase, ali mu nedostaje postojanost karakteristična za stijenske mase i označava se kao stijenska masa-i-tlo; a stupnjevi V i VI su tlo (Geological Society of London 1995).

Tablica 3.3 *Stupnjevi trošnosti stijenske mase (Brown 1981)*

Stupanj	Pojam	Simbol	Opis
I	Svježa stijena (eng. *fresh*)	FR	Nema vidljivih tragova trošenja materijala stijenske mase; eventualno blaga promjena boje na površinama glavnih diskontinuiteta
II	Slabo trošna stijena (eng. *slightly weathered*)	SW	Promjena boje ukazuje na trošenje stijenskog materijala, a diskontinuiteti mogu ponegdje biti izvana oslabljeni u odnosu na stijensku masu u svježem stanju.
III	Srednje trošna stijena (eng. *moderately weathered*)	MW	Manje od polovice stijenskog materijala je raspadnuto ili je razlaganjem pretvoreno u tlo. Svježa stijenska masa ili ona promijenjene boje je prisutna kao kontinuirana okosnica ili jezgra.
IV	Jako trošna stijena (eng. *highly weathered*)	HW	Više od polovice stijenskog materijala je raspadnuto ili je razlaganjem pretvoreno u tlo. Svježa je stijena ili stijena promijenjene boje je prisutna bilo kao diskontinuirani okosnica ili jezgra.
V	Potpuno trošna stijena (eng. *completely weathered*)	CW	Sav stijenski materijal je raspadnut i/ili razlaganjem pretvoren u tlo. Originalna struktura stijenske mase je još uvijek uglavnom intaktna.
VI	Rezidualno tlo (eng. *residual soil*)	RS	Sav stijenski materijal je pretvoren u tlo. Struktura i građa stijenske mase su uništene. Postoji velika promjena u volumenu, ali tlo nije značajnije transportirano.

Podjela stijenske mase po stupnjevima trošnosti se provodi vizualnim pregledom te se zbog subjektivnog opisa stijenske mase u tumačenju mogu pojaviti značajne razlike. Pouzdanost procjene stupnja trošnosti na temelju vizualnog pregleda proučavali su Pinho et al. (2006) i potvrdili da subjektivnost procjene značajno ovisi o litologiji, stupnju trošnosti i heterogenosti uzorka. U određenim vrstama stijenske mase nije teško utvrditi razliku između umjereno, jako i potpuno trošne stijene, dok je to gotovo nemoguće utvrditi za siltite i šejlove iz flišne stijenske mase (Grošić 2014). Potrebno je napraviti daljnja istraživanja kako bi se našla veza između stupnjeva trošnosti i jedne od *in situ* metode mjerenja parametara stijenske mase. Ündül & Tuğrul (2012)

predlažu određivanje stupnjeva trošnosti na temelju stanja diskontinuiteta i odskočne vrijednosti Schmidtovog čekića. Utjecaj trošenja na smanjenje čvrstoće na laporovitom profilu trošnosti proučavali su Eberhardt et al. (2005) tijekom istraživanja klizišta Rufi u Švicarskoj (Slika 3.8) i dali prikaz profila trošnosti na istraženom klizištu.



Slika 3.8 *Shematski prikaz profila trošnosti na području klizišta Rufi (Eberhardt et al. 2005)*

3.3.4. Erozija i pokreti masa u flišu

Denudacija ili ogoljenje (eng. *denudation*) je pojam koji se odnosi na velike površine terena, a kojim se označava prosječno snižavanje površine terena tijekom dužeg vremenskog perioda, pri čemu se zanemaruje varijabilnost u iznosu erozije na manjim površinama unutar promatranog područja (Toy et al. 2002). U ovom radu se pod pojmom denudacije smatra svaki proces koji dovodi do snižavanja razine površine terena. Općenito se taj proces može podijeliti na dvije podgrupe, a to su erozija i pokreti masa.

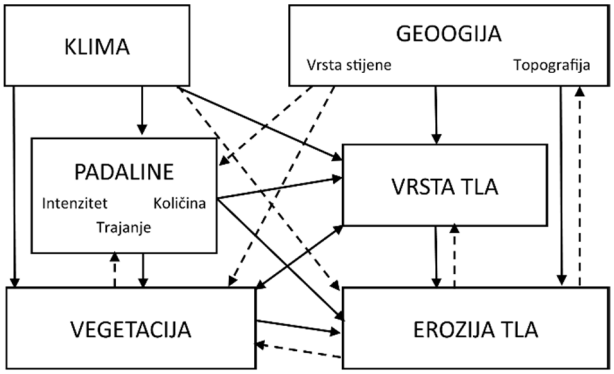
3.3.4.1. *Erozija u flišu*

Erozija podrazumijeva proces odvajanja, pokretanja i transporta čestica tla ili stijena pod djelovanjem vode, vjetra ili leda (Selby 1993). Erozija se ubraja u grupu denudacijskih procesa jer njezino djelovanje uzrokuje snižavanje površine terena (Gulam 2012).

Erozija nastaje isključivo djelovanjem egzodinamičkih sila, a dijeli se u tri skupine:

- erozija vodom, koja se javlja kao:
  - regionalna ili pluvijalna (izazvana kišom),
  - fluvijalna (izazvana vodenim tokovima) i
  - abrazija (izazvana riječnim, jezerskim i morskim valovima)
- erozija vjetrom (eolska erozija ili korazija) i
- erozija ledom i snježnim lavinama (glacijalna erozija ili eksaracija).

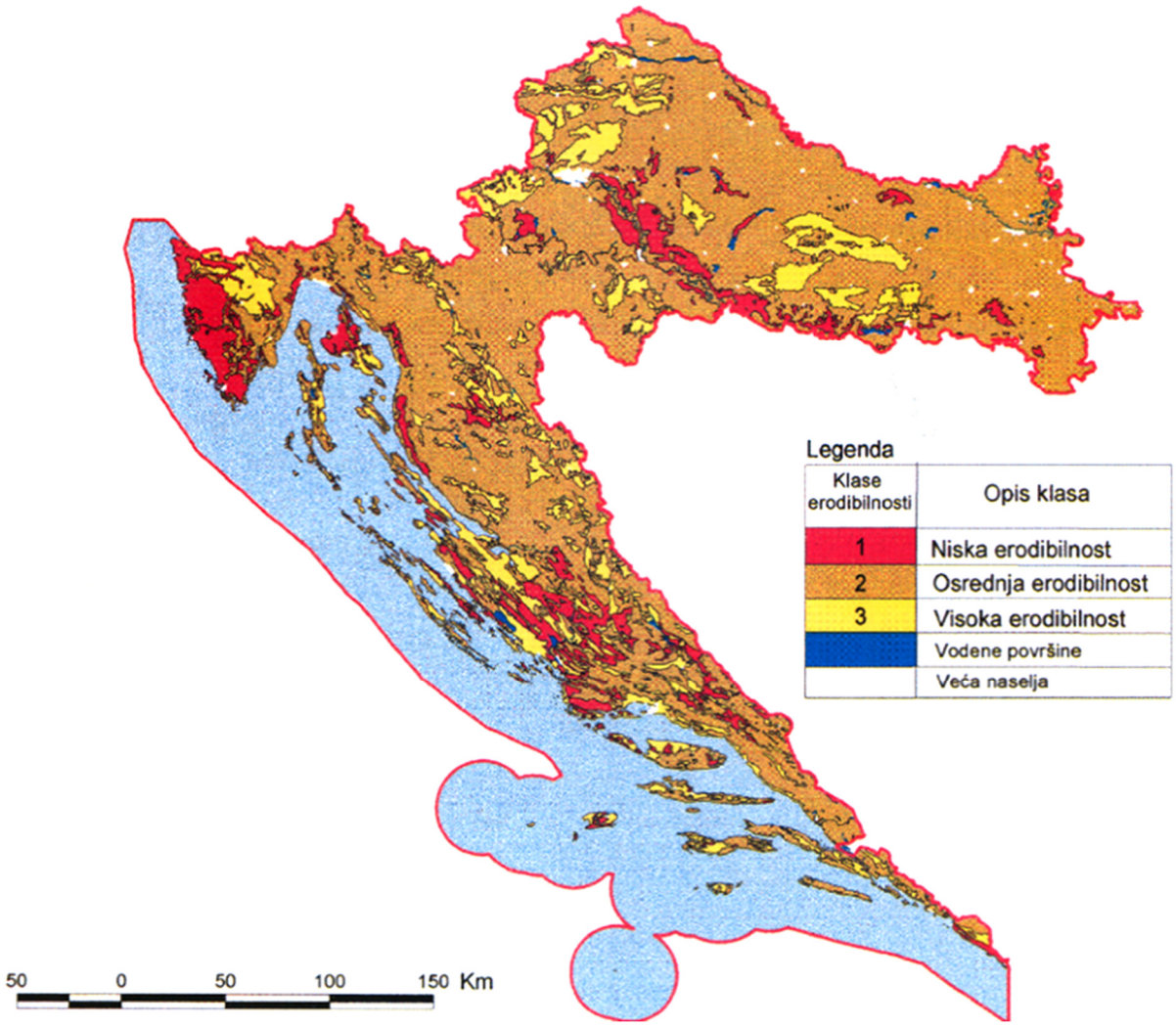
Voda, vjetar i led mogu na eroziju utjecati na različite načine i kroz različite procese, a kako će oni utjecati na opseg i tip erozije ovisi o klimi i geologiji te vrsti stijene ili tla i vegetaciji, kao što je prikazano na Slici 3.9 (Morisawa 1968).



Slika 3.9 *Ovisnost između primarnih faktora koji utječu na eroziju (prema Morisawa 1968)*

Procjena erodibilnosti ili podložnosti tla eroziji djelovanjem vode pokazuje da su tla koja sadrže čestice praha najpodložnija eroziji dok su tla koja imaju veći sadržaj čestica gline ili pijeska manje podložna eroziji. Slika 3.10 prikazuje klase erodibilnosti tla na području Republike Hrvatske te ukazuju na razinu erodibilnosti odnosno na razinu potencijalne erozije tla vodom. Izdvajanje spomenutih klasa je u korelaciji s poznatom činjenicom da se s povećanjem nagiba terena uz istodobnu promjenu litološke podloge

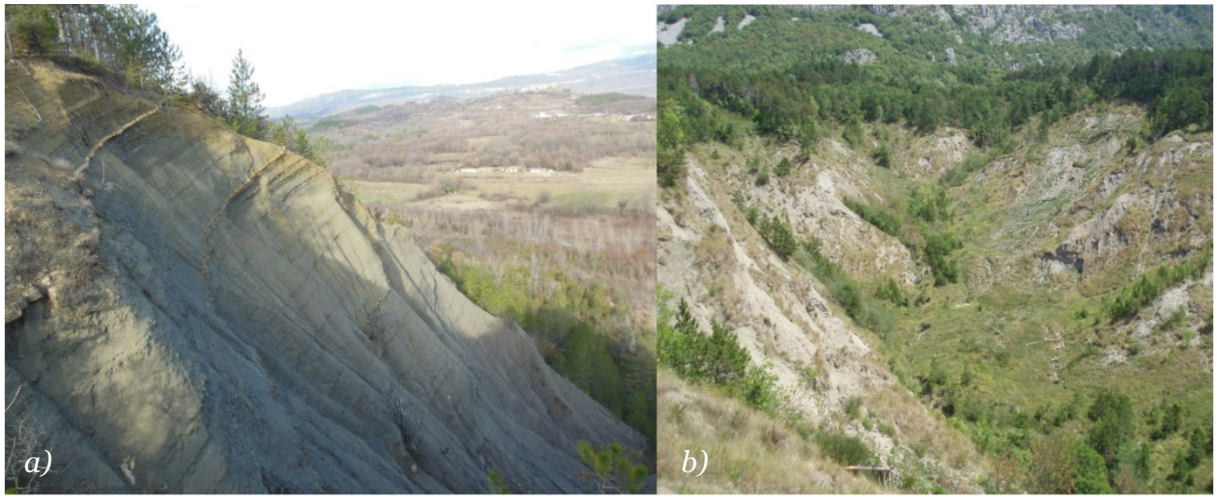
od kompaktnih neraspadnutih stijena do rahlih nekoherentnih sedimenata povećava i potencijalna erozija na nekom području, odnosno, da se razina erodibilnosti mijenja od niske prema visokoj (Husnjak et al. 2001).



Slika 3.10 *Klase erodibilnosti tla na području Republike Hrvatske (Husnjak et al. 2001)*

Proces erozije unutar naslaga fliša u području istraživanja (Slika 3.11) registriran je na području sjeverne Istre (Gulam 2012; Žufić 2011) i na području Vinodolske doline (Jurak et al. 2005), dok je u dolini Rječine slabije izražen. Na području Istre pojava erozije na flišnim padinama javlja se u dva različita oblika, i to: i) površinska erozija na padinama s blagim nagibom na kojima se razvija proces vertikalnog prodiranja trošenja u naslage fliša paralelno s nagibom padine i ii) razvoj ogolina na strmim padinama na kojima se proces trošenja razvija pretežno horizontalno, a nagib padine određen je čvrstoćom stijenske mase (Žufić 2011). Erozija na području Vinodolske

doline razvijena je formiranjem širih područja erozije u slivovima Slanog Potoka (53 ha) i Male Dubračine (39 ha). Pri tome je proces prekomjerne erozije fliša u slivu Slanog Potoka potpomognut prisustvom natrijeva minerala tenardita (Aljinović et al. 2010). Spomenuti mineral se lako uočava na izdancima u sušnim razdobljima kao pojava nazvana "cvjetanje" soli (Jurak et al. 2005; Mileusnić et al. 2004). Dodatnim upijanjem vode tenardit se transformira u mirabilit koji ima znatno veći volumen od tenardita što dodatno doprinosi mehaničkom trošenju flišnih sedimenta zbog porasta naprezanja u stijeni. Osim ove činjenice, prekomjernoj eroziji doprinosi i ion natrija koji se zbog otapanja tenardita i mirabilita nalazi u sedimentu. Kako je ion natrija antikoagulans za čestice gline koje se nalaze u sitnozrnastim litološkim članovima, efekt disperzije čestica je jako izražen što dovodi do daljnje degradacije stijene i pojave puzanja i klizanja trošnih sitnozrnastih sedimenata sliva Slanog Potoka. (Aljinović et al. 2010).



Slika 3.11 *Erozija flišnih naslaga: a) ogolina Brus u Istri, b) prekomjerna erozija u području sliva Slani Potok u Vindolskoj dolini*

3.3.4.2. Pokreti masa u flišu

Pokreti masa podrazumijevaju pokrete tla ili stijenskog materijala na padinama pod izravnim utjecajem gravitacije (Selby 1993). Prema (Cruden 1991; Cruden & Varnes 1996) definicija klizanja (nestabilnosti) je svaki pomak stijenske mase, nevezanog ili vezanog tla niz padinu. Razvijene su brojne klasifikacije pokreta masa (Varnes 1958; Skempton & Hutchinson 1969; Varnes 1975; Varnes 1978; Hutchinson 1988; Nemčok

et al. 1972). Hungr et al. (2014) modificiraju Varnesesovu (1978) klasifikaciju te razlikuje sveukupno 32 vrste pokreta masa, ovisno da li se javljaju u tlu ili stijeni, unutar sljedećih osnovnih skupina: odron (eng. *fall*), prevrtanje (eng. *topple*), klizanje (eng *slide*), bočno razmicanje (eng. *lateral spread*), tečenje (eng. *flow*) i deformacije padine (eng. *slope deformation*). Opis glavnih faktora koji utječu na procese klizanja dan je u preglednim radovima Varnes & IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements (1984) i Hutchinson (1988). Najvažniji faktori koji utječu na pojavu klizanja su: geološka građa padine (litološki sastav, geološke strukture, stupanj trošnosti), geomorfološki procesi na padini (trošenje stijena, padinski procesi), nagib i orijentacija padine, značajke pojedinih slojeva materijala tla ili stijene na padini (debljina, propusnost, poroznost), hidrološki i antropogeni uvjeti (oborine, promjene u težini materijala, korištenje zemljišta) (Dugonjić Jovančević 2013). Klizišta se javljaju kada neki od tih faktora utječe na promjenu prirodne ravnoteže u padini. Selby (1993) faktore koji utječu na klizanje klasificira u dvije osnovne skupine: i) faktori koji pridonose povećanju posmičnih naprezanja (smanjenje ili povećanje opterećenja na padini, povećanje volumena glina, trošenje, povećanje nagiba padine, saturacija uslijed oborina) i ii) faktori koji pridonose sniženju posmične čvrstoće (oslabljenja materijala, fizički i kemijski procesi, promjene u strukturi stijenske mase, raspucalost).

Za nastanak klizišta na flišnim padinama naročito je važan proces vremenskog trošenja flišne stijenske mase uslijed djelovanja vode i atmosferilija, kao i proces erozije i akumulacije raspadnutog materijala.

Pojava mnogobrojnih klizišta i odrona unutar fliša u području istraživanja registrirana je u naslagama fliša u Istri, dolini Rječine i Vinodolskoj dolini, kao što je prikazano na Slici 3.12. Na području Istre registrirana su brojna klizišta u naslagama fliša, uglavnom malog volumena i većinom na kontaktu flišnih naslaga i karbonatne stijenske mase (Arbanas et al. 2013). To su uglavnom rotacijska i translacijska klizanja kroz pokrivač i po kontaktu pokrivača i stijenske mase (Arbanas et al. 2013), kroz stijensku masu (Arbanas et al. 2010) ili tokovi tla (Arbanas et al. 2006). Dugonjić Jovančević & Arbanas (2012) istražili su pojavu klizišta na flišnim padinama Istre i pokazali da su duga kišna razdoblja presudna za početak klizanja, dok kraći kišni intervali imaju značajniji utjecaj na eroziju, a manje na pojavu klizanja. Klizanja se javljaju najčešće nakon tromjesečnog kišnog razdoblja gotovo svakodnevnih oborina. U dolini Rječine

registrirana su mala do srednje velika klizanja kroz flišnu stijensku masu (Arbanas et al. 2014) kao i brojna mala reaktivirana klizišta unutar starih kliznih tijela (Arbanas et al. 2014; Vivoda et al. 2012; Benac et al. 2005). U Vinodolskoj dolini registrirana su mala klizišta unutar pokrivača na naslagama flišne stijenske mase (Bernat et al. 2014).

Slika 3.12 *Klizišta i odroni na području istraživanja: a) translacijsko klizište Brus, b) tok zemljanog materijala Krbavčići, c) odron Marinci u sjeveroistočnoj Istri, d) klizište Grohovo, e) odron na Grohovskoj cesti, f) reaktivirano klizište iznad akumulacije Valići u dolini Rječine, g) klizište Draga u Draškoj dolini, h) klizište kraj Pomorske škole u Bakru u Bakarskom zaljevu, i) staro umireno klizište u Vinodolskoj dolini*

Na sve opisane pojave erozije i klizišta u flišnim naslagama značajan utjecaj ima proces trošenja u naslagama fliša, a naročito u sitnozrnastim litološkim članovima fliša. Procesom trošenja se mijenjaju mineraloške i geotehničke značajke sitnozrnastih litoloških članova fliša uz posljedične pojave procesa klizanja na padinama u naslagama fliša.

4. UTJECAJ TROŠENJA NA GEOTEHNIČKE I MINERALOŠKE ZNAČAJKE SITNOZRNASTIH LITOLOŠKIH ČLANOVA FLIŠA

4.1. PREGLED REZULTATA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Problemi koji se javljaju tijekom uzorkovanja i pripremanja uzorka za ispitivanje mekih stijena, a u koje se ubrajaju i sitnozrnasti litološki članovi fliša, opisani su u mnogim dosadašnjim istraživanjima (Kanji 2014). Marinos & Hoek (2001) u svom radu navode da je izuzetno teško dobiti uzorak intaktne jezgre za određivanje jednoosne tlačne čvrstoće u laboratoriju u heterogenim stijenskim masama kao što je fliš. Poteškoće u uzorkovanju neporemećenog, intaktnog uzorka lapora opisuje Vlastelica (2015) u svom doktorskom radu. Ukoliko ne postoji mogućnost ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće stijene ili određivanje tlačne čvrstoće u točki, Marinos & Hoek (2001) predlažu terensku procjenu jednoosne tlačne čvrstoće i kvalitativni opis stijenske mase prikazane Tablicom 4.1.

Tablica 4.1 *Terenska procjena jednoosne tlačne čvrstoće intaktne stijene (Marinos & Hoek 2001)*

Stupanj*	Termin	Jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)	Point Load Indeks (MPa)	Terenska procjena čvrstoće	Primjeri
R6	Izuzetno čvrsto	>250	>10	Uzorak se s geološkim čekićem okrhne	Svježi bazalt, čert, dijabaz, gnajs, granit, kvarcit
R5	Vrlo čvrsto	100-250	4-10	Uzorak zahtjeva veliki broj udaraca geološkim čekićem kako bi se slomio	Amfibiolit, pješčenjak, bazalt, gabro, gnajs, granodiorit, vapnenc mramor, riolit, tuf
R4	Čvrsto	50-100	2-4	Uzorak zahtjeva više od jednog udarca geološkim čekićem kako bi se slomio	Vapnenac, mramor, filit, pječenjak, škriljavac, šejl
R3	Srednje čvrsto	25-50	1-2	Uzorak nije moguće zarezati ili rascijepati nožem, ali se može slomiti jednim udarcem geološkog čekića	Glinjak, ugljen, beton, škriljavac, šejl, siltit
R2	Slabo	5-25	**	Uzorak se može zarezati nožem uz teškoće, a pojedini odlomci se mogu odcijepiti laganim udarcima geološkog čekića	Kreda, kamena sol, potaša
R1	Vrlo slabo	1-5	**	Uzorak se raspada pod laganim udarcem geološkog čekića i može se rezati nožem	Jako raspadnuta stijena ili izmijenjene stijene
R0	Izuzetno slabo	0,25-1	**	Uzorak se razdvaja pod pritiskom nokta	Meka pukotinska ispuna

** Stupanj po čvrstoći prema (Brown 1981)*
*** PLT ispitivanja na stijeni čija je jednoosna tlačna čvrstoća ispod 25 MPa i koja daju nejasne rezultate*

Određivanje čvrstoće u točki (eng. *Point Load Test*, PLT) na uzorcima fliša različitih stupnjeva trošnosti iz Draške doline blizu Rijeke proveli su Arbanas et al. (2008). Jednoosna čvrstoća svježih uzoraka siltita (FR) kreće se od 10 do 15 MPa, izuzetno do 20 MPa. Jednoosna čvrstoća za srednje (MW) do slabo trošne (SW) uzorke siltita je manja od 2 MPa i te su vrijednosti dobivene PLT metodom nepouzdane i neprihvatljive bez adekvatnih mjera opreza za primjenu u inženjerskom modeliranju. Za potrebe izrade magistarskog rada Žufić (2011) provodi ispitivanje PLT metodom na uzorcima siltita u Istri. Rezultati ispitivanja na uzorcima svježeg siltita su pokazali da odgovarajuća jednoosna čvrstoća ima raspon od 2 do 58 MPa, dok se geološki indeks čvrstoće (eng. *Gelogical Strength Indeks*, GSI) kreće u granicama od 25 do 35. Na osnovu tih rezultata predlaže korekciju Hoek-Brownovog kriterija za heterogene stijenske mase, odnosno za siltit kao najzastupljeniji član flišnog kompleksa konstantnim umanjenjem procijenjenih vrijednosti GSI. Tijekom istraživanja erozije ogolina u flišu središnje Istre, Gulam (2012) utvrđuje raspon vrijednosti GSI od 17 do 35. Također utvrđuje da najveći utjecaj na postojanost lapora u Istri ima njegova geneza i udio minerala glina te da je najrasprostranjeniji i najučestaliji proces fizičkog trošenja na istraživanom prostoru opetovano vlaženje i sušenje stijenske mase.

Rahardjo et al. (2004) opisuju karakteristike rezidualnih tala granitnih i sedimentnih stijena različitih trošnosti u Singapuru. Sadržaj kvarca i glavnih minerala glina poput kaolinita i illita raste sa stupnjem trošnosti u granitnim stijenama. Udio finih čestica se povećava s povećanjem stupnja trošnosti u granitnim stijenama dok kod sedimentnih stijena ta veza nije jasno vidljiva. Kod sedimentnih stijene se specifična gustoća smanjuje s povećanjem stupnja trošnosti dok se parametri čvrstoće povećavaju s dubinom, odnosno, sa smanjenjem stupnja trošnosti. Bhattarai et al. (2006) ispituju utjecaj trošenja na fizičko mehaničke značajke muljnjaka u Japanu. Granica tečenja i indeks plastičnosti se ne razlikuju znatno s dubinom. Fizičko trošenje uzoraka tla i stijenske mase smanjuje posmičnu čvrstoću što posljedično utječe na smanjenje stabilnost padine. Ündül & Tuğrul (2012) istražuju utjecaj trošenja na inženjerske značajke dunita u Turskoj. Specifična gustoća, jednoosna tlačna čvrstoća i indeks postojanosti se smanjuju s povećanjem stupnja trošnosti dok apsorpcija vode i poroznost rastu s povećanjem stupnja trošnosti. Shaqour et al. (2008) povezuju geotehničke i mineraloške značajke lapora u Jordanu. Ispitivani lapori posjeduju visoku granicu plastičnosti i niski indeks plastičnosti. Utvrđena je linearna veza između

udjela glinovitih čestica i granice tečenja i granice plastičnosti te obrnuto proporcionalna veza između udjela glinovitih čestica i maksimalne suhe gustoće. Nije uspostavljena jasna veza između kohezije i udjela glinovitih čestica.

Rezidualna čvrstoća je značajan parametar tla pri analizama stabilnosti reaktiviranih klizišta, kao i kod klizišta kod kojih se potencijalna klizna ploha može razviti duž litoloških diskontinuiteta ili geoloških strukturnih diskontinuiteta. Rezidualna čvrstoća se mobilizira na kliznoj plohi ili plohi smicanja s česticama orijentiranim u smjeru kretanja pri velikim pomacima (Skempton 1964; Skempton 1985; Mesri & Shahien 2003; Nakamura et al. 2010). Povezanost rezidualne čvrstoće s mineraloškim značajkama, Atterbergovim granicama i granulometrijskim krivuljama istraživali su Tsiambaos (1991) za Iraklion lapor u Grčkoj dok su El Amrani Pazza et al. (2000) istraživali isto za laporovita tla u jugoistočnoj Španjolskoj. Zaključuju da porast sadržaja kalcita utječe na smanjenje indeksa plastičnosti i uzrokuje značajno povećanje rezidualnog kuta trenja. Veći porast udjela glinovitih čestica značajno smanjuje rezidualni kut trenja lapora. Frydman et al. (2007) povezali su pojavu reaktiviranih klizišta s rezidualnom čvrstoćom lapora u Izraelu. Porastom udjela karbonata u glinovitim česticama raste i rezidualni kut trenja lapora. Ispitivanja rezidualne posmične čvrstoće materijala iz klizišta na uređaju za prstenasto smicanje provedena su od strane brojnih autora. Vithana et al. (2012) prikazali su parametre čvrstoće tla iz klizišta dobivene ispitivanjem u uređaju za prstenasto smicanje i uređaju za izravno smicanje. Vrijednosti kohezije i kuta unutarnjeg trenja dobiveni uređajem za izravno smicanje su 1,6 do 3,2 puta veći od vrijednosti dobivenih uređajem za prstenasto smicanje na uzorcima muljnjaka, dok je razlika tih vrijednosti u prašinastim uzorcima i uzorcima aluvijalnog lesa neznatna. Sassa et al. (2014) opisali su primjenu novog uređaja za prstenasto smicanje, ICL-2, na megaklizištu Unzen-Mayuyama u Japanu. Provedena su nedrenirana monotona (konstantni prirast naprezanja) i ciklička ispitivanja, seizmička ispitivanja i ispitivanja kontrolom pornog pritiska na uzorcima s klizišta.

Trošenjem se stijenska masa raspada na prah i glinu te se ishodišni stijenski materijal počinje ponašati kao tlo. Brojni istraživači povezuju utjecaj trošenja s inženjerskim značajkama i mineralnim sastavom flišne stijenske mase na temelju rezultata provedenih laboratorijskih istraživanja. Chandler (1969) opisuje utjecaj trošenja na

posmičnu čvrstoću Keuper lapora. Razlikuje četiri stupnja trošnosti lapora i to: I-svježi do IV-najtrošniji lapor. Utvrđuje malu razliku u indeksu plastičnosti za I, II i III stupnjeve trošnosti dok je stupanj IV znatno plastičniji zbog većeg udjela čestica frakcije glina. Također, s trošenjem se smanjuje kut unutarnjeg trenja s vrijednosti 32–23° za svježi lapor (I) na 29–22° za srednje trošni lapor (III) i 24–18° za potpuno trošni lapor (IV). Vrijednost kohezije iznosi 0,19 kPa za svježi do 0,11 kPa za srednje i potpuno trošni lapor. Reiβmüller (1997) istražuje utjecaj trošenja na posmičnu čvrstoću Kössener lapora na temelju rezultata ispitivanja u uređaju za izravno smicanje. Razlikuje šest stupnjeva trošnosti i utvrđuje da se s trošenjem smanjuju posmične značajke lapora, kohezija s 58 kPa na 20 kPa i kut unutarnjeg trenja s 35° na 17° redom za svježi lapor (W0) i rezidualno tlo (W5). Bhattarai et al. (2006) ne pronalaze značajniju razliku u rezidualnoj posmičnoj čvrstoći uzoraka lapora uzorkovanih s različitih dubina.

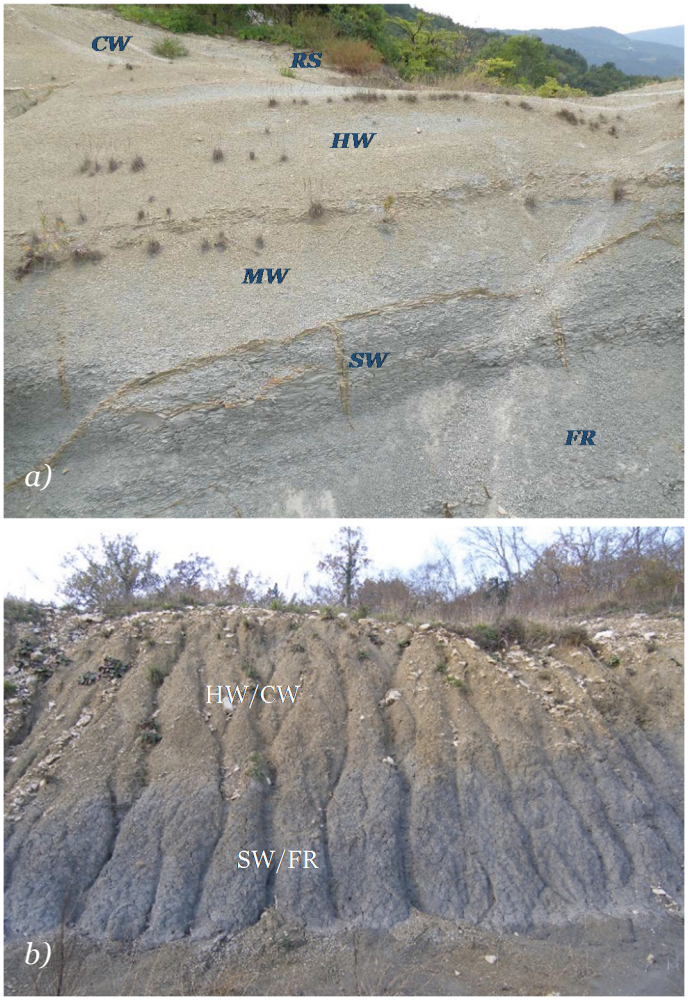
Detaljne mineraloške analize fliša s područja Istre, doline Rječine i Vinodolske doline proveli su Jurak (1980), Jurak et al. (2005), Arbanas et al. (2006), Benac et al. (2014) i drugi autori. Arbanas et al. (2006) prikazuje rezultate mineraloških analiza uzoraka iz naslaga fliša s različitih dubina na padini klizišta Krbavčići i susjednom području u sjevernoj Istri. U ispitanim uzorcima prevladavaju filosilikati (48-65%) i ostalih minerala: kalcit (13-36%), kvarc (13-26%) i plagioklas (do 5%). Analize su pokazale veću koncentraciju minerala gline (muskovit i illit) u uzorcima uzetim iz tijela klizišta u odnosu na ostale analizirane uzorke. Benac et al. (2014) prikazuje rezultate mineraloških analiza uzoraka iz naslaga fliša s različitih dubina na klizištu Grohovo u dolini Rječine. Na ispitanim uzorcima je najveći udio filosilikata s prevladavajućim mineralima illita i kaolinita i manjom količinom vermikulita, smektita i mješanoslojnih minerala gline. Kvarc, kalcit i filosilikati čine 86-96 % ukupnog mineraloškog sadržaja. Kvarc, kalcit i feldspat su najuobičajeniji masivni minerali dok su kaolinit, illit, smektit, halaozit, klorit i tinjci najčešće prisutni minerali glina. Mineraloške značajke flišnih uzoraka u Vinodolskoj dolini u slivu Mala Dubračina istraživao je Jurak (1980). U ispitanim uzorcima prevladavaju minerali filosilikata sa 38-60%, dok ostale minerale čine kalcit (10-15%), kvarc (23-30%) i feldspat (8-18%). Jurak et al. (2005) analizirali su mineralni sastav uzoraka fliša iz područja sliva Slani Potok u Vinodolskoj dolini. Analizirani uzorci se sastoje od filosilikata (50-66%), kalcita (9-20%), kvarca (20-30%) i feldspata (do 10%). Najveći udio predstavljaju filosilikati s muskovitom kao

prevladavajućim mineralom i manjom količinom klorita, kaolinita, smektita i mješanoslojnih minerala glina.

4.2. DEFINIRANJE STUPNJEVA TROŠNOSTI

Na osnovi metoda određivanja stupnja trošnosti predloženih od Ündül & Tuğrul (2012), stupnjevi trošnosti sitnozrnastih litoloških članova fliša na izdancima na području istraživanja (Slika 4.1) u ovom doktorskom radu, određeni su s obzirom na:

- promjenu boje (Slika 4.1, 4.2 a);
- stanje diskontinuiteta;
- postojanje/nepostojanje originalne stijenske strukture;
- jednoosnu tlačnu čvrstoću stijenske mase, σ_{ci} (Slika 4.2 b).



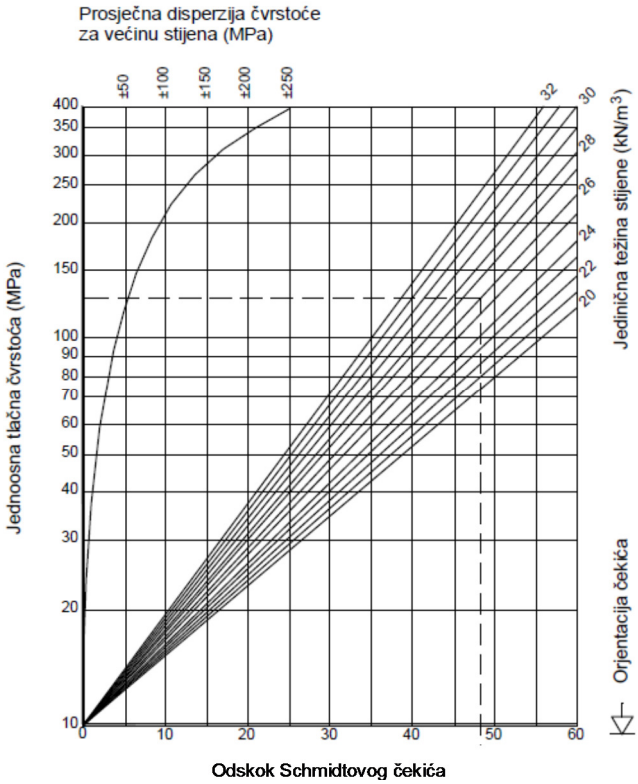
Slika 4.1 *Profil trošnosti na izdanku flišne stijenske mase u: a) Istri (Dugonjić Jovančević 2013), b) Vinodolskoj dolini*

Slika 4.2 *Određivanje stupnjeva trošnosti na osnovi: a) promjene boje i b) jednoosne tlačne čvrstoće dobivene iz pokusa Schmidtovim čekićem*

Pokus Schmidtovim čekićem daje odskočne vrijednosti čekića iz kojih je moguće korelirati *in situ* vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće (Aydin 2015; Miller 1965). Schmidtov čekić je razvijen kasnih 40-ih godina prošlog stoljeća kao indeksna nedestruktivna oprema za ispitivanje betona na izvedenim građevinama. Od ranih 60-ih godina prošlog stoljeća koristi se u mehanici stijena, najčešće za procjenu jednoosne tlačne čvrstoće stijenskih materijala i zidova diskontinuiteta (Aydin 2015). Uslijed rasprostranjene i dugotrajne primjene čekića očekivano je da preporučeni standardi daju konzistentne i pouzdane podatke te se iz pokusom dobivenih podataka mogu korelirati i drugi važni mehanički parametri poput jednoosne tlačne čvrstoće. Međutim, nekonzistentnost rezultata dobivenih primjenom čekića utvrđena je uvjetima ispitivanja poput tipa čekića, normalizacije odskočnih vrijednosti, dimenzija uzoraka, ravnosti površine ispitivanja, trošenja stijenske mase, vlažnosti, reduciranja i analize dobivenih podataka. Unatoč tome, s vremenom je Schmidtov čekić dobro prihvaćen kao oprema za određivanje značajki stijenske mase zbog njegovih prednosti poput relativno niske cijene, veličine, jednostavnosti pri uporabi, brzini izvođenja mjerenja i nedestruktivnosti pokusa.

U istraživanjima za potrebe izrade ovog rada korišten je Schmidtov čekić model 45-D0561 proizvođača Controls. Određivanje Schmidtovog odskoka je provedeno na terenu na dostupnim lokacijama (Slika 4.2 b). Pokus Schmidtovim čekićem koristi se i za procjenu trošnosti stijena (Aydin 2015). Pri korištenju Schmidtovog čekića iz rezultata ispitivanja (odskočne vrijednosti čekića) odredi se srednja vrijednost i od tako

formiranog skupa odbacuju se svi odskoci koji se od izračunate srednje vrijednosti razlikuju za više od četiri jedinice. Broj odbačenih odskoka ne smije biti veći od 30 % ukupnog broja odskoka; u protivnom se ispitno mjesto odbacuje. Od preostalog skupa rezultata određuje se srednja vrijednost odskočne vrijednost Schmidtovog čekića. Jednoosna tlačna čvrstoća se dobiva iz korelacijskog dijagrama s odskočnom vrijednosti Schmidtovog čekića (Slika 4.3) koje isporučuje proizvođač Schmidtovog čekića i vezan je uz značajke čekića, pri čemu vrijednost dobivene čvrstoće ovisi o zapremninskoj težini stijenske mase i orijentaciji udara čekića.



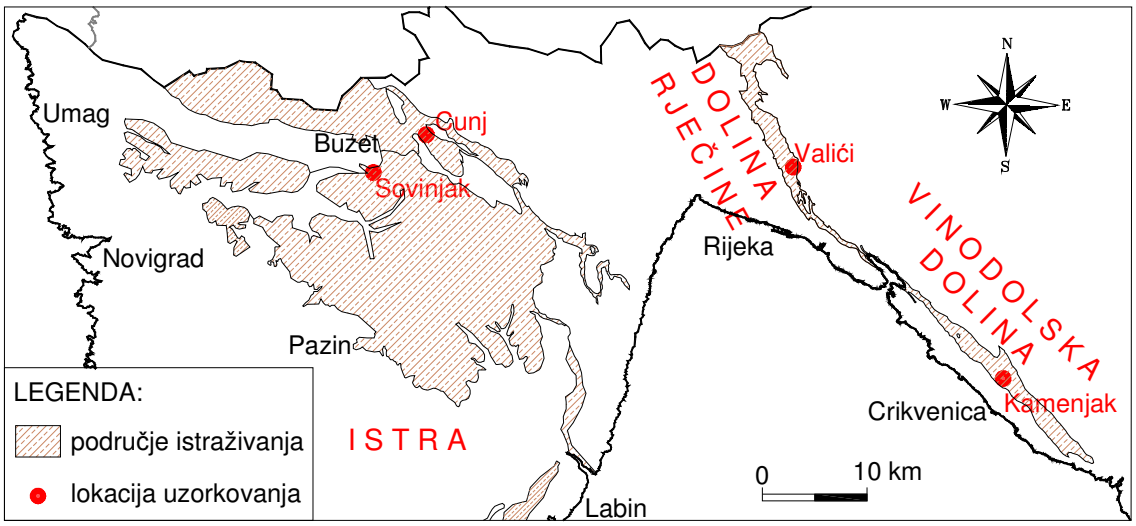
Slika 4.3 *Korelacijski dijagram odskoka Schmidtovog čekića i jednoosne tlačne čvrstoće (Deere & Miller 1966)*

4.3. PRIKUPLJANJE I PRIPREMA UZORAKA

Za potrebe izrade ovog doktroskog rada prikupljeni su uzorci sitnozrnastih litiloških članova flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti s ukupno četiri lokacije iz različitih dijelova područja istraživanja, prikazani u Tablici 4.2 i na Slici 4.4. Lokacije uzorkovanja su sljedeće:

- izdanak flišne stijenske mase blizu sela Cunj u Istri (Slika 4.5 a);
- pokos izgrađen u flišnoj stijenskoj masi blizu sela Sovinjak (Slika 4.5 b);
- istaložene naslage porijeklom iz flišne stijenske mase s dna akumulacije Valići (Slika 4.6);
- jezgra bušotine (Slika 4.7 a) i izdanci flišne stijenske mase u dolini Rječine (Slika 4.7 b – 4.7 d);
- izdanak flišne stijenske mase blizu sela Kamenjak u Vinodolskoj dolini (Slika 4.8).

Idealno uzorkovanje na jedinstvenom profilu trošnosti za koji se može pretpostaviti da uzorci potječu iz identičnih naslaga i izvorno su istog mineralnog sastava koji su kasnije bili izvrgnuti trošenju bilo je moguće samo na lokacijama u sjevernoj Istri (Slika 4.5) i Vinodolskoj dolini (Slika 4.8). Međutim, u dolini Rječine ne postoji niti jedan dostupan pokos na kojem je prisutan cijeli profil stupnjeva trošnosti te je stoga uzorkovano na nekoliko bliskih lokacija izdanaka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti. Istaložene naslage na dnu akumulacije Valići koje imaju značajke tla nastale su denudacijom flišnih naslaga na padinama uzvodno od akumulacije Valići i njihovom sedimentacijom (Slika 4.6).



Slika 4.4 *Karta s označenim lokacijama uzorkovanja sitnozrnastih litoloških članova fliša*

Slika 4.5 *Uzorkovanje sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti u Istri: a) na izdanku flišne stijenske mase blizu sela Cunj, b) na pokosu izgrađenom u flišnoj stijenskoj masu blizu sela Sovinjak*

Slika 4.6 *Uzorkovanje istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša različitih stupnjeva trošnosti s dna akumulacije Valići u dolini Rječine*

Slika 4.7 *Uzorkovanje sitnozrnastih litoloških članova fliša: a) I (FR) stupnja trošnosti iz jezgre bušotine i b) II (SW), c) III/IV (MW/HW), d) IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti na izdancima flišne stijenske mase u dolini Rječine*

Slika 4.8 *Uzorkovanje sitnozrnastih litoloških članova: a) II/I (SW/FR), b) IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti na izdanku flišne stijenske mase u Vinodolskoj dolini*

Tablica 4.2 *Popis uzoraka sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase na području istraživanja*

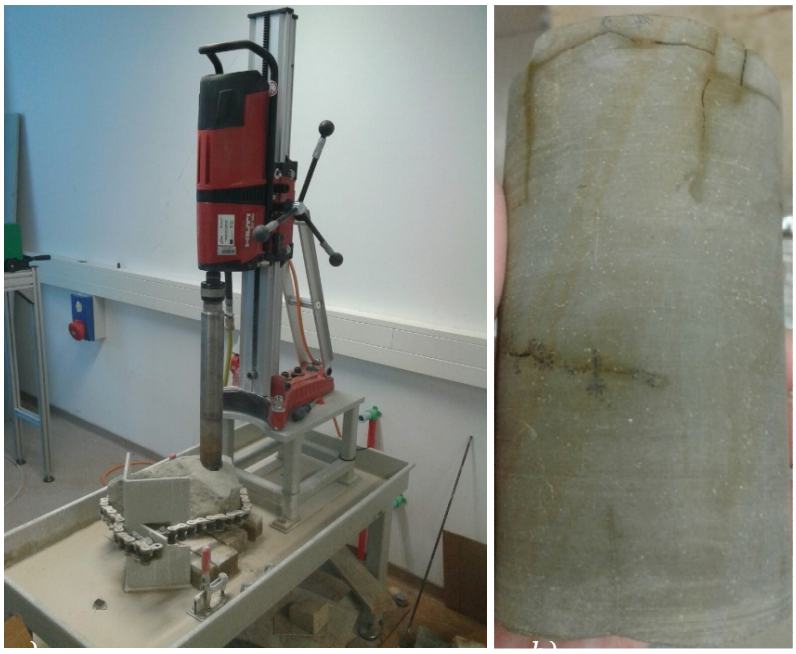
Lokacija uzorkovanja		Stupanj trošnosti sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase		Ispitivanje
		Oznaka	Opis	
Izdanak flišne stijenske mase u sjevernoj Istri	Cunj	I (FR)	Svježa	- Jednoosna tlačna čvrstoća PLT metodom - Fizičko mehaničke značajke - Rezidualna posmična čvrstoća: • Prstenasto smicanje • Izravno smicanje - Postojanost: • Oponašanje procesa sušenja i vlaženja • Dinamički uređaj za ispitivanje postojanosti - Mineraloške analize
		II (SW)	Slabo trošna	- Postojanost: • Oponašanje procesa sušenja i vlaženja
		III (MW)	Srednje trošna	- Jednoosna tlačna čvrstoća PLT metodom - Fizičko mehaničke značajke - Rezidualna posmična čvrstoća: • Prstenasto smicanje • Izravno smicanje - Postojanost: • Oponašanje procesa sušenja i vlaženja • Dinamički uređaj za ispitivanje postojanosti - Mineraloške analize
		V (CW)	Potpuno trošna	- Fizičko mehaničke značajke - Rezidualna posmična čvrstoća: • Prstenasto smicanje • Izravno smicanje - Postojanost: • Oponašanje procesa sušenja i vlaženja - Mineraloške analize
		VI (RS)	Rezidualno tlo	- Mineraloške analize
	Sovinjak	I (FR)	Svježa	- Postojanost: • Dinamički uređaj za ispitivanje postojanosti
		III (MW)	Srednje trošna	- Postojanost: • Dinamički uređaj za ispitivanje postojanosti
Dno akmulacije Valići u dolini Rječine		II (SW)/I(FR)	Slabo trošna/Svježa	- Fizičko mehaničke značajke - Rezidualna posmična čvrstoća: • Prstenasto smicanje • Izravno smicanje
		IV(HW)/V(CW)	Jako/ Potpuno trošna	- Fizičko mehaničke značajke - Rezidualna posmična čvrstoća: • Prstenasto smicanje • Izravno smicanje
Flišna stijenska masa u dolini Rječine	Bušotina	I (FR)	Svježa	- Fizičko mehaničke značajke - Rezidualna posmična čvrstoća: • Izravno smicanje - Mineraloške analize
	Izdanak	II (SW)	Slabo trošna	- Fizičko mehaničke značajke - Rezidualna posmična čvrstoća: • Izravno smicanje - Mineraloške analize
		III(MW)/IV(HW)	Srednje/Jako trošna	- Fizičko mehaničke značajke - Rezidualna posmična čvrstoća: • Izravno smicanje - Mineraloške analize
		IV(HW)/V(CW)	Jako/Potpuno trošna	- Fizičko mehaničke značajke - Rezidualna posmična čvrstoća: • Izravno smicanje - Mineraloške analize
Izdanak flišne stijenske mase u Vinodolskoj dolini		II (SW)/I(FR)	Slabo trošna/Svježa	- Fizičko mehaničke značajke - Rezidualna posmična čvrstoća: • Izravno smicanje
		IV(HW)/V(CW)	Jako/ Potpuno trošna	- Fizičko mehaničke značajke - Rezidualna posmična čvrstoća: • Izravno smicanje

Postojeće klizne plohe predstavljaju oslabljene dijelove padina na kojima se proces trošenja odvija brže nego u ostalim dijelovima uslijed izloženosti zraku i vodi. Tako poremećeni materijal u prirodi je uslijed nastalih posmičnih deformacija doživio pad čvrstoće te je stoga odgovarajuće promatrati umjesto vršnih njegovu rezidualnu čvrstoću. S obzirom na potrebe istraživanja rezidualnih značajki sitnozrnastih litoloških članova fliša mjerodavnih za reaktiviranje umirenih klizišta, uzorci sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti su prethodno obrađeni i usitnjeni metodom Los Angeles (Slika 4.9). Tako usitnjeni uzorci laboratorijskim putem do stupnja koji odgovaraju inženjerskom tlu u osnovi odgovaraju stanju materijala na kliznoj plohi, kada zbog naprezanja i deformacija koje nastupaju prilikom klizanja dolazi do prirodnog usitnjavanja materijala.

Slika 4.9 *Usitnjavanje uzoraka metodom Los Angeles*

U ovom doktorskom radu za potrebe ispitivanja tlačne čvrstoće i postojanosti sitnozrnastih litloških članova flišne stijenske mase, uzorkovani su neporemećeni uzorci iz blokova sitnozrnastih litoloških članova fliša. U postupcima bušenja jezgri iz nepravilnih blokova intaktne stijene pokazalo se da se većina uzoraka raspala tijekom bušenja tako da se iz njih nisu mogli dobiti mjerodavni neporemećeni uzorci za jednoosno i troosno ispitivanje tlačne čvrstoće (Slika 4.10 a). Uočeno je da se već pri uzorkovanju i obradi uzorci sitnornastih litoloških članova flišne stijenske mase raspadaju i degradiraju (Slika 4.10 b). Razlog raspadanja cilindričnih uzoraka je promjena vlažnosti uzorka, relaksacija naprezanja i/ili postojanje diskontinuiteta

unutar nepravilnih uzoraka. Od svih navedenih nepovoljnih uvjeta, utjecaj promjene vlažnosti na mehaničke značajke intaktnih uzoraka stijene posebno je značajan za siltite i slične materijale osjetljive na promjene vlažnosti. Većina takvih materijala dezintegrirati će se vrlo brzo uslijed sušenja nakon vađenja iz jezgrene cijevi. Zbog toga održavanje i ispitivanje intaktnih uzoraka stijene za određivanje jednoosne tlačne čvrstoće mora biti provedeno pod uvjetima što sličnijim *in situ* uvjetima vlažnosti.



Slika 4.10 *Priprema neporemećenih uzoraka: a) bušenje cilindričnih uzoraka iz nepravilnih intaktnih blokova flišne stijenske mase, b) raspadanje cilindričnog uzorka neposredno nakon bušenja*

Na lokaciji uzorkovanja, idealno bi bilo postaviti terenski laboratorij, a jezgru pripremiti i ispitati odmah nakon uzimanja uzorka ili pak ispitati materijal terenskim, *in situ* uređajem za izravno smicanje (Boakye 2008). Degradacijom i raspadanjem flišne stijenske mase vrijednosti parametara čvrstoće znatno se smanjuju pa se postavlja pitanje pouzdanosti rezultata dobivenih ispitivanjem tako degradiranih uzoraka. Kako bi se izbjegli prethodno navedeni problemi pri pripremanju uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša za određivanje jednoosne tlačne čvrstoće na cilindričnim uzorcima, pristupilo se određivanju tlačne čvrstoće u točki. Bez obzira na nepouzdanost PLT, ispitivanje nepravilnih neporemećnih i nedegradiranih uzoraka sitnorznastih litoloških članova flišne stijenske mase omogućuje eliminiranje brzih procesa degradacije, trošenja uzoraka, a jednostavnost pokusa omogućuje ispitivanje velikog broja uzoraka, što osigurava statistički bolje podatke.

4.4. GEOTEHNIČKE ZNAČAJKE SITNOZRNASTIH LITOLOŠKIH ČLANOVA FLIŠA

Za potrebe provedbe analiza utjecaja trošenja provedena su ispitivanja slijedećih geotehničkih značajki sitnozrnastih litoloških članova fliša:

1. fizičko mehaničke značajke (specifična gustoća, granulometrijski sastav, Atterbergove granice)
2. rezidualna posmična čvrstoća
3. čvrstoća u točki
4. postojanost.

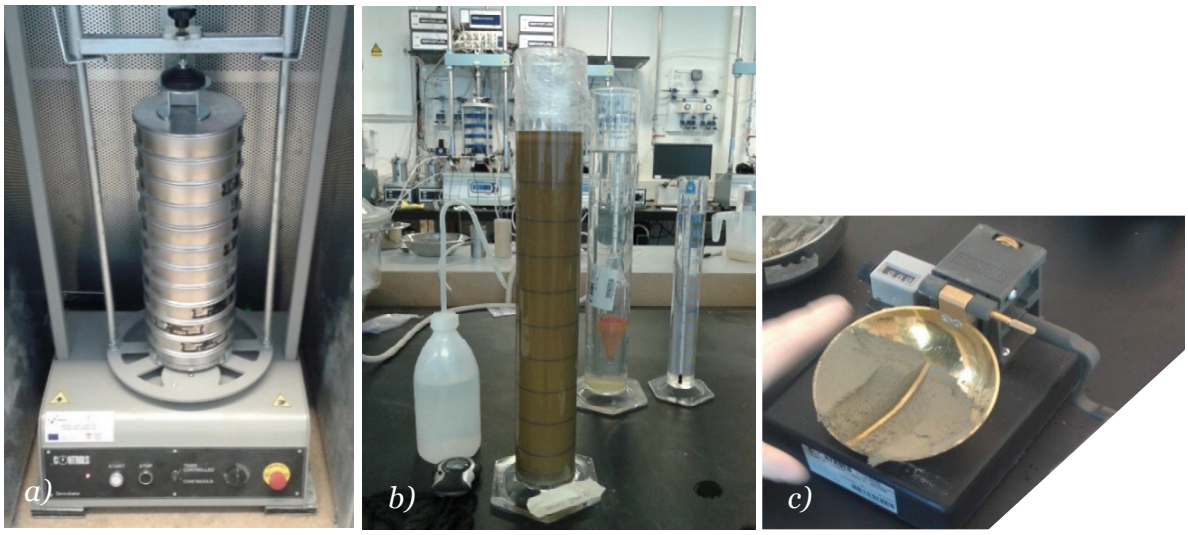
Za svaku od odabranih značajki navedeni su postupci određivanja, svrha i nedostaci pokusa te eventualne prilagodbe izvođenju u sitnozrnastim litološkim članovima flišne stijenske mase.

4.4.1. Fizičko mehaničke značajke sitnozrnastih litoloških članova fliša

Specifična gustoća je masa jedinice volumena čvrstih čestica stijene tj. potpuno zbijenog materijala bez pora i šupljina. Postupak ispitivanja je određen standardom ASTM (2014).

Granulometrijski sastav prikazuje sadržaj zrna različite veličine izražen u postotku mase. Određuje se sijanjem suhim postupkom za čestice veće od 0,063 mm i areometriranjem za materijal čija su zrna manja od 0,063 mm. Prosijavanje je postupak koji se provodi prema standardu BSI (1990) tako da se uzorak tla prosijava kroz niz sita pričvršćenih na okvir i poredanih u standardni niz graničnih veličina (Slika 4.11 a). Ovim postupkom suhog prosijavanja nije omogućeno točno određivanje kojoj sedimentnoj stijeni uzorak pripada. Areometriranjem ili sedimentiranjem u vodi određuje se postotak glinovitih čestica promjera manjeg od 0,063 mm prema standardu BSI (1990) (Slika 4.11 b).

Atterbergove granice tečenja određuju se prema standardu ASTM (2010) (Slika 4.11 c).



Slika 4.11 *Određivanje fizičko mehaničkih značajki uzoraka: a) suho prosijavanje, b) areometriranje za određivanje granulometrijskog sastava i c) Casagrandeova zdjelica za određivanje granice tečenja*

4.4.2. Rezidualna posmična čvrstoća sitnozrnastih litoloških članova fliša

Ispitivanje rezidualne posmične čvrstoće provedeno je u uređaju za prstenasto smicanje i uređaju za izravno smicanje.

Uređaj za prstenasto smicanje dopušta neograničene deformacije uzorka i omogućuje ispitivanje rezidualne posmične čvrstoće mobilizirane duž plohe sloma u klizištima pri velikim posmičnim deformacijama. Uređaj za prstenasto smicanje razvijali su Hrvoslev (1939), Bishop et al. (1971), Bromhead (1979), Savage & Sayed (1984), Sassa (1984), Hunger & Morgenstern (1984), Tika (1989), Garga & Sendano (2002). Za potrebe proučavanja brzih klizišta profesor Kyoji Sassa i njegov tim u *Disaster Prevention Research Institute (*DPRI) Sveučilišta u Kyotu razvijali su uređaj za prstenasto smicanje koji može geotehnički simulirati formiranje posmične zone uz velike posmične pomake nakon sloma koji se javljaju u brzim klizištima. Razvijena je serija DPRI uređaja (DPRI -1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) čiji osnovni mehanizam ima iste principe kao i Bishopov uređaj. Glavna razlika je što je Bishopov uređaj razvijen za istraživanje posmičnog otpora nakon prekoračenja vršne čvrstoće s fokusom na rezidualnu čvrstoću razvijenu u sporim klizištima glinovitih materijala. Uređaji iz DPRI serije simuliraju formiranje posmične zone nakon sloma kod brzih klizišta i omogućuju

proučavanje mobilizirane posmične čvrstoće, posmični pomak nakon sloma i generirani porni pritisak (Sassa et al. 2004).

Posljednji, prijenosni uređaj za prstenasto smicanje ICL-1 razvijen je 2010. godine i doniran Građevinskom Fakultetu Sveučilišta u Rijeci (Slika 4.12) u sklopu hrvatsko-japanskog bilateralnog znanstvenog projekta „Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda od klizišta i poplava u Hrvatskoj".

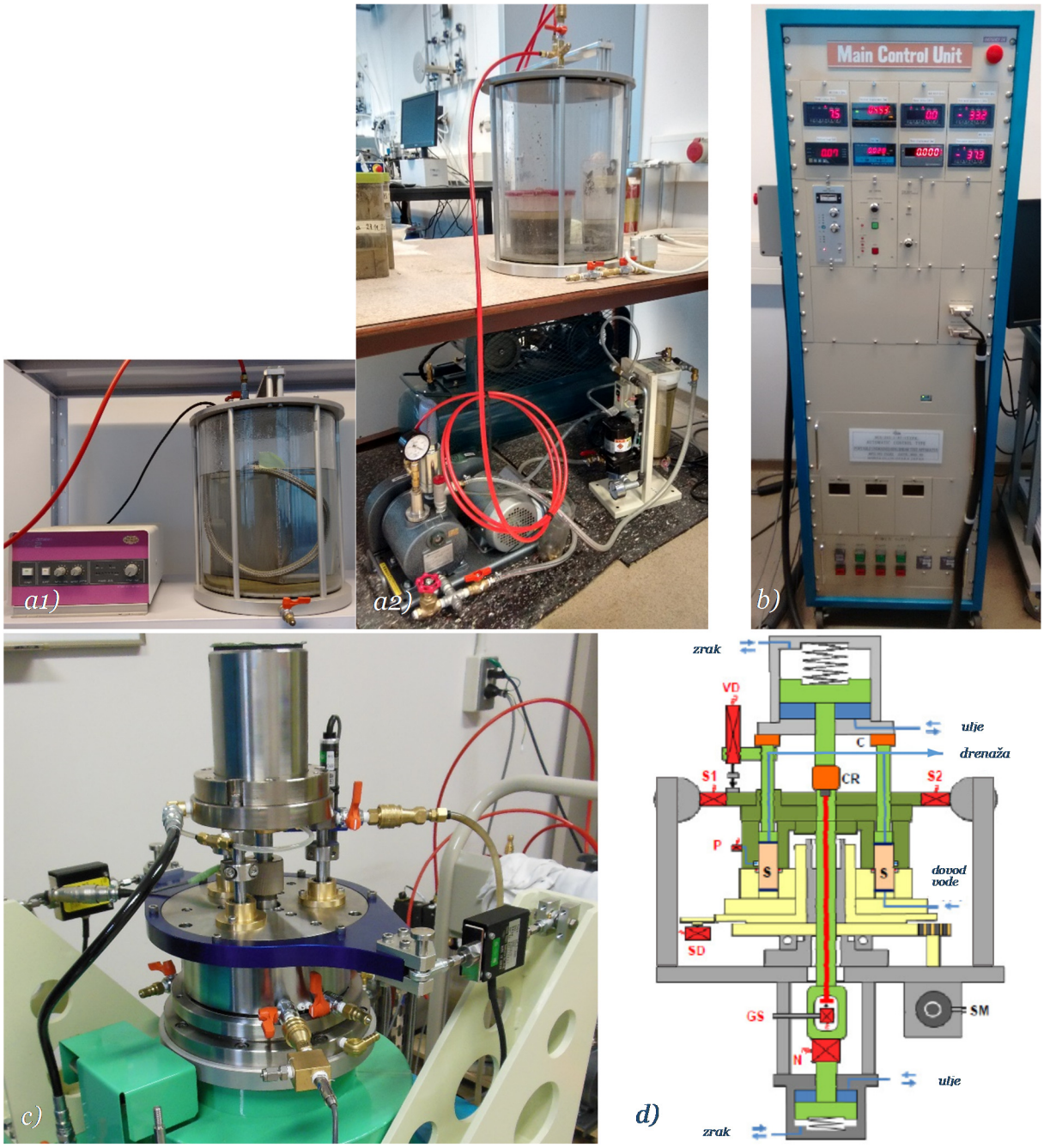
Slika 4.12 *Uređaj za prstenasto smicanje ICL-1*

U usporedbi s prethodnim uređajima, ICL-1 ima manje dimenzije i može producirati veća normalna naprezanja (do 1,0 MPa) i zadržati nedrenirane uvjete pri pornom pritisku do 1,0 MPa. Brzina smicanja kreće se od 0,01 cm/s do maksimalne brzine od 5,4 cm/s. Uređajem za prstenasto smicanje, ICL-1 moguće je provesti osnovna ispitivanja čvrstoće tla i provoditi geotehničke simulacije cijelog procesa sloma uzorka tla: od početnog statičkog ili dinamičkog opterećenja, kroz slom uzorka sve do post-lomnog kretanja klizišta. Također je moguće mjeriti mobiliziranu posmičnu čvrstoću kao i post-lomnu posmičnu deformaciju i generirani porni pritisak.

Uređaj za prstenasto smicanje, ICL-1 (Slika 4.12) sastoji se od (Oštrić et al. 2014):

- sustava za pripremu uzoraka (ćelija za deaeriranje vode (Slika 4.13 a1), ćelija za deaeriranje uzorka (Slika 4.13 a2), vakuumska crpka (Slika 4.13 a2));

- sustava za kontrolu i upravljanje (Slika 4.13 b);
- jedinice za ispitivanje uzorka (Slika 4.13 c) (posmična ćelija i 3 servo motora: za normalno i posmično naprezanje te kontrolu razmaka);
- sustava za kontrolu i pohranjivanje podataka.



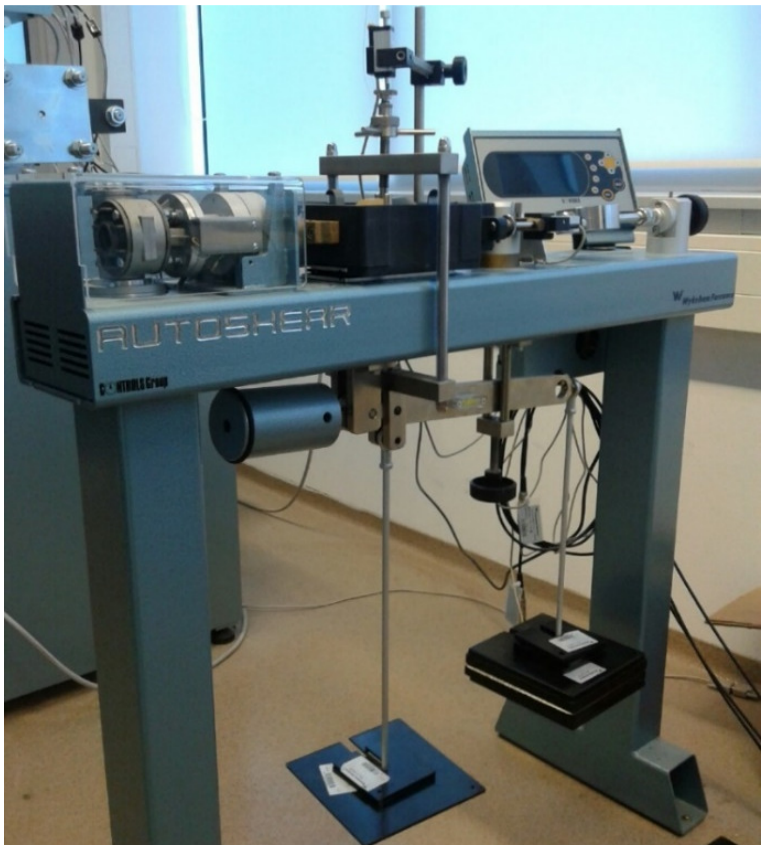
Slika 4.13 *Dijelovi uređaja za prstenasto smicanje, ICL-1: a) sustav za pripremu uzorka (a1) ćelija za deaeriranje vode, a2) ćelija za deaeriranje uzorka i vakuumska crpka), b) sustav za kontrolu i upravljanje, c) jedinica za ispitivanje uzorka, d) skica jedinice za ispitivanje uzorka (VD=senzor za mjerenje vertikalnog pomaka, SD=senzor za mjerenje posmičnog pomaka, GS=senzor za mjerenje razmaka, P=senzor za mjerenje pornog pritiska, N=ćelija za nanošenje normalnog naprezanja, S1 i S2=2 ćelije za mjerenje posmičnog otpora) (prema Sassa et al. 2004)*

Prije početka ispitivanja na uzorcima u uređaju za prstenasto smicanje, provode se početna ispitivanja: test propuštanja vode (eng. *water leakage test*) pri maksimalnom normalnom naprezanju i maksimalnoj brzini smicanja te provjera trenja između gornjeg i donjeg prstena i brtve (eng. *rubber edge friction test*). Oštrić et al. (2014) opisali su proceduru ispitivanja uređajem za prstenasto smicanje, ICL-1. Ispitivanje uzoraka može se izvoditi u suhim ili potpuno saturiranim uvjetima. Ukoliko se ispituje u potpuno saturiranim uvjetima, pripremljeni uzorak se prethodno vakumira i zatim ugrađuje u posmičnu ćeliju. Prije same ugradnje uzorka, posmična ćelija se prethodno ispunjava s CO_2 i deaeriranom vodom kako bi se postigla čim viša saturacija ćelije i uzorka. Nakon ugradnje uzorka slijedi cirkulacije vode kroz uzorak te provjera stupnja saturacije ćelije (Sassa 1988). Nakon konsolidiranja uzorka tla provode se ispitivanja u dreniranim ili nedreniranim uvjetima. Ispitivanja uz kontrolom brzine smicanja se koriste za utvrđivanje parametara tla, dok se ispitivanja kontrolom naprezanja koriste za simulaciju klizišta pokrenutih statičkim, cikličkim ili seizmičkim naprezanjem ili porastom razine podzemne vode (Sassa et al. 2014). Ispitivanje se može provoditi sve do postizanja stanja dinamičke ravnoteže (eng. *steady state*) kada se više ne događa slom kroz čestice tla, a posmično naprezanje i brzina smicanja su konstantni.

Uređaj za izravno smicanje

Ispitivanje tla uređajem za izravno smicanje provodi se prema standardu ASTM (2011) kako bi se odredila konsolidirana drenirana posmična čvrstoća tla. Uređaj za izravno smicanje, model 27-WF2160 tvrtke Controls, doniran je Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci 2015. godine (Slika 4.14) u sklopu projekta „Razvoj istraživačke infrastrukture na Kampusu Sveučilišta u Rijeci“.

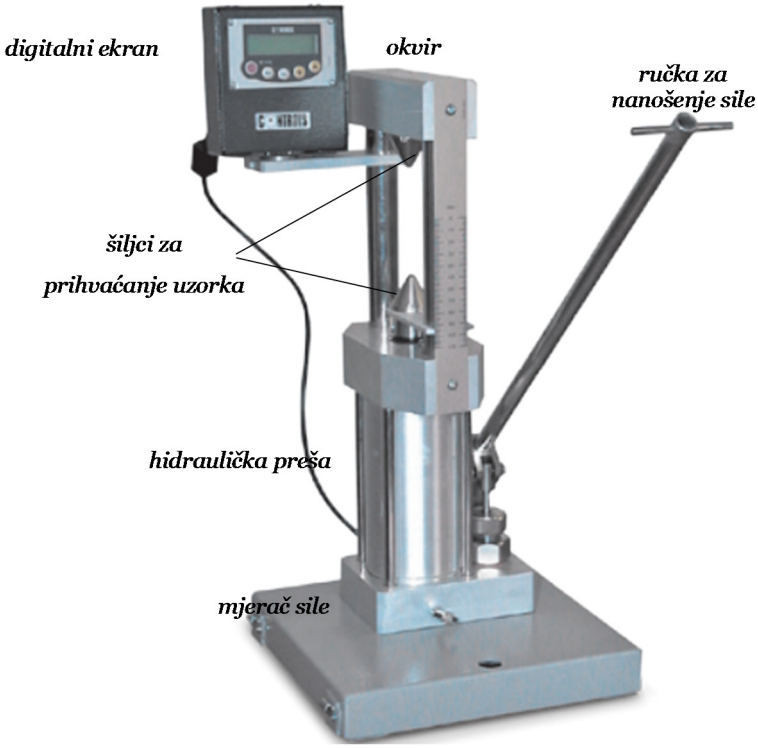
Pripremljeni uzorak tla se ugrađuje u posmičnu ćeliju površine 60x60 cm i opterećuje vertikalnim opterećenjem pomoću utega do maksimalno 5000 N. Uzorak se smiče brzinom od 0.00001 do maksimalno 11 mm/min sve do maksimalnog horizontalnog pomaka od 19 mm i maksimalne posmične sile od 5000 N. Uređaj ima mogućnost reversnog smicanja u maksimalno 9 ciklusa.



Slika 4.14 *Uređaj za izravno smicanje, model 27-WF2160 (Controls)*

4.4.3. Ispitivanje čvrstoće u točki (PLT) sitnozrnastih litoloških članova fliša

Kako se iz nepravilnih uzoraka uzetih na području istraživanja nisu mogle izbušiti odgovarajuće jezgre za jednoosno i troosno ispitivanje čvrstoće, čvrstoća intaktne stijene određena je ispitivanjem čvrstoće u točki (eng. *Point Load Test*), PLT metodom. Ispitivanje čvrstoće u točki je manje pouzdano od određivanja jednoosne tlačne čvrstoće na cilindričnim uzorcima, ali omogućuje brzo ispitivanje vrlo velikog broja manjih nepravilnih uzoraka dobivenih iz bušotine, sondažne jame ili otvorenog zasjeka bez dodatne obrade uzorka i neposredno po uzimanju uzorka. Uređaj za ispitivanje tlačne čvrstoće u točki se sastoji od hidrauličke preše za opterećenje uzorka i uređaja za mjerenje sile, a prikazan je na Slici 4.15.



Slika 4.15 *Uređaj za ispitivanje čvrstoće u točki PLT metodom*

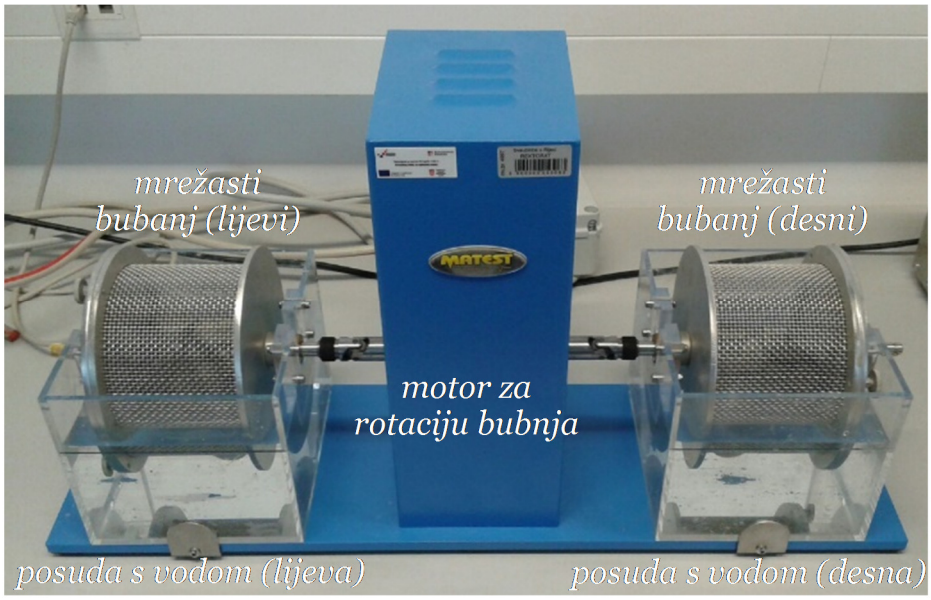
Ispitivanje čvrstoće u točki PLT metodom provi se prema standardu ISRM (1985). Prije pokusa provodi se mjerenje dimenzija uzorka. Uzorak se opterećuje jednolikim povećanjem sile na čeljusti do sloma u periodu od 10 do 60 sekundi. Ispitivanje se smatra potpunim ukoliko je obavljeno 5 do 10 pokusa na uzorcima iste stijenske mase. Reprezentativna vrijednost indeksa čvrstoće, $I_{S(50)}$, za uzorke nepravilnih dimenzija dobiva se grafički iz logaritamskog odnosa P i D_e^2. Interpolacijom linije kroz točke (P, D_e^2) određuje se sila P_{50} koja odgovara ekvivalentnom promjeru D_e^2=2500 mm² (D_e=50 mm). Uobičajeno se uzima da je jednoosna tlačna čvrstoća, σ_c, 20 do 25 puta veća od $I_{S(50)}$ (jednadžba 4.1).

$$20 \cdot I_{s(50)} < \sigma_c \leq 25 \cdot I_{S(50)} \qquad (4.1)$$

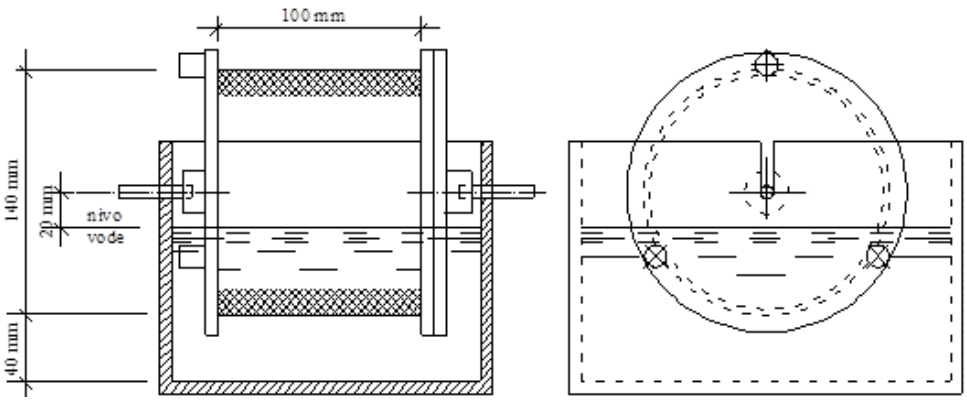
U ovom radu je računato da je jednoosna tlačna čvrstoća sitnozrnastih litoloških članova fliša, σ_c, 24 puta veća od vrijednosti indeksa čvrstoće, $I_{S(50)}$.

4.4.4. Postojanost sitnozrnastih litoloških članova fliša

Ispitivanje postojanosti stijene se provodi kako bi se procijenila otpornost uzorka stijene izloženog ciklusima sušenja i vlaženja na trošenje i dezintegraciju. Najčešće korišten pokus u tu svrhu je dinamički pokus određivanja postojanosti stijene (eng. *Slake Durability Test*). Prve standardizirane klasifikacije su bazirane na rezultatima nakon jednog ili dva ciklusa sušenja i vlaženja (Franklin & Chandra 1972; ISRM 1979; ASTM 2004), odnosno indeksu postojanosti, Id_1 ili Id_2 (eng. *Slake Durability Index*). Uređaj za ispitivanje postojanosti stijene (Slike 4.16) doniran je Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci 2015. godine u sklopu projekta „Razvoj istraživačke infrastrukture na Kampusu Sveučilišta u Rijeci“. Uređaj se sastoji od bubnja izrađenog od standardne cilindrične mreže s otvorima promjera 2,00 mm, dužine 100 mm i promjera 140 mm, s kruto oslonjenim bazama. Bubanj mora biti dovoljno čvrst da održi svoj oblik tijekom uporabe i mora izdržati temperaturu od 105 °C. Bubanj je oslonjen na posudu i omogućena je njegova rotacija oko horizontalne osi. Posuda se ispunjava tekućinom do 20 mm ispod osovine bubnja. Između posude i konture mreže bubnja ostavlja se prostor visine 40 mm (Slika 4.17). Za provođenje pokusa potrebna je i peć koja omogućava održavanje temperature od 105 °C te vaga osjetljivosti 1 g i kapaciteta 2.000 g (ASTM 2004).



Slika 4.16 *Uređaj za određivanje postojanosti stijene (eng. Slake Durability Test, SDT)*



Slika 4.17 *Presjek uređaja za određivanje postojanosti stijene (prema ASTM 2004)*

Postupak ispitivanja provodi se prema standardu ASTM (2004). Odabire se reprezentativni uzorak ukupne mase 450-550 g koji sadrži 10 odlomaka stijene pojedinačne mase 40-60 g. Maksimalna veličina zrna stijene ne smije biti veća od 3 mm. Odlomci trebaju biti približnog oblika kocke s zaobljenim rubovima. Uzorak se stavlja u bubanj i suši do konstantne mase pri temperaturi od 105°C, od 2 do 6 sati u pećnici. Nakon sušenja bubanj s uzorkom se hladi i vaganjem utvrđuje masa suhog uzorka (m_o). Bubanj se postavlja na posudu i spaja s motorom. Posuda je ispunjena destiliranom vodom sobne temperature 20°C, do razine 20 mm ispod osovine bubnja. Bubanj rotira brzinom od 20 rot/min u trajanju od 10 minuta. Nakon vrtnje bubanj s preostalim uzorkom se suši u pećnici na 105°C do konstantne mase, od 2 do 6 sati. Nakon sušenja bubanj s uzorkom se hladi i vaganjem utvrđuje masa preostalog suhog uzorka (m_n). Navedeni postupak se ponavlja u željenom broju ciklusa (n) te se indeks postojanosti, I_{dn} nakon odabranog broja ciklusa izračunava prema jednadžbi 4.2:

$$I_{dn} = \frac{m_n - m_b}{m_0 - m_b} \cdot 100[\%] \qquad (4.2)$$

gdje su: m_o - masa suhog uzorka prije n-tog ciklusa sušenja vlaženja;
m_n – masa preostalog suhog uzorka nakon n-tog ciklusa sušenja vlaženja;
m_b - masa bubnja.

Indeks postojanosti nakon dva ciklusa, I_{d2} je dobar pokazatelj postojanosti za većinu stijena te se koristi kao glavni parametar u više klasifikacija stijena s obzirom na postojanost, od kojih je najkorištenija klasifikacija prema Gamble (1971), prikazana u

Tablici 4.3. Niže vrijednosti indeksa ukazuju na mekše - slabo postojane stijene, dok više vrijednosti indeksa ukazuju na tvrđe - postojanije stijene.

Tablica 4.3 *Klasifikacija postojanosti intaktne stijene (Gamble 1971; Erguler & Shakoor 2009)*

Grupa stijene	Indeks postojanosti drugog ciklusa, Id_2 (%) (Gamble 1971)	Indeks raspadanja, D_R (Erguler & Shakoor 2009)
Izrazito visoka postojanost	> 98	0,96 – 1.00
Visoka postojanost	95 – 98	0,92 – 0,95
Srednje visoka postojanost	85 – 95	0.79 – 0,91
Srednja postojanost	60 – 85	0,50 – 0,78
Niska postojanost	30 – 60	0,20 – 0,49
Vrlo niska postojanost	< 30	0,00 – 0,19

Ovisno o značajkama stijene kao što su poroznost, propusnost i mineralni sastav, učinci trošenja se ponekad neće pokazati unutar dva ciklusa pa ovako predložena klasifikacija nije pogodna za sve vrste mekih stijene. Više autora (Gamble 1971; Martinez-Bofill et al. 2004; Erguler & Shakoor 2009; Miščević & Vlastelica 2011; Gulam 2012; Cano & Tomás 2015) ukazalo je da se postojanost meke stijene može pogodnije opisati nakon tri ili više broja ciklusa.

Cano & Tomás (2015) u svom istraživanju ukazali su na previsoke indekse postojanosti flišne stijenske mase nakon prvog i drugog ciklusa u odnosu na trošenja na terenu. Visoka vrijednost Id_2 se vizualno ne podudara s raspadnutim uzorkom preostalim u bubnju. Stoga ASTM (2004) uvodi osim indeksa postojanosti, Id_2, i kvalitativnu kategorizaciju komada materijala koji su ostali u bubnju nakon dva ciklusa.

Međutim, Erguler & Shakoor (2009) utvrđuju da predložene kategorije nisu dovoljno detaljne za poboljšanje klasifikacije te da indeks postojanosti Id_2 ne daje realne značajke trošenja fliša. Kako bi poboljšali kategorizaciju primjenjivu za različite tipove stijenske mase i ponašanje pri trošenju, Erguler & Shakoor (2009) kombiniraju rezultate ispitivanja postojanosti stijene s analizama granulometrijskih krivulja te uvode novi pojam indeksa raspadanja, D_R, kao pokazatelj utjecaja svakog ciklusa trošenja na granulometrijsku krivulju. Indeks raspadanja pojedinog ciklusa dobiva se iz odnosa površine ispod granulometrijske krivulje zadržane mase za pojedini ciklus i

ukupne površine koja obuhvaća cijeli raspon veličine zrna. Isti autori predlažu klasifikaciju pelitnih stijena na osnovu indeksa raspadanja, prikazanu u Tablici 4.3.

Cano & Tomás (2016) uvode modificirani indeks raspadanja, D_{RP}, te novi potencijalni indeks raspadanja, PDI, temeljen na odnosu promjene D_{RP}-a s ciklusima trošenja. Modificirani indeks raspadanja pojedinog ciklusa dobiva se iz odnosa površine ispod granulometrijske krivulje prolaska mase za pojedini ciklus i ukupne površine koja obuhvaća cijeli raspon veličine zrna. Korištenjem PDI može se utvrditi potencijalna dugotrajna degradacija uzorka te je stoga predložena i nova klasifikacija koja se dobro podudara s modelom trošenja i profilom trošenja predloženim prema Cano & Tomás (2015).

4.5. MINERALOŠKE ZNAČAJKE SITNOZRNASTIH LITOLOŠKIH ČLANOVA FLIŠA

Značajke sitnozrnastih sedimentnih stijena i njihovo ponašanje djelovanjem trošenja, uvjetovani su i njihovim mineralnim sastavom. Mineraloške analize su provedene korištenjem rendgenske difrakcije te je određen i kapacitet kationske zamjene za sitnozrnaste litološke članove fliša različitih stupnjeva trošnosti na uzorcima iz sjeverne Istre i doline Rječine.

4.5.1. Kapacitet kationske zamjene

Kapacitet kationske zamjene (CEC) je parametar koji ovisi o vrsti minerala glina prisutnim u stijenskoj masi (Tablica 4.4) i značajan je u određivanju ponašanja minerala glina, osobito za sposobnost upijanja vode. Kaolinski minerali imaju niski CEC i mogu vezati male količine kationa s pripadajućom vodom na površinu minerala. S druge strane, smektiti i vermikuliti imaju visoki CEC i mogu vezati velike količine zamjenjivih kationa s pripadajućom vodom ne samo na površinu minerala, već i u međuslojni prostor. Stoga, oni mogu upijati značajne količine vode čime utječu na stabilnost i plastičnost stijene ili tla koji sadrže te minerale (Attewell & Farmer 1976). CEC je određen saturiranjem uzoraka s Cu-trietilentetramin (Cu-trien) te mjerenjem

promjene boje spektrometrom. Izražen je kao srednja vrijednost tri mjerenja u jedinicama meq/100 g.

Tablica 4.4 *CEC za različite minerale glina* (Grim 1953)

Mineral gline	CEC [meq/100 g]
Kaolinit	3-15
Haloazit $2H_2O$	5-10
Haloazit $4H_2O$	10-40
Montmorillonit	80-150
Illit	10-40
Vermikulit	100-150
Klorit	10-40
Sepioilt/Atapulgit	20-30

4.5.2. Rendgenska difrakcijska analiza

Mineralni sastav uzoraka određen je primjenom rendgenske difrakcije na prahu pomoću Philipsovog difraktometra s CuKα zračenjem, grafitnim monokromatorom, automatskim divergentnim slitom i 0,1° ulaznim slitom. Napon i jakost struje za generiranje rendgenskih zraka iznosili su: U=40 kV i I=35 mA. Snimanje je provedeno se u *step-scan* modu, pri čemu je korak iznosio 0,02°2θ, a trajanje 1 s. Brzina snimanja bila je različita samo pri snimanju praha frakcije uzorka <2 μm u području oko 60°(2θ), te je iznosila 10 s po koraku.

4.5.3. Fazna analiza originalnog uzorka

Udio minerala u uzorcima određen je na temelju difraktograma originalnih uzoraka, te otapanjem puferom Na-acetat/octena kiselina (pri pH 5) koji otapa kalcit, te nakon otapanja HCl 1:1 koja otapa klorit. Na temelju otapanja određene su količine kalcita i klorita, a usporedbom s difraktogramima standarda određeni su ostali minerali (kvarc, plagioklasi i alkalijski feldspati, te svi minerali glina osim klorita). Difrakcijske slike praha neorijentiranih originalnih uzoraka, kao i netopivih ostataka nakon tretmana s puferom i nakon tretmana s kiselinom, snimljene su u području od 2 do 70°(2θ).

4.5.4. Fazna analiza frakcije čestica < 2 μm

Priprema uzoraka za faznu analizu frakcija čestica< 2 μm temelji se na metodama koje su opisali Whitting (1965) i Tributh (1989). Za uspješno determiniranje minerala glina potrebno je izdvojiti frakciju čestica <2 μm. Nakon mokrog sijanja na frakciju čestica <40 μm, uzorak je dispergiran (magnetna miješalica i ultrazvučna kupelj, te natrijev polisulfat), te je frakcija čestica <2 μm izdvojena izvlačenjem iz cilindra pri čemu su dubina i vrijeme izvlačenja određeni prema Stockesovom zakonu.

Po 40 mg frakcije <2 μm pojedinog uzorka prenijeto je u dvije kivete za centrifugu od 50 ml za saturaciju kationima i izradu dva preferirano orijentirana preparata. Orijentirani uzorci obje frakcije saturirani su kalijem i magnezijem. U jednu već pripremljenu kivetu za centrifugu dodano je 10 ml 4N otopine magnezijevog klorida ($MgCl_2$) i 40 ml destilirane vode, a u drugu 10 ml 4N otopine kalijevog klorida (KCl) i 40 ml destilirane vode. Nakon potresanja koje traje 24 h suspenzije su dva puta centrifugirane da bi se odstranili preostali KCl i $MgCl_2$. Nakon toga se pristupilo izradi preferirano orijentiranih preparata pomoću specijalnog aparata kojim je 25 ml suspenzije pomoću vakuuma prosisavano kroz poroznu keramičku pločicu (Knill & Jones 1965; Dümmler & Schröder 1965) promjera 12 mm. Na taj način za svaku frakciju uzorka napravljena su po dva preferirano orijentirana preparata, jedan saturiran kalijem i drugi saturiran magnezijem. Preparati su nakon izrade sušeni preko noći u eksikatoru konstantne vlažnosti od 63 %, koju održava amonijev nitrat (NH_4NO_3), budući da bi se sušenjem na zraku narušila njihova preferirana orijentacija. Nakon snimanja tako dobivenih preparata, preferirano orijentirani uzorci su preko noći ostavljeni u sušioniku na 70°C i to u eksikatoru u atmosferi etilen-glikola (Bradley 1945). Nakon snimanja uzoraka tretiranih etilen-glikolom, etilen-glikol je trebalo eliminirati izlaganjem malo povišenoj temperaturi. Uzorci saturirani kalijem tada su stavljeni u petrijevu zdjelicu na filter papir natopljen dimetil-sulfoksidom (DMSO), dobro zatvoreni aluminijskom folijom i grijani 48 h na 70°C, te nakon toga snimani. Uzorci saturirani magnezijem i oni saturirani kalijem žareni su 2 h na 300°C, a nakon toga i na 550°C.

Iz preostalog materijala frakcije <2 μm pripremljen je neorijentirani preparat uzorka. Difrakcijske slike praha neorijentiranih uzoraka frakcija čestica <2 μm dobivenih izvlačenjem i liofilizacijom, snimljene su u području od 2 do 70°(2θ). Zbog određivanja karaktera oktaedrijske mreže filosilikata snimljene su i difrakcijske slike u području od 58° do 64°(2θ) smanjenom brzinom kako je ranije navedeno. Brzina snimanja u području difrakcijskih maksimuma 060 morala je biti spora da bi se bolje razlučile slabe difrakcijske linije.

Snimljene su difrakcijske slike na sljedeći način tretiranih orijentiranih uzoraka frakcije čestica <2 μm:

(1) M – saturirani s Mg i sušeni u atmosferi saturiranoj otopinom amonijevog nitrata (NH_4NO_3);
(2) K – saturirani s K i sušeni u atmosferi saturiranoj otopinom amonijevog nitrata (NH_4NO_3) ;
(3) ME – saturirani s Mg i tretirani etilenglikolom;
(4) KE – saturirani s K i tretirani etilenglikolom;
(5) KD – saturirani s K i tretirani DMSO (dimetil-sulfoksid) ;
(6) MT3 – saturirani s Mg i žareni 2h na temperaturi od 300°C;
(7) MT5 – saturirani s Mg i žareni 2h na temperaturi od 550°C;
(8) KT3 – saturirani s K i žareni 2h na temperaturi od 300°C;
(9) KT5 – saturirani s K i žareni 2h na temperaturi od 550°C.

Difrakcijske slike orijentiranih uzoraka saturiranih s Mg i K snimane su u rasponu od 2 do 40°(2θ). Uzorci saturirani etilenglikolom snimani su u rasponu od 2 do 26°(2θ), oni saturirani s DMSO snimani su u rasponu od 2 do 32°(2θ), dok su žareni uzorci snimani u rasponu od 2 do 14°(2θ).

4.5.5. Kriteriji za prepoznavanje i definiranje minerala glina

Minerali glina određeni su prema metodama koje navode Thorez (1975), Brown (1961), Brindley & Brown (1980), Moore & Reynolds (1997), Wilson (1987). Kriteriji na temelju kojih se razlikuju pojedini minerali glina prikazani su u Tablici 4.5 i opisani u daljnjem tekstu.

Tablica 4.5 *Kriteriji identifikacije minerala glina prema veličini međumrežnog razmaka refleksa 001 (u angstremima = Å) (Mileusnić 2007)*

MINERAL	prirodni	Mg	K	Mg_EG	K_EG	K_DMSO	Mg_300°C	Mg_550°C
Serpentin	7	7	7	7	7	7	nema promjene	nestaje
Kaolinit	7	7	7	7	7	7*; ~11**	nema promjene	nestaje
Haloazit	10	10	10	10	10	10	7	nestaje
Illit	10	10	10	10	10	10	10	10
Kloriti („primarni“)	14	14	14	14	14	14	14	14↑
Kloriti („sekundarni“)	14	14	14	14	14	14	14	nestaje
Vermikuliti	14	14	10	14	10	10	10+	10
Vermikuliti („ekspandibilni“)	10-15	14	10	17	10	10	10+	10
Smektiti	10-15	14	10-14	17	17	19	10	10

*Mg = uzorak saturiran magnezijem, K = uzorak saturiran kalijem, Mg_EG = uzorak saturiran magnezijem i tretiran etilenglikolom; K_EG = uzorak saturiran kalijem i tretiran etilenglikolom, DMSO = uzorak saturiran kalijem i tretiran dimetilsulfoksidom, 300°C = uzorak žaren na 300°C, 550°C = uzorak žaren na 550°C, * = loše kristalizirani kaolinit, ** = dobro kristalizirani kaolinit, + = difrakcijski maksimum na 10 Å je proširen, ↑ = difrakcijski maksimum na oko 14 Å je pojačan*

Za kvalitativno određivanje prisutnih minerala glina, prvi korak je usporedba difrakcijskih maksimuma orijentiranih uzoraka granulometrijske frakcije <2 µm istraživanog uzorka, jednog saturiranog kalijem i drugog saturiranog magnezijem. Ekspandibilni minerali (smektit i/ili vermikulit) nakon saturacije magnezijem imaju difrakcijski maksimum na oko 14 Å, dok nakon saturacije kalijem više ili manje kontrahiraju. Uobičajeno je kontrakcija vermikulita saturiranog kalijem potpuna (međumrežni razmak iznosi 10 Å), dok se smektiti kontrahiraju najčešće nepotpuno (međumrežni razmak iznosi 10-14 Å). Drugi korak, solvatacija etilenglikolom uzorka saturiranog magnezijem razlikuje smektite (ekspandiraju) od vermikulita (ne ekspandiraju). Solvatacija etilenglikolom ekspandira smektite saturirane magnezijem, kao i one saturirane kalijem. Treba naglasiti da su u sedimentnim, te osobito u pedogenetskim okolišima česti i vermikuliti koji ekspandiraju (eng. *soil vermiculites*). U slučaju njihovog prisustva, preparati saturirani magnezijem pokazuju pomake na niže difrakcijske kuteve, dok oni saturirani kalijem ostaju kontrahirani. Treći korak je solvatacija dimetilsulfoksidom kalijem saturiranog preparata koja dokazuje prisustvo dobro kristaliziranog kaolinita budući, da kaolinit u uzorku tim tretmanom ekspandira

na 11.2 Å. Žarenjem dolazi do dehidratacije, dehidroksilacije, a na visokim temperaturama (> 950°C) destrukcije i kristalizacije novih faza. Refleks 001 dobro kristaliziranog klorita („primarni klorit“) žarenjem na 550°C pomiče se blago na više difrakcijske kuteve (6,3-6,4°2θ), te mu se intenzitet pojačava, što je i dokaz prisustva klorita u uzorku. Intenzitet ostalih difrakcijskih linija 00l klorita se nakon žarenja bitno smanjuje ili te linije više nisu registrirane. Nakon žarenja na 550°C, klorit nastao trošenjem („sekundarni klorit“) ne pokazuje difrakcijski maksimum 001, a promjena kutnih položaja linija čistog illita se ne uočava.

Kutni položaji refleksa 060 dioktaedrijskih i trioktaedrijskih filosilikata se razlikuju jer duljina parametra b jedinične ćelije jako ovisi o veličini oktaedrijskih kationa. Budući da su dvovalentni kationi u trioktaedrijskim strukturama (npr. Mg2+) veći od trovalentnih kationa (npr. Al3+) u dioktaedrijskim strukturama, dioktaedrijski minerali glina imaju nižu vrijednost d(060). Pri interpretaciji treba imati na umu moguću prisutnost kvarca u uzorku čija se difrakcijska linija 211 nalazi na 60,00°2θ(d = 1,541 Å), te se poklapa s linijama 060 trioktaedrijskih minerala glina. U tom slučaju važno je pogledati postoji li difrakcijska linija kvarca 112 na 50,18°2θ(d = 1,818 Å) koja je vrlo bliskog intenziteta kao i ona na 60,00°2θ(d = 1,541 Å).

4.6. POSTUPAK I REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA

U nastavku je prikazan postupak i rezultati laboratorijskih ispitivanja promjene geotehničkih i mineraloških značajki uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša na području istraživanja sa stupnjem trošnosti.

4.6.1. Utjecaj trošenja na geotehničke značajke sitnozrnastih litoloških članova fliša

Utjecaj trošenja na fizičko mehaničke značajke (specifična gustoća, granulometrijski sastav, Atterbergove granice), rezidualnu posmičnu čvrstoću, čvrstoću u točki i postojanost sitnozrnastih litoloških članova fliša iz područja istraživanja prikazan je i komentiran u nastavku.

4.6.1.1. Postupak i rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša

In situ ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće Schmidtovim čekićem provedeno je na izdanku flišne stijenske mase I (FR), II (SW) i III (MW) stupnja trošnosti u Istri.

Značajna promjena boje iz sive u smeđu ukazuje na granicu između dviju zona trošnosti stijenske mase u kojima se Schmidtov čekić može upotrijebiti. Pokus Schmidtovim čekićem primjenjiv je na svježim do srednje trošnim sitnorznastim litološkim članovima flišne stijenske mase, ali ne i na dezintegriranoj stijenskoj masi poput jako do potpuno trošnih sitnozrnastih litoloških članova fliša.

Korelacijom odskočne vrijednosti Schmidtovog čekića dobivena je jednoosna tlačna čvrstoća sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase iz Istre različitih stupnjeva trošnosti prikazana u Tablici 4.6. Jednoosna tlačna čvrstoća dobivena pokusom Schmidtovim čekićem za sitnoznaste litološke članova flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti iznosi 43 MPa, za II (SW) stupanj trošnosti 24 MPa te za III (MW) stupanj trošnosti 19 MPa.

Tablica 4.6 *Terenska (in situ) odskočna vrijednost Schmidtovog čekića sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase iz Istre različitih stupnjeva trošnosti*

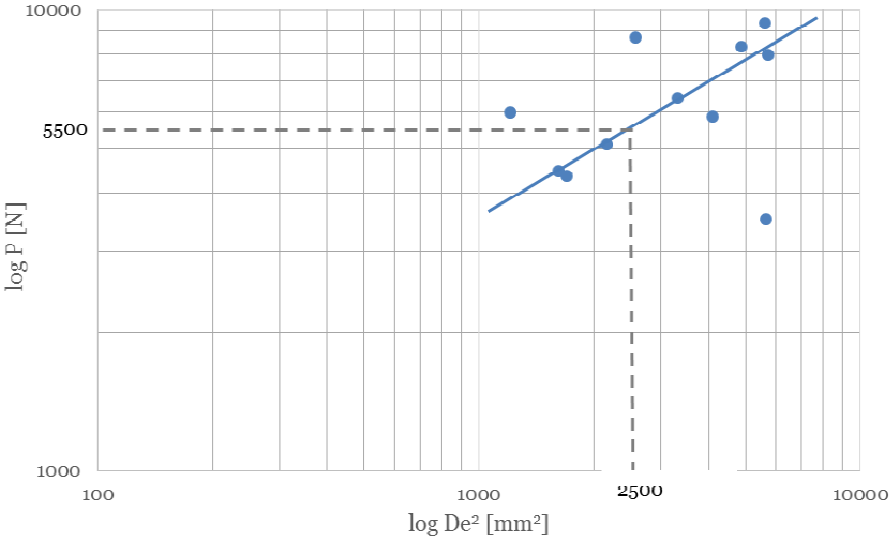
Broj mjerenja	Stupanj trošnosti sitnozrnastih litoloških članova fliša				
	I (FR)	II (SW)	III (MW)	IV (HW)	V (CW)
	Odskočna vrijednost Schmidtovog čekića				
1	28	16	11	NP	NP
2	22	18	12		
3	24	16	14		
4	24	17	12		
5	28	20	10		
6	24	18	11		
7	26	19	14		
8	28	19	13		
9	26	19	11		
10	30	16	12		
11	32	22	11		
12	30	18	12		
13	26		5		
14	26		10		
	Srednja vrijednost odskočne vrijednosti, R				
	27	18	12	NP	NP
	Korigirana srednja vrijednost odskočne vrijednosti, R_{corr}				
	26,2	14,9	10,9	NP	NP
	Jednoosna tlačna čvrstoća, σ_{ci} (MPa) min.-sred.-max.				
	35-43-53	21-24-28	17-19-21	NP	NP

NP=nije primjenjivo

Ispitivanje tlačne čvrstoće u točki PLT metodom izvršeno je na nepravilnim uzorcima I (FR) i III (MW) stupnja trošnosti dobivenih s flišnih izdanaka u Istri neposredno nakon uzorkovanja čime je izbjegnut utjecaj trošenja.

Rezultati ispitivanja PLT metodom na uzorcima sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase iz Istre I (FR) stupnja trošnosti prikazani su u Tablici 4.7 te III (MW) stupnja trošnosti u Tablici 4.8. Na Slikama 4.18 i 4.19 prikazani su dijagrami za grafičko određivanje sile sloma za D_e= 50 mm redom za sitnozrnaste litološke članove fliša I (FR) i III (MW) stupnja trošnosti.

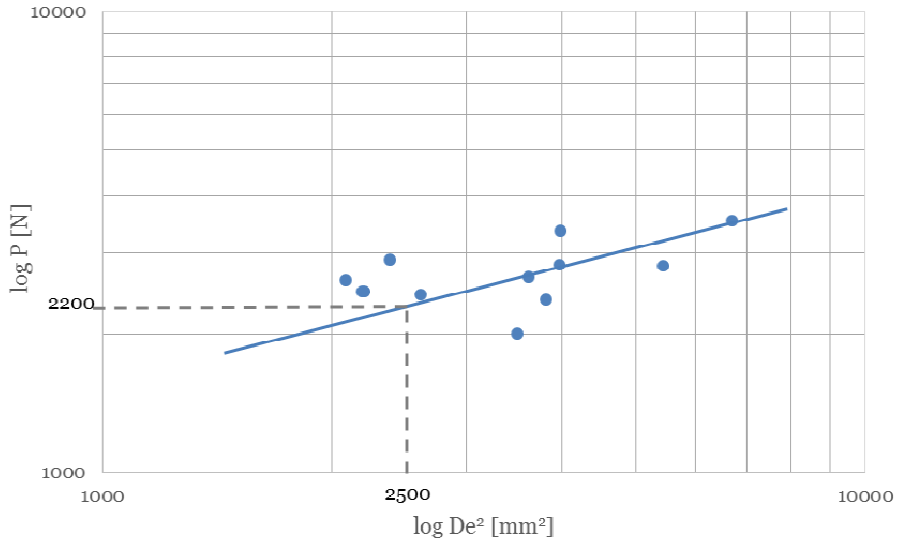
Jednoosna tlačna čvrstoća dobivena PLT metodom za sitnozrnasti litološki član fliša I (FR) stupnja trošnosti iznosi 53 MPa i za III (MW) stupnja trošnosti 21 MPa.



Slika 4.18 *Grafičko određivanje $I_{s(50)}$ iz seta rezultata (D_e, P) pri ispitivanju PLT sitnozrnastih litoloških članova fliša I (FR) stupnja trošnosti iz Istre*

Tablica 4.7 *Čvrstoća sitnozrnastih litoloških članova fliša I (FR) stupnja trošnosti iz Istre dobivena ispitivanjem PLT*

Ref.	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka (mm)			Ekvivalentne dimenzije (mm)		Sila sloma [N]	Sila sloma za D_e=50 mm [N]	Korigirana čvrstoća u točki [MPa]	Usvojeni faktor pretvorbe	Jednoosna tlačna čvrstoća [MPa]
		D	W_1	W_2	We	De²	P	P_{50}	$Is_{(50)}$	K	σ_c
1	I (FR)	43,2	107,3	70,4	2200	0,88	24	5.500	2,2	24	**52,8**
2		33,2	55,7	66,1	60,91	2570,88	8730				
3		74,3	131,8	127,9	129,8	12281,1	7340				
4		33,9	42,3	32,7	37,48	1617,74	4480				
5		30,4	105,0	106,9	105,9	4096,33	5870				
6		40,0	42,3	42,6	42,41	2159,92	5110				
7		34,3	78,0	74,4	76,20	3325,66	6440				
8		35,9	34,8	39,4	37,09	1694,19	4360				
9		52,0	87,1	82,4	84,74	5613,74	9390				
10		57,4	94,1	60,7	77,39	5651,04	3510				
11		29,1	26,5	38,8	32,62	1207,37	6010				
12		44,4	93,4	109,0	101,2	5715,14	8000				



Slika 4.19 *Grafičko određivanje $I_{s(50)}$ iz seta rezultata (D_e, P) pri ispitivanju PLT sitnozrnastih litoloških članova fliša III (MW) stupnja trošnosti iz Istre*

Tablica 4.8 *Čvrstoća sitnozrnastih litoloških članova fliša III (MW) stupnja trošnosti iz Istre dobivena ispitivanjem PLT*

Ref.	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka (mm)			Ekvivalentne dimenzije (mm)		Sila sloma [N]	Sila sloma za D_e=50 mm [N]	Korigirana čvrstoća u točki [MPa]	Usvojeni faktor pretvorbe	Jednoosna tlačna čvrstoća [MPa]
		D	W_1	W_2	We	De²	P	P_{50}	$Is_{(50)}$	K	σ_c
1	III (MW)	39,1	45,2	43,3	44,21	2202,94	2470	2.200	0,88	24	**21,12**
2		30,6	77,6	56,7	67,16	2613,87	2440				
3		35,1	84,5	72,1	78,32	3495,96	2000				
4		32,6	45,9	59,7	52,79	2187,83	2470				
5		30,4	93,9	93,7	93,82	3625,28	2660				
6		51,2	91,2	114,4	102,81	6696,93	3520				
7		27,5	119,0	107,8	113,40	3970,60	2820				
8		36,4	88,8	76,0	82,42	3814,58	2370				
9		53,0	54,3	106,8	80,54	5429,85	2810				
10		28,6	98,7	119,7	109,2	3981,20	3350				
11		35,1	61,8	44,7	53,28	2379,54	2900				
12		23,8	62,6	75,3	68,95	2084,86	2610				

Laboratorijskim i terenskim ispitivanjem uzoraka sitnozrnastih litloških članova flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti korištenjem PLT, odnosno pokusa Schmidtovim čekićem dobivene su vrijednosti čvrstoće sitnozrnastih litloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti. Rezultati ispitivanja PLT na nepravilnim uzorcima pokazuju dobru podudarnost s rezultatima *in situ* pokusa Schmidtovim čekićem. Za trošnije sitnozrnaste litloške članove fliša, IV (HW),V (CW) i VI (RS) stupnja trošnosti,

čija je jednoosna tlačna čvrstoća manja od 17 MPa dobivaju se dvosmisleni i višeznačni rezultati pa te metode nisu primjenjive. Stupnjevi trošnosti sitnozrnastih litloških članova fliša od I do VI stupnja trošnosti određeni su na temelju Brownovih (1981) opisa stupnjeva trošnosti dok su stupnjevi trošnosti od R3 do R0 određeni na temelju Marinos & Hoek (2001) terenske procjene jednoosne tlačne čvrstoće.

Opisi, karakteristike i jednoosna tlačna čvrstoća za sitnozrnaste litološke članove flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz Istre prikazani su u Tablici 4.9.

Tablica 4.9 *Opisi, karakteristike i raspon jednoosne tlačne čvrstoće za sitnozrnaste litološke članove fliša različitih stupnjeva trošnosti iz Istre*

Termin	Simbol	Stupanj trošnosti (Brown 1981; Marinos & Hoek 2001)	Opis i karakteristike sitnozrnastih litoloških članova fliša	σ_{ci} (MPa) min.-sr.-max.	σ_{ci} (MPa)
Svježa	FR	I R3	Sivi, svježi intaktni sitnozrnasti litološki član fliša. Nema znakova trošenja. Blaga promjena boje duž pukotina. Vodonepropusan. Razbijanje uzorka zahtjeva više od jednog udarca geološkim čekićem. Vidljiva originalna struktura stijene.	35-43-53	53
Slabo trošna	SW	II R2, R3	Svijetlo sivi sitnozrnasti litološki član fliša sa smeđim pukotinama i malom vodopropusnosti diskontinuiteta. Vodonepropusan. Uzorak se ne može zarezati nožem, ali se može razbiti jednim udarcem geološkog čekića. Vidljiva originalna struktura stijene.	21-24-28	-
Srednje trošna	MW	III R2	Sivi do smeđi sitnozrnasti litološki član fliša sa smeđim pukotinama i malom vodopropusnosti diskontinuiteta. Uzorak se može zarezati nožem uz teškoće, a pojedini odlomci se mogu razbiti laganim udarcima geološkog čekića. Vidljiva originalna struktura stijene.	17-19-21	21
Jako trošna	HW	IV R1	Smeđi sitnozrnasti litološki član fliša s učestalim mikropukotinama i smeđom površinom. Visoka vodopropusnost diskontinuiteta. Uzorak se raspada pri laganom udarcu geološkog čekića i može se rezati nožem. Vidljiva originalna struktura stijene.	<17 NP	NP
Potpuno trošna	CW	V R0	Svijetlo smeđe prahovit-glinovito tlo pomiješano s ostacima sitnozrnastih litoloških članova fliša. Odlomci se mogu razbiti rukom. Vidljiva originalna struktura stijene.	NP	NP
Rezidualno tlo	RS	VI R0	Smeđi debritni materijal sitnozrnastih litoloških članova fliša pomiješan s glinovito, prahovitim sitnozrnastim litološkim članom fliša. Komadi se mogu razbiti rukom.	NP	NP

- = nije ispitano
NP = nije primjenjivo

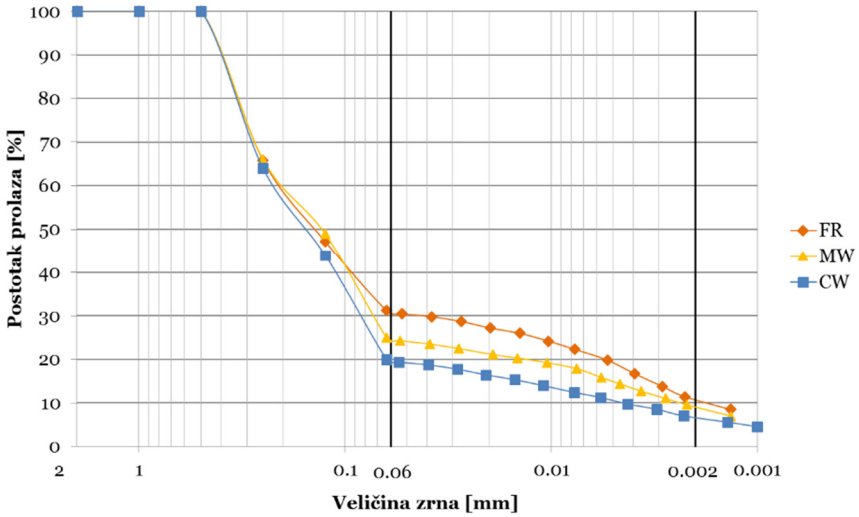
4.6.1.2. Postupak i rezultati ispitivanja fizičko mehaničkih značajki sitnozrnastih litoloških članova fliša

Ispitane su fizičko mehaničke značajke: specifična gustoća piknometrom, granulometrijski sastav suhim postupkom sijanja i areometriranjem, Atterbergove granice Casagrandeovom zdjelicom na smrvljenim uzorcima sitnozrnastih litoloških članova fliša iz cijelog područja istraživanja, redom:

- sitnozrnasti litološki članovi fliša I (FR), III (MW) i V (CW) stupnja trošnosti uzorkovani na flišnom izdanku u Istri;
- istaložene naslage podrijetlom iz fliša II/I (SW/FR) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti uzorkovane na dnu akumulacije Valići u dolini Rječine;
- sitnozrnasti litološki članovi fliša I (FR) stupnja trošnosti iz jezgre bušotine te II (SW), III/IV (MW/HW) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti uzorkovani na bliskim izdancima flišne stijenske mase u dolini Rječine;
- sitnozrnasti litološki članovi fliša II/I (SW/FR) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti uzorkovani na flišnom izdanku u Vinodolskoj dolini.

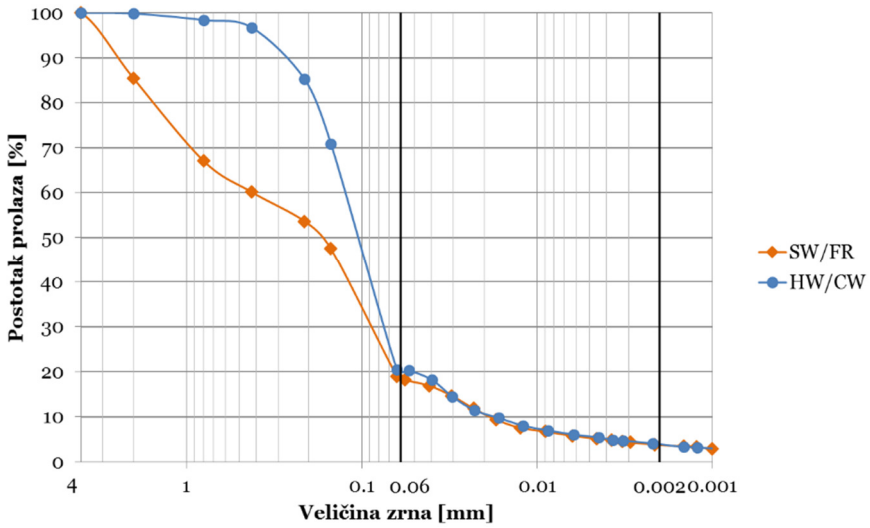
Rezultati ispitivanja fizičko mehaničkih značajki uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša iz područja istraživanja prikazani su u nastavku.

Granica tečenja uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša iz Istre kreće se u granicama od 24 do 35 %, a granica plastičnosti od 15 do 27 %. Indeks plastičnosti raste sa stupnjem trošnosti, od 9 % za svježu stijenu do 18% za potpuno trošnu stijenu. Svježa i srednje trošna stijenska masa sadrže 10-11 % glinovitih čestica dok potpuno trošna stijenska masa sadrži manju količinu glinovitih čestica i to 7 % (Slika 4.20).



Slika 4.20 *Granulometrijska krivulja sitnozrnastih litoloških članova fliša I (FR), III (MW) i V (CW) stupnja trošnosti uzorkovanih na izdanku flišne stijenske mase u Istri*

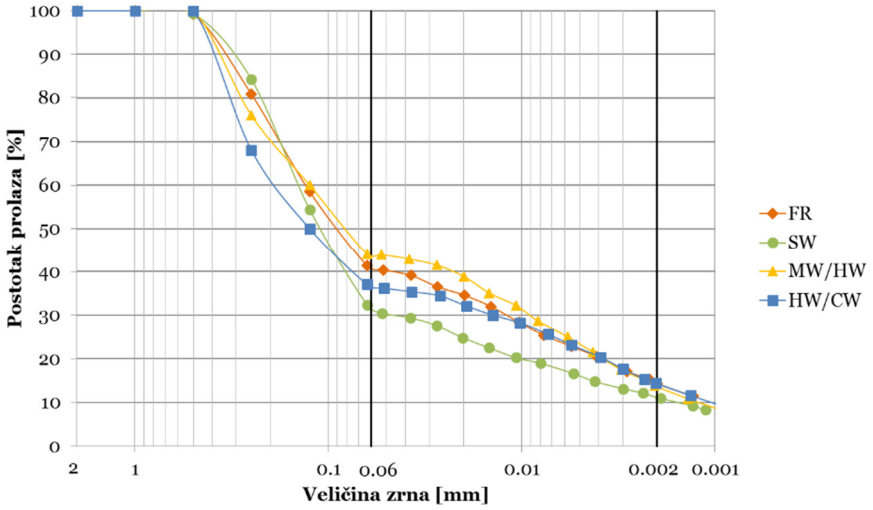
Uzorci istaloženih naslaga podrijetlom iz flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti s dna akumulacije Valići u doline Rječine ne pokazuju plastično ponašanje jer sadrže samo 4 % glinovitih čestica (Slika 4.21).



Slika 4.21 *Granloumetrijska krivulja istaloženih naslaga podrijetlom iz flišne stijenske mase II/I (SW/FR) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti uzorkovanih na dnu akumulacije Valići u doline Rječine*

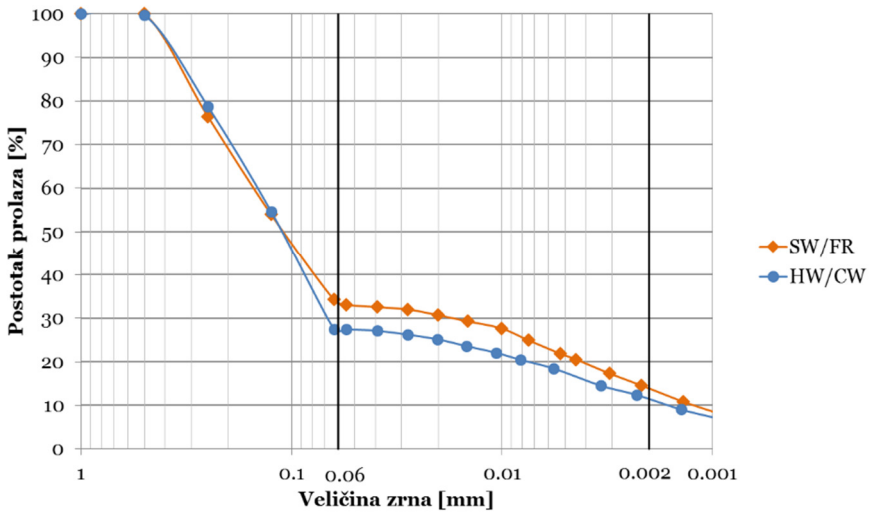
Uzorci iz flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz doline Rječine pokazuju plastičnije ponašanje od uzoraka iz Istre. Granica tečenja je u granicama od 31 do 38 % dok je granica plastičnosti u granicama od 18 do 20 %. Indeks plastičnosti raste sa stupnjem trošnosti, od 13 % za svježu stijenu do 20 % za potpuno trošnu stijenu. Sadržaj glinovitih čestica je za sve stupnjeve trošnosti flišne stijenske mase jednak i

iznosi 14 %, osim kod uzoraka II (SW) stupnja trošnosti gdje je postotak glinovitih čestica manji i iznosi 11 % (Slika 4.22).



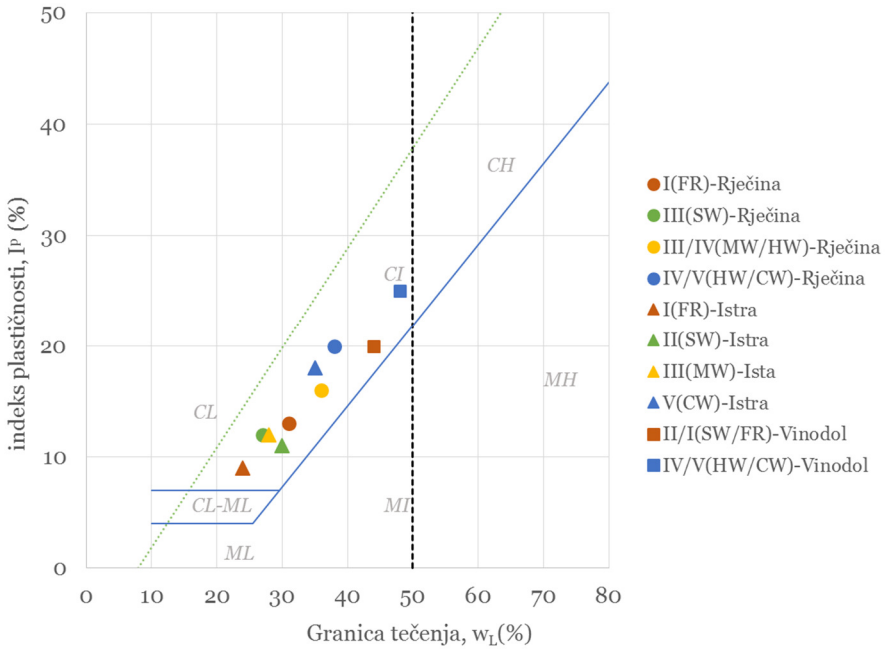
Slika 4.22 *Granuloumetrijska krivulja sitnozrnastih litoloških članova fliša I (FR), II (SW), III/IV (MW/HW) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti uzorkovanih na izdancima flišne stijenske mase u dolini Rječine*

Ispitani su i uzorci iz flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti s izdanka u Vinodolskoj dolini. Za svježu stijensku masu je granica tečenja 44 % i granica plastičnosti 24 % dok je za trošnu stijensku masu granica tečenja 48 % i granica plastičnosti 23 %. S porastom trošenja stijenske mase raste i indeks plastičnosti s 20 na 25 %. Svježa stijenska masa sadrži 14 % glinovitih čestica dok trošna stijenska masa sadrži neznatno manju količinu glinovitih čestica i to 12 % (Slika 4.23).



Slika 4.23 *Granuloumetrijska krivulja sitnozrnastih litoloških članova fliša II/I (SW/FR) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti uzorkovanih na izdanku flišne stijenske mase u Vinodolskoj dolini*

Na Slici 4.24 prikazan je dijagam plastičnosti svih uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti s područja istraživanja. Svi uzorci sitnornastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti s područja istraživanja pripadaju nisko plastičnim glinama (CL).



Slika 4.24 *Dijagram plastičnosti sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti s područja istraživanja*

Specifična gustoća ne pokazuje promjene vrijednosti s trošnosti i njena se vrijednost kreće u granicama od 2,51 do 2,71. Aktivnost gline raste s porastom stupnja trošnosti.

Pregled rezultata ispitivanja geotehničkih značajki uzoraka fliša različitih stupnjeva trošnosti s područja istraživanja dan je u Tablicama 4.10 – 4.13.

Tablica 4.10 *Geotehničke značajke uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na izdanku flišne stijenske mase u Istri*

Simbol	Opis	Granulometrijski sastav [%]			Atterbergove granice [%]			Aktivnost gline	Specifična gustoća
		0.5-0.063 mm	0.063-0.002 mm	<0.002 mm	w_L	w_P	IP	A	(G_s)
FR	Svježi	69	20	11	24	15	9	0,82	2,65
MW	Srednje trošan	75	15	10	28	16	12	1,2	2,62
CW	Potpuno trošan	80	13	7	35	17	18	2,57	2,58

Tablica 4.11 *Geotehničke značajke uzoraka istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša različitih stupnjeva trošnosti s dna akumulacije Valići u doline Rječine*

Simbol	Opis	Granulometrijski sastav [%]			Atterbergove granice [%]	Specifična gustoća
		0.5-0.063 mm	0.063-0.002 mm	<0.002 mm		(G_s)
SW/FR	Slabo trošan/ Svježi	81	15	4	Nije plastičan	2,51
HW/CW	Jako/ Potpuno trošan	79	17	4	Nije plastičan	2,62

Tablica 4.12 *Geotehničke značajke uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na izdancima flišne stijenske mase u dolini Rječine*

Simbol	Opis	Granulometrijski sastav [%]			Atterbergove granice [%]			Aktivnost gline	Specifična gustoća
		0.5-0.063 mm	0.063-0.002 mm	<0.002 mm	w_L	w_P	IP	A	(G_s)
FR	Svježi	59	27	14	31	18	13	0,93	2,67
SW	Slabo trošan	68	21	11	27	15	12	1,09	2,71
MW/HW	Srednje/Jako trošan	56	30	14	36	20	16	1,14	2,62
HW/CW	Jako/ Potpuno trošan	63	23	14	38	18	20	1,43	2,66

Tablica 4.13 *Geotehničke značajke uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na izdanku flišne stijenske mase u Vinodolskoj dolini*

Simbol	Opis	Granulometrijski sastav [%]			Atterbergove granice [%]			Aktivnost gline	Specifična gustoća
		0.5-0.063mm	0.063-0.002mm	<0.002 mm	w_L	w_P	IP	A	(G_s)
SW/FR	Slabo trošan/Svježi	66	20	14	44	24	20	1,43	2,68
HW/CW	Jako/ Potpuno trošan	72	16	12	48	23	25	2,08	2,63

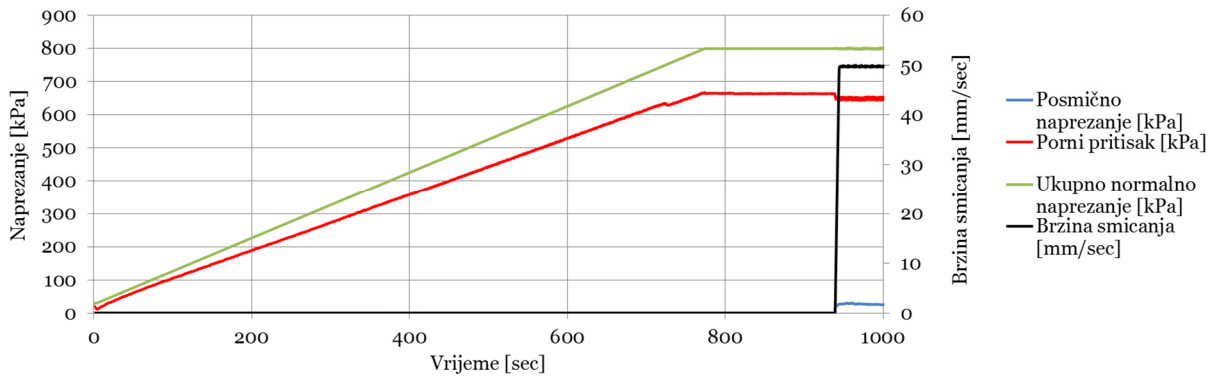
Uzorci sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti s flišnog izdanka u Vinodolskoj dolini su znatno plastičniji od ostalih ispitanih uzoraka na području istraživanja. Iz rezultata fizičko mehaničkih značajki tla, uočen je značajan porast granice tečenja, indeksa plastičnosti i aktivnosti gline s porastom stupnja trošnosti na svim lokacijama područja istraživanja.

4.6.1.3. Postupak i rezultati ispitivanja rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša u uređaju za prstenasto smicanje

U nastavku su prikazani rezultati ispitivanja rezidualne posmične čvrstoća na smrvljenim uzorcima:

- sitnozrnastih litoloških članova fliša I (FR), III (MW) i V (CW) stupnja trošnosti uzorkovanih na izdanku u Istri;
- istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša II/I (SW/FR) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti, s dna akumulacije Valići u dolini Rječine.

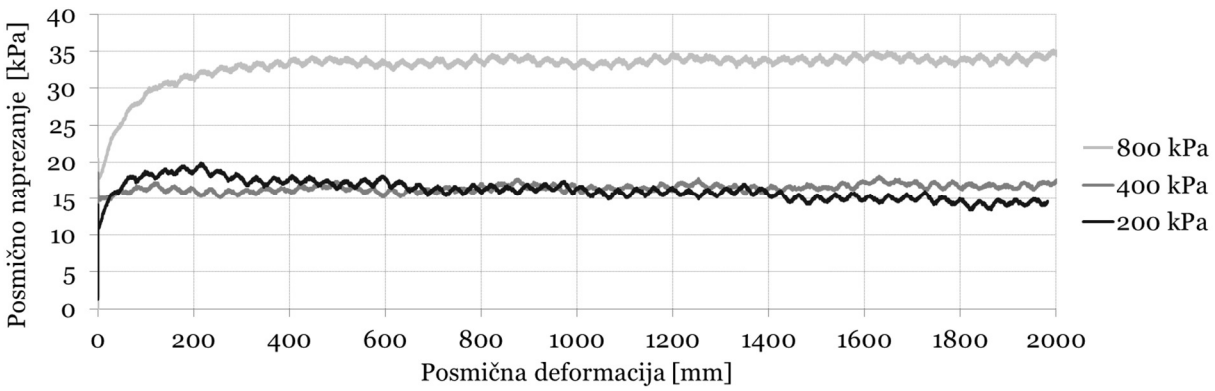
Prije ispitivanja pripremljenih uzoraka provedena su inicijalna ispitivanja na vodi, a to su test propuštanja vode te ispitivanje trenja između gornjeg i donjeg para brtve. Slika 4.25 prikazuje rezultat ispitivanja propuštanja vode iz koje je vidljivo da pri maksimalnoj brzini od 5,4 cm/s, ukupnom maksimalnom normalnom naprezanju od 800 kPa i kontaktnom naprezanju od 1,0 kN ne dolazi do propuštanja vode niti iz vanjskog niti iz unutarnjeg prstena. Stoga se sva daljnja ispitivanja na uzorcima fliša provode pri kontaktnom naprezanju od 1,0 kN.



Slika 4.25 *Dijagram promjene posmičnog naprezanja, normalnog naprezanja, brzine smicanja i pornog pritiska u vremenu pri ispitivanju propuštanja vode (eng. water leakage test)*

Rezultati ispitivanja trenja između gornjeg i donjeg para brtvi prikazani su na Slici 4.26. Iznos trenja, odnosno posmičnog otpora između gornjeg i donjeg para brtvi pri kontaktnom naprezanju od 1,0 kN ovisi o veličini normalnog naprezanja. Za vrijednost normalnog naprezanja od 200 kPa, trenje između gornjeg i donjeg prstena iznosi 15 kPa, za normalno naprezanje od 400 kPa ono iznosi 17 kPa, dok je trenje pri normalnom naprezanju od 800 kPa najveće i iznosi 33 kPa. Dobiveni ukupni posmični

otpor izmjeren tijekom smicanja uzorka je potrebno umanjiti za vrijednost trenja brtve kako bi se dobila realna vrijednost posmičnog otpora tla.



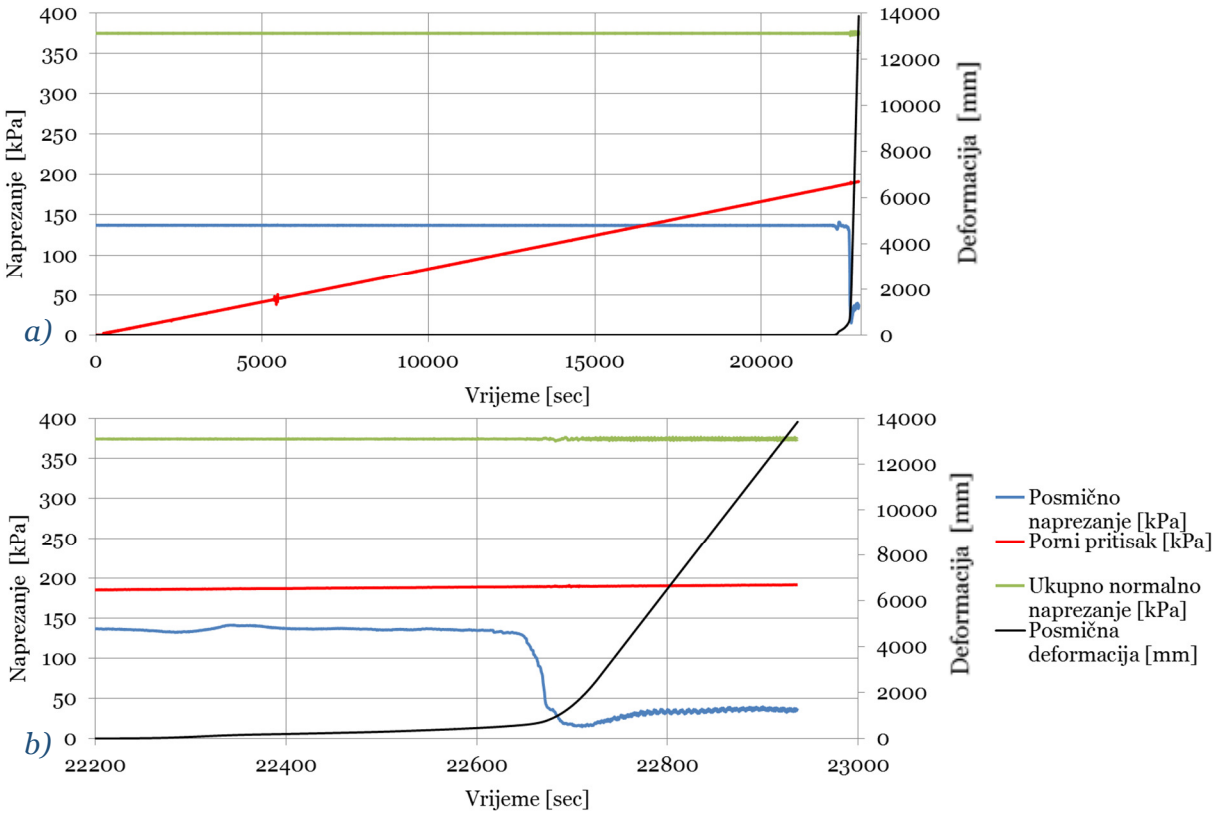
Slika 4.26 *Dijagram posmično naprezanje - posmična deformacija pri ispitivanju trenja brtve pri ukupnom normalnom naprezanju od 200, 400 i 800 kPa*

Nakon provedenih inicijalnih ispitivanja, pristupilo se ispitivanju laboratorijski pripremljenih uzoraka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti s različitih lokacija na području istraživanja. Laboratorijski smrvljeni uzorci su u potpunosti saturirani destiliranom vodom i zatim deaerirani u vakumskoj ćeliji, ugrađeni u posmičnu ćeliju te nakon kontrole saturacije i konsolidacije, smaknuti uz kontrolu pornih pritisaka ili kontrolu brzine smicanja.

Rezidualna posmična čvrstoća uzoraka flišne stijenske mase stupnja trošnosti I (FR), III (MW) i V (CW) s flišnog izdanka u Istri ispitana je u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu pornih pritisaka. Nakon kontrole saturacije uzorka, uzorak je konsolidiran na inicijalno normalno i posmično naprezanje (σ_0, τ_0). Za usvojeni nagib padine od 20° i težinu stupca tla od 10, 15 i 20 metara, uzorci su konsolidirani redom na (190, 70) kPa, (280, 100) kPa i (375, 137) kPa. Konsolidirani uzorci su zatim smaknuti porastom pornih pritisaka. U prirodnim padinama porni pritisci rastu uslijed porasta razine podzemne vode uslijed infiltracije vode uzrokovane padalinama. Uređajem ICL-1 postoji mogućnost simulacije pojave klizanja uslijed porasta razine podzemne vode.

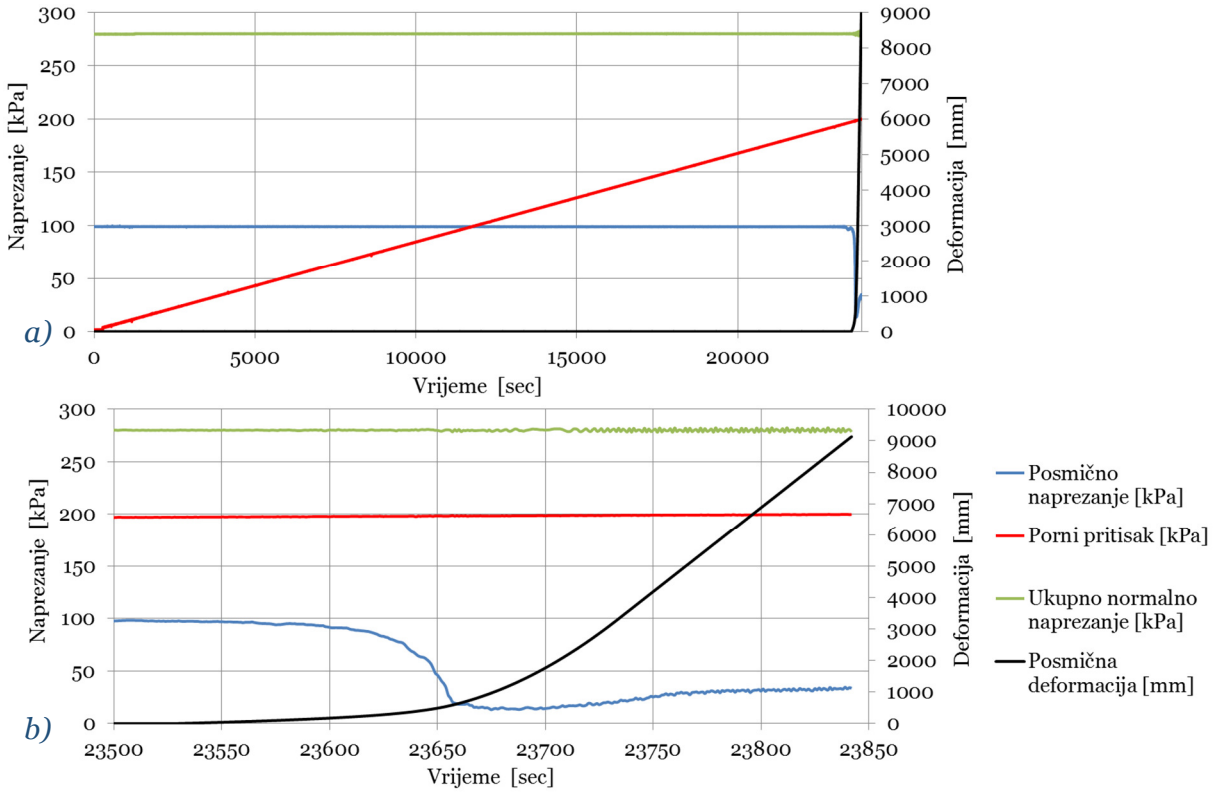
Ispitivanja uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša iz Istre provedena su prirastom pornih pritisaka brzinom od 0,5 kPa/min. Pritisak vode je postepeno povećan u posmičnoj ćeliji, a omogućeno je slobodno dreniranje uzorka.

Primjer promjene posmičnog naprezanja, ukupnog normalnog naprezanja, pornog pritiska i posmične deformacije u vremenu tijekom smicanja uz kontrolu pornih pritisaka uzorka sitnozrnastog litološkog člana fliša I (FR) stupnja trošnosti s flišnog izdanka u Istri, pri inicijalnom naprezanju (375, 137) kPa prikazan je na Slici 4.27.



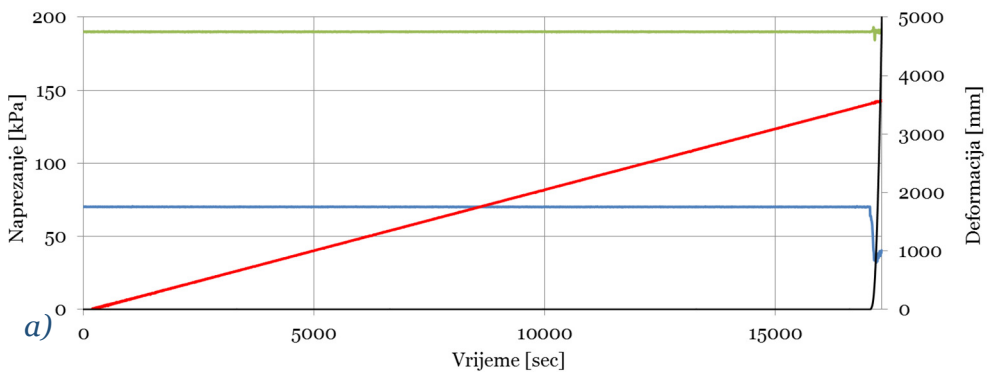
Slika 4.27 *a) Dijagram promjene posmičnog naprezanja, ukupnog normalnog naprezanja, pornog pritiska i posmične deformacije u vremenu na uzorku sitnozrnastog litološkog člana fliša I(FR) stupnja trošnosti s flišnog izdanka u Istri tijekom ispitivanja u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu pornih pritisaka, pri inicijalnom naprezanju (375, 137) kPa, b) Isječak prethodnog dijagrama od početka smicanja do kraja ispitivanja*

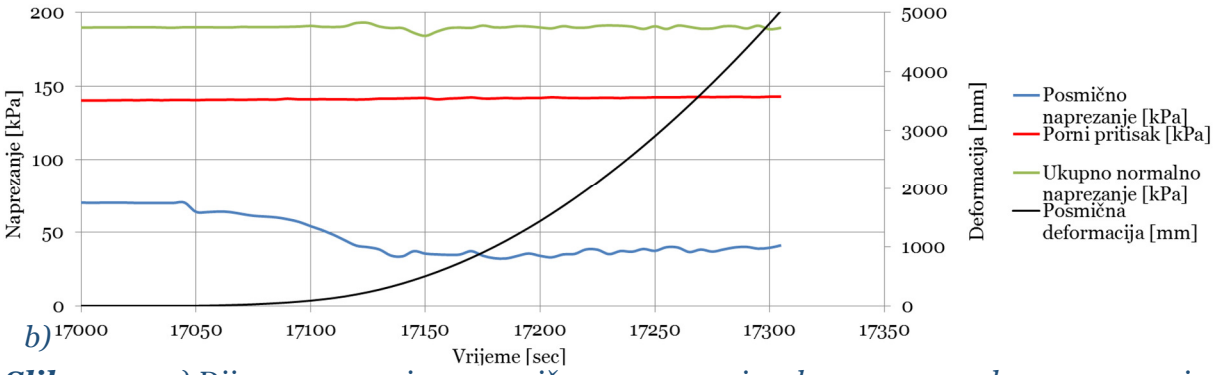
Primjer smicanja uz kontrolu pornih pritisaka uzorka sitnozrnastog litološkog člana fliša III (MW) stupnja trošnosti s flišnog izdanka u Istri pri inicijalnom naprezanju (280, 100) kPa prikazan je na Slici 4.28 gdje je vidljiva promjena posmičnog naprezanja, ukupnog normalnog naprezanja, pornog pritiska i posmične deformacije u vremenu.



Slika 4.28 *a) Dijagram promjene posmičnog naprezanja, ukupnog normalnog naprezanja, pornog pritiska i posmične deformacije u vremenu na uzorku sitnozrnastog litološkog člana fliša III (MW) stupnja trošnosti s flišnog izdanka u Istri tijekom ispitivanja u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu pornih pritisaka, pri inicijalnom naprezanju (280, 100) kPa, b) Isječak prethodnog dijagrama od početka smicanja do kraja ispitivanja*

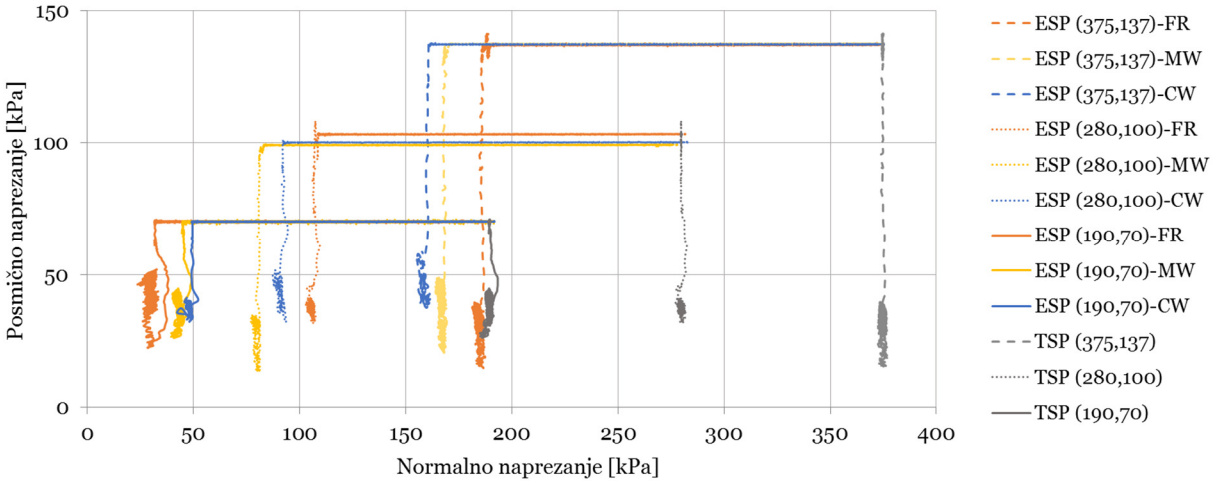
Primjer promjene posmičnog naprezanja, ukupnog normalnog naprezanja, pornog pritiska i posmične deformacije u vremenu tijekom smicanja uz kontrolu pornih pritisaka uzorka sitnozrnastog litološkog člana fliša V (CW) stupnja trošnosti s flišnog izdanka u Istri pri inicijalnom naprezanju (190, 70) kPa prikazan je na Slici 4.29.





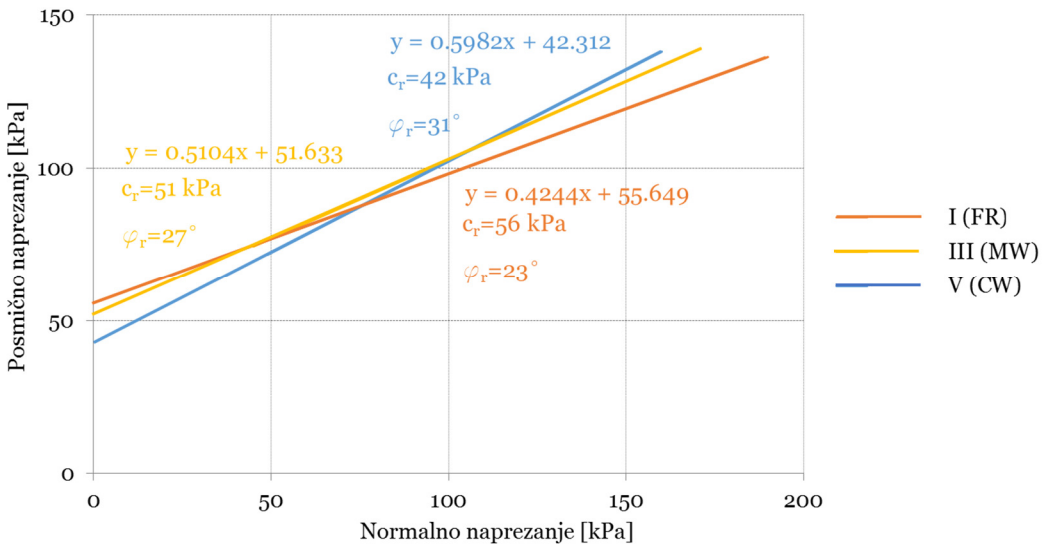
Slika 4.29 *a) Dijagram promjene posmičnog naprezanja, ukupnog normalnog naprezanja, pornog pritiska i posmične deformacije u vremenu na uzorku sitnozrnastog litološkog člana fliša V (CW) stupnja trošnosti s flišnog izdanka u Istri tijekom ispitivanja u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu pornih pritisaka, pri inicijalnom naprezanju (190, 70) kPa, b) isječak prethodnog dijagrama od početka smicanja do kraja ispitivanja*

Ukupni i efektivni tragovi naprezanja pri ispitivanju u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu pornih pritisaka na uzorcima sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti s flišnog izdanka u Istri prikazani su na Slici 4.30. Nakon što je efektivni trag naprezanja dosegao pravac čvrstoće započeo je razvoj posmične deformacije te je vrijednost posmičnog naprezanja značajno pala. S vremenom se posmični otpor stabilizirao na određenu vrijednost, koja se definira kao rezidualna posmična čvrstoća.



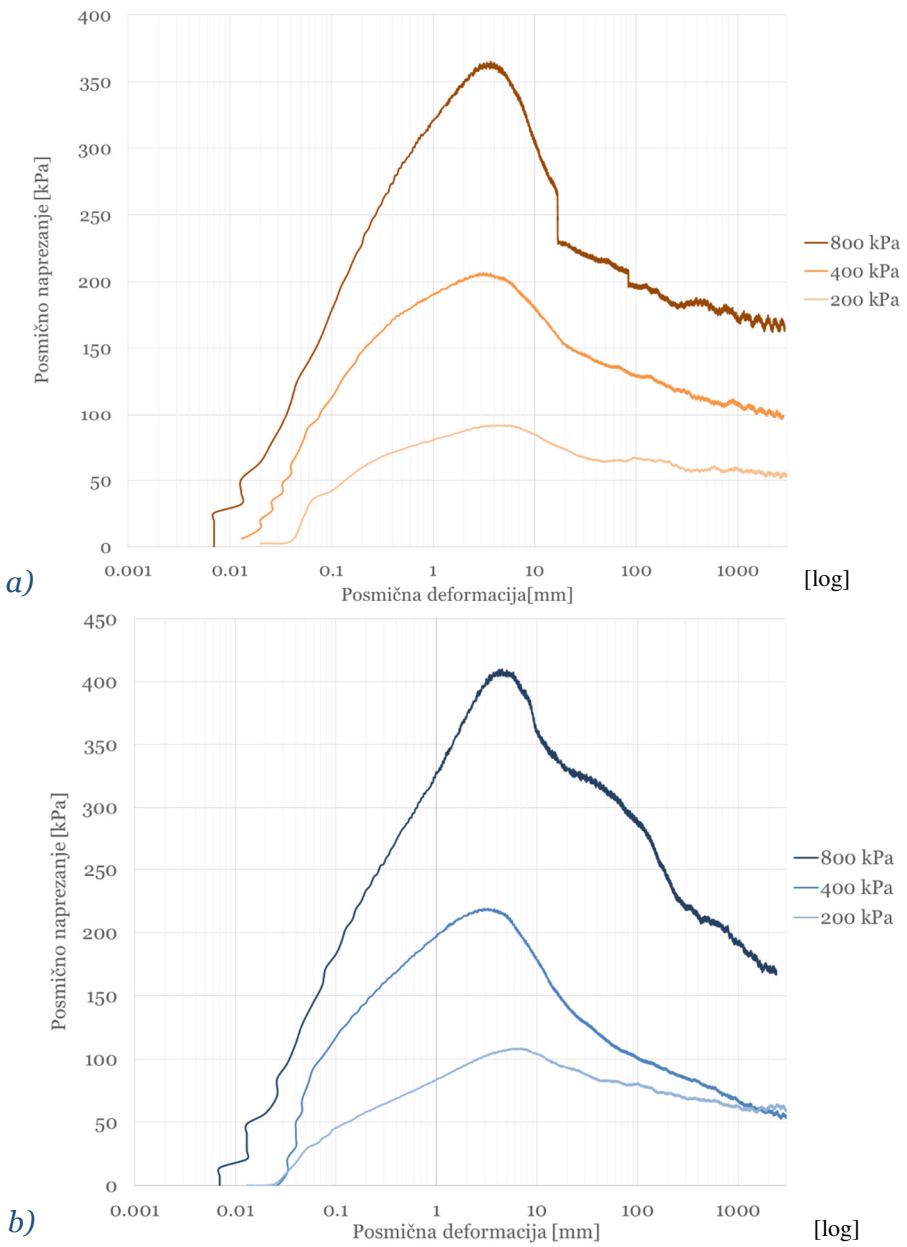
Slika 4.30 *Efektivni (ESP) i ukupni (TSP) tragovi naprezanja uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša I (FR), III (MW) i V (CW) stupnjeva trošnosti s flišnog izdanka u Istri pri ispitivanju u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu pornih pritisaka*

Određeni su pravci čvrstoće sitnorznastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti s flišnog izdanka u Istri. Dobiveni rezultati rezidualnih parametra tla izraženi prema Mohr-Coulombovom zakonu čvrstoće za različite stupnjeve trošnosti prikazani su na Slici 4.31 i sumarno u Tablici 4.14. Rezidualni kut unutarnjeg trenja se povećava s porastom stupnja trošnosti, s 23° za I (FR) stupnja trošnosti na 31° za V (CW) stupanj trošnosti uzorka dok se rezidualna kohezija smanjuje s porastom stupnja trošnosti, s 56 kPa za I (FR) stupanj trošnosti na 42 kPa za V (CW) stupanj trošnosti uzorka.



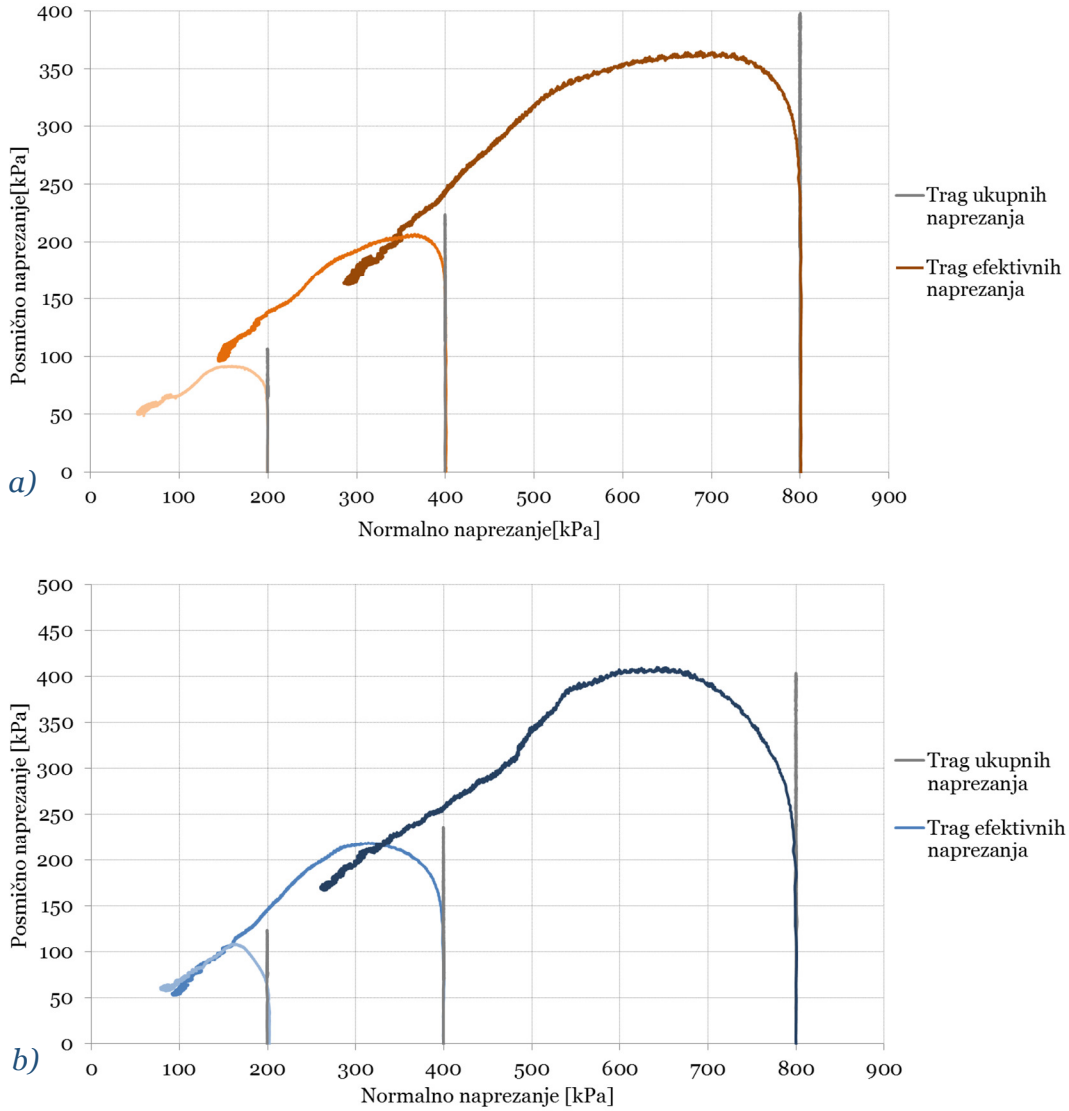
Slika 4.31 *Pravci čvrstoće uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša I (FR), III (MW) i V (CW) stupnjeva trošnosti s flišnog izdanka u Istri dobivenih ispitivanjem u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu pornih pritisaka*

Uzorci istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša različitih stupnjeva trošnosti s dna akumulacije Valići u dolini Rječine su također ispitani u uređaju za prstenasto smicanje, ali uz kontrolu brzine smicanja. Nakon kontrole saturacije uzorka, uzorci su konsolidirani na vrijednosti normalnih naprezanja od 200, 400 i 800 kPa. Zatim su smaknuti brzinom smicanja od 0,01 cm/sec u nedreniranim uvjetima. Na Slici 4.32 prikazan je dijagram posmičnih naprezanja s napredovanjem posmične deformacije sve do dosegnutih dva metra pomaka, odnosno sve do dosezanja dinamičke ravnoteže, i neograničenog smicanja pri konstantnim naprezanjima i konstantnoj brzini smicanja.



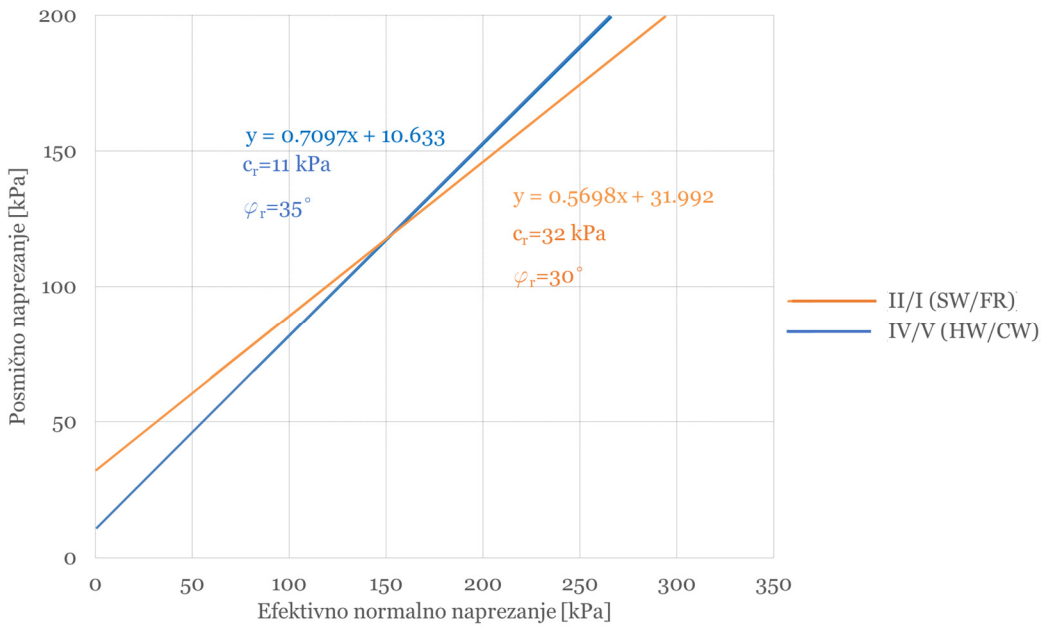
Slika 4.32 *Dijagram posmično naprezanje - posmična deformacija (logaritamsko mjerilo) za uzorke istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša: a) II/I (SW/FR), b) IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti s dna akumulacije Valići u doline Rječine ispitivanjem u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu brzine smicanja*

Ukupni i efektivni tragovi naprezanja pri ispitivanju u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu brzine smicanja na uzorcima istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša različitih stupnjeva trošnosti s dna akumulacije Valići u doline Rječine prikazani su na Slici 4.33.



Slika 4.33 *Tragovi ukupnih i efektivnih naprezanja pri ispitivanju u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu brzine smicanja na uzorcima istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša: a) II/I (SW/FR) i b) IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti s dna akumulacije Valići u dolini Rječine*

Uređajem za prstenasto smicanje omogućen je cjeloviti prikaz pravca čvrstoće. Pravci čvrstoće istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na dnu akumulacije Valići u doline Rječine prikazani su na Slici 4.34, a pripadajući rezidualni parametri čvrstoće tla izraženi kroz Mohr-Coulombov zakon čvrstoće u Tablici 4.14. Rezidualni kut unutarnjeg trenja se povećava s povećanjem stupnja trošnosti, s 30° za II/I (SW/FR) stupanj trošnosti uzorka na 35° za IV/V (HW/CW) stupanj trošnosti uzorka. Utvrđen je i znatan pad rezidualne kohezije s 32 kPa za II/I (SW/FR) stupanj trošnosti uzorka na 11 kPa za IV/V (HW/CW) stupanj trošnosti uzorka.



Slika 4.34 *Rezidualni pravci čvrstoće istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša II/I (SW/FR) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti uzorkovanih na dnu akumulacije Valići u doline Rječine pri ispitivanju u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu brzine smicanja*

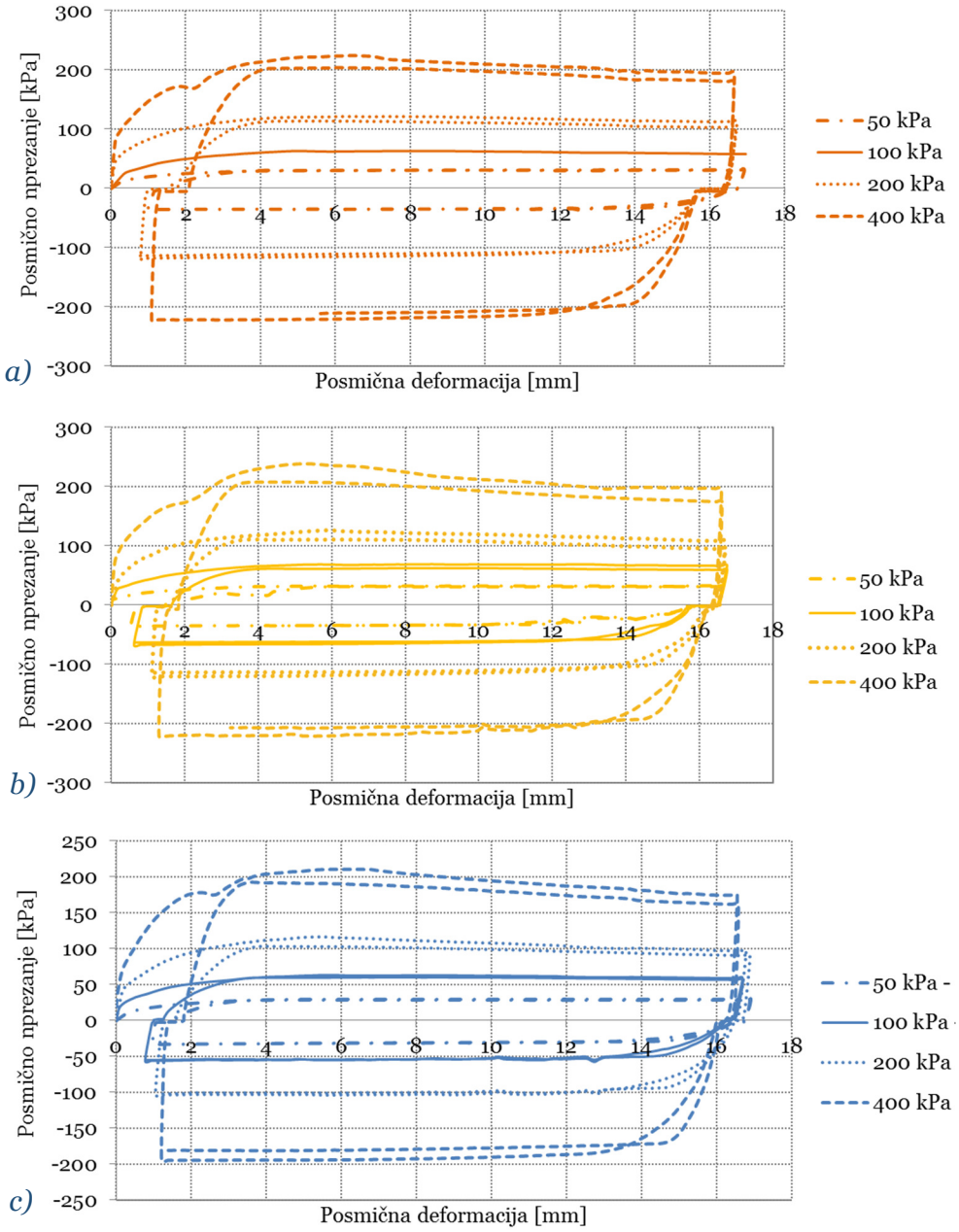
4.6.1.4. Postupak i rezultati ispitivanja rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša u uređaju za izravno smicanje

Ispitivanje rezidualne posmične čvrstoće u uređaju za izravno smicanje provedeno je na smrvljenim sitnozrnastim litološkim članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih sa svih lokacija na području istraživanja:

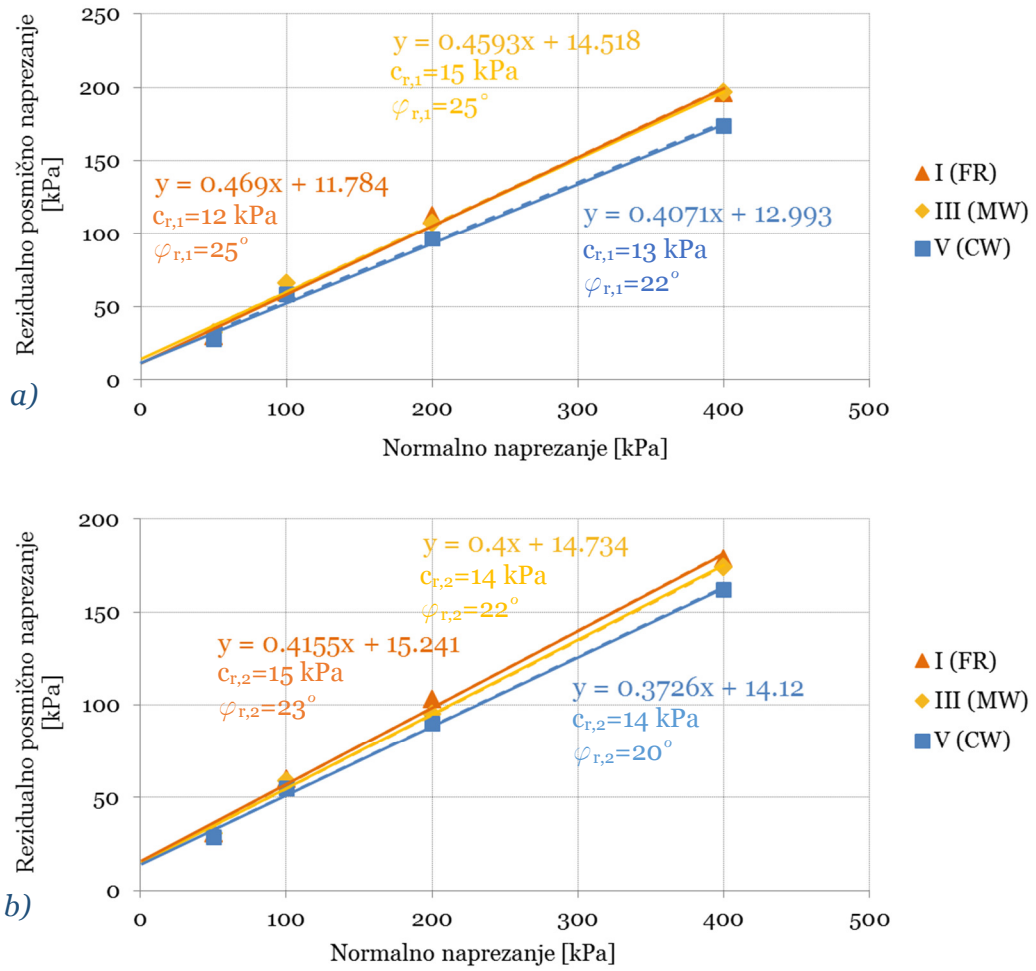
- sitnozrnasti litološki članova fliša I (FR), III (MW) i V (CW) stupnja trošnosti uzorkovani na flišnom izdanku u Istri;
- istaložene naslage podrijetlom iz fliša II/I (SW/FR) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti uzorkovane na dnu akumulacije Valići u dolini Rječine;
- sitnozrnasti litološki članovi fliša I (FR) stupnja trošnosti uzorkovan iz jezgre bušotine te II (SW), III/IV (MW/HW) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti uzorkovani na bliskim izdancima flišne stijenske mase u dolini Rječine;
- sitnozrnasti litološki članovi fliša II/I (SW/FR) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti uzorkovani na flišnom izdanku u Vinodolskoj dolini.

Uzorci pripremljeni u žitkom konzistentnom stanju ugrađeni su u posmičnu ćeliju, dimenzija 60 x 60 mm. Uzorci su konsolidirani na vrijednosti normalnih naprezanja od 50, 100, 200 i 400 kPa te su nakon toga smaknuti uz konstantnu brzinu smicanja od 0,015 mm/min. U pojedinim ispitivanjima provedena su dva ciklusa smicanja kako bi se osigurale potrebne deformacije za dosezanje rezidualne posmične čvrstoća materijala. Na Slici 4.35, Slici 4.37, Slici 4.39 i Slici 4.41 prikazani su dijagrami odnosa posmično naprezanje - posmična deformacija za sitnozrnaste litološke članove fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovane u Istri, na dnu akumulacije Valići, u dolini Rječine i Vinodolskoj dolini. Dobiveni rezultati rezidualnih parametra tla uzoraka različitih stupnjeva trošnosti iz područja istraživanja izraženi su Mohr-Coulombovim zakonom čvrstoće. Parametri posmične čvrstoće uzoraka različitih stupnjeva trošnosti su određeni primjenom metode najmanjih kvadrata odstupanja izmjerene vrijednosti rezidualne posmične čvrstoće uzorka određene trošnosti.

Pravci rezidualne posmične čvrstoće s pripadajućim rezidualnim parametrima čvrstoće za uzorke sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti s flišnog izdanka u Istri za prvi i drugi ciklus ispitivanja u uređaju za izravno smicanje prikazani su na Slici 4.36. Uzorci sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti pokazuju pad rezidualnog kuta unutarnjeg trenja s 25° za I (FR) stupanj trošnosti uzorka na 22° za V (CW) stupanj trošnosti uzorka. Rezidualna kohezija je približno jednaka za sve stupnjeve trošnosti, za uzorak I (FR) stupanj trošnosti iznosi 12 kPa, za III (MW) stupanj trošnosti uzorka 15 kPa te za V (CW) stupanj trošnosti uzorka 13 kPa. Nakon drugog ciklusa smicanja uzorci pokazuju neznatan, ali pravilan pad rezidualne posmične čvrstoće s porastom stupnja trošnosti. Nakon drugog ciklusa smicanja, rezidualna kohezija se neznatno smanjila u odnosu na prvi ciklus dok se vrijednost rezidualnog kut unutarnjeg trenja smanjuje za 2° za uzorke svih stupnjeva trošnosti.

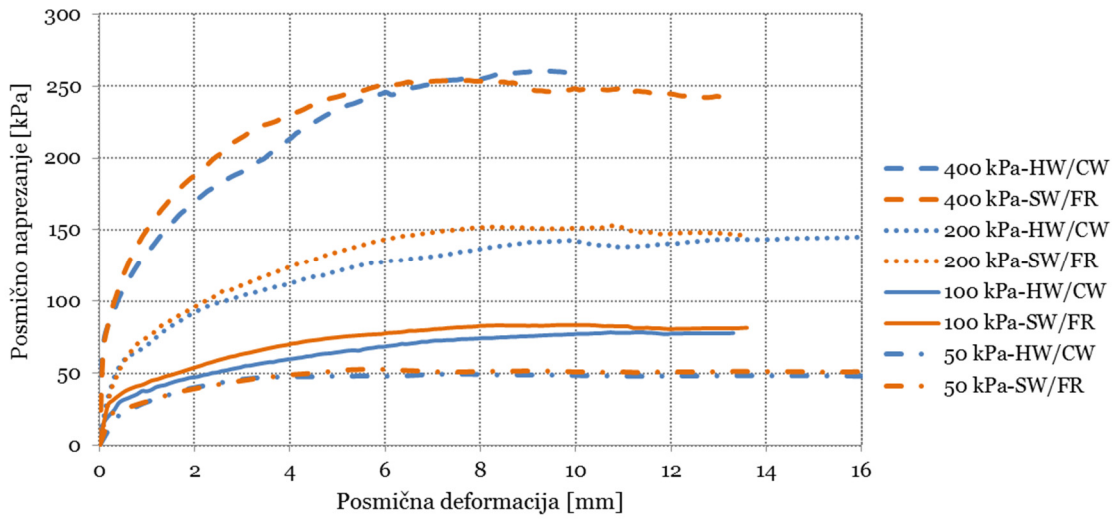


Slika 4.35 *Dijagram odnosa posmično naprezanje - posmična deformacija uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša: a) I (FR), b) III (MW) i c) V (CW) stupnjeva trošnosti s flišnog izdanka u Istri, za dva ciklusa ispitivanja u uređaju za izravno smicanje*

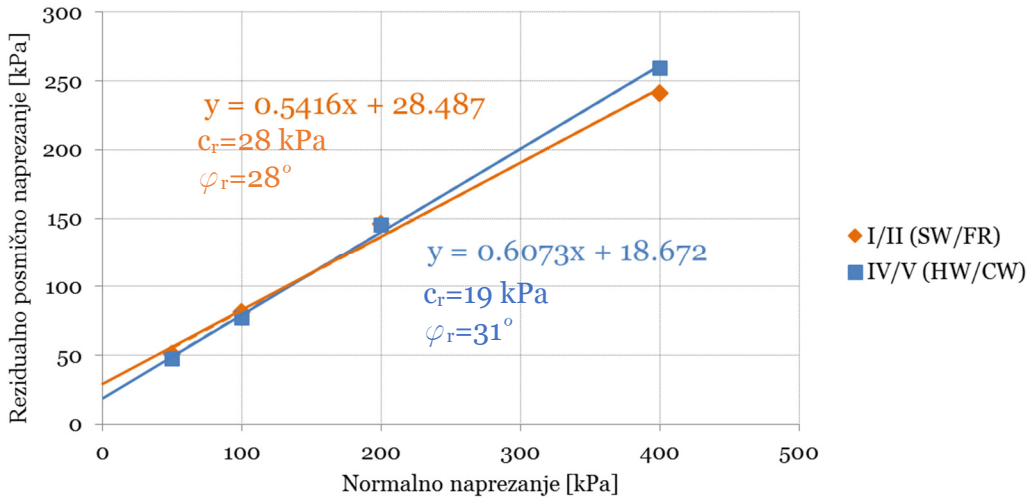


Slika 4.36 *Pravci rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na flišnom izdanku u Istri: a) nakon prvog ciklusa smicanja, b) nakon drugog ciklusa smicanja u uređaju za izravno smicanje*

Pravci rezidualne posmične čvrstoće određeni rezidualnim parametrima čvrstoće za uzorke istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša različitih stupnjeva trošnosti s dna akumulacije Valići u dolini Rječine prikazani su na Slici 4.38. Rezidualni kut unutarnjeg trenja se povećava s povećanjem stupnja trošnosti, s 28° za II/I (SW/FR) stupanj trošnosti uzorka na 31° za IV/V (HW/CW) stupanj trošnosti uzorka. Utvrđen je i znatan pad rezidualne kohezije s 28 kPa za II/I (SW/FR) stupanj trošnosti uzorka na 19 kPa za IV/V (HW/CW) stupanj trošnosti uzorka.

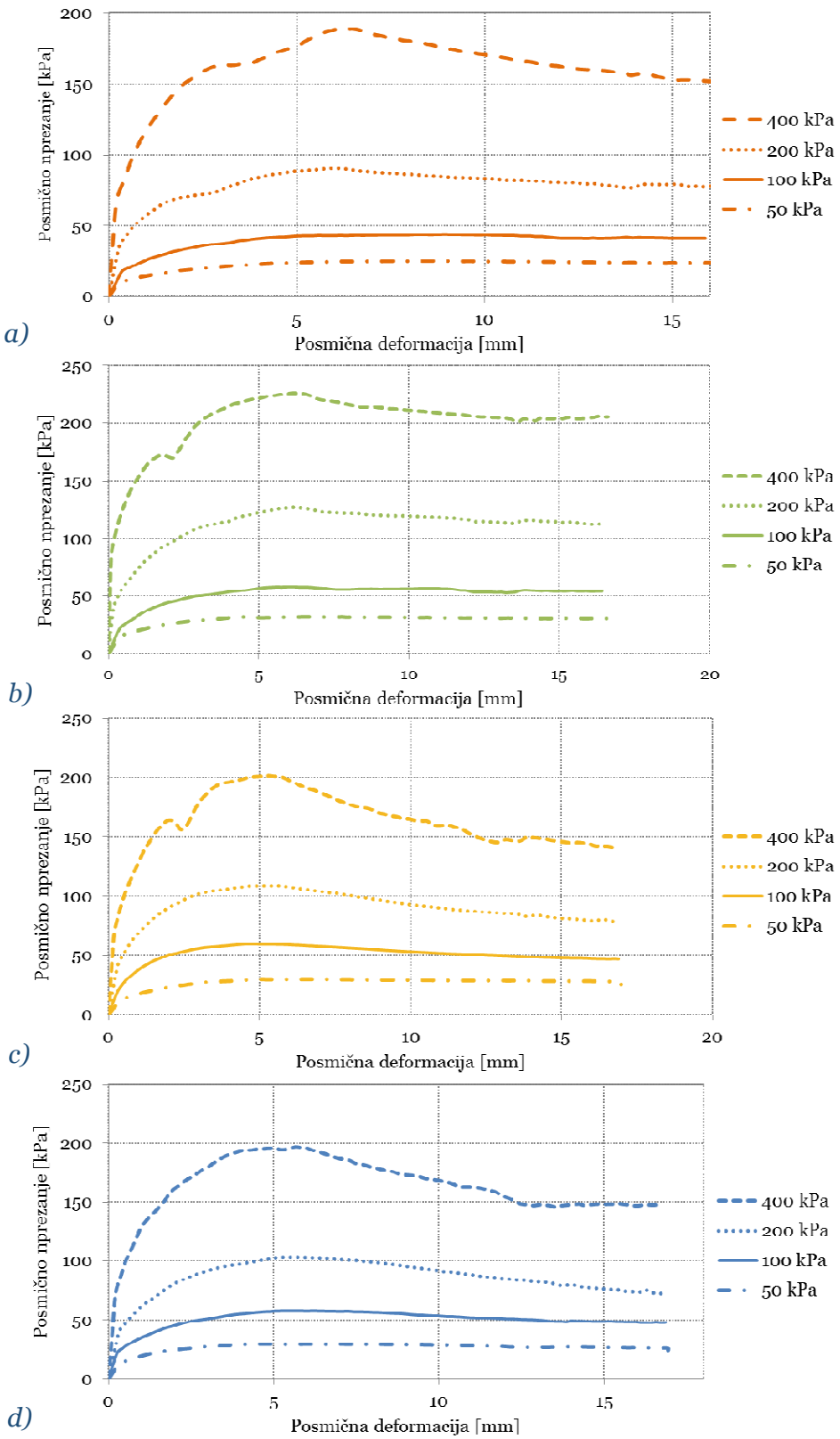


Slika 4.37 *Dijagram odnosa posmično naprezanje - posmična deformacija uzoraka istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša različitih stupnjeva trošnosti s dna akumulacije Valići u doline Rječine pri ispitivanju u uređaju za izravno smicanje*

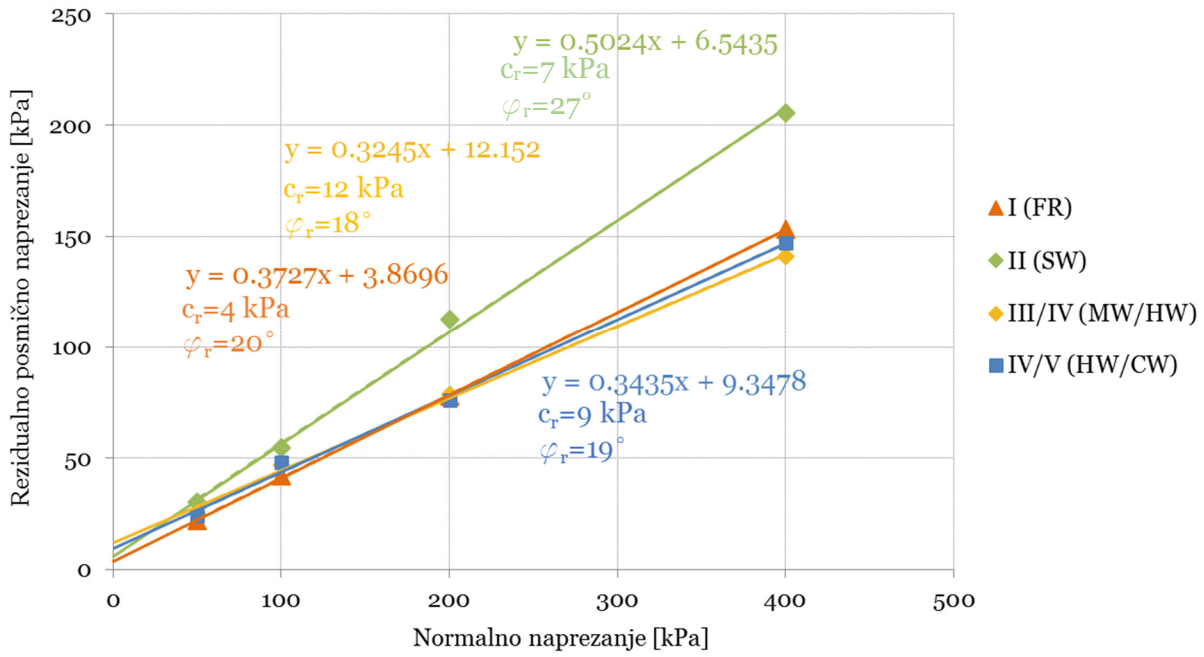


Slika 4.38 *Pravci rezidualne posmične čvrstoće istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na dnu akumulacije Valići u doline Rječine pri ispitivanju u uređaju za izravno smicanje*

Na Slici 4.40 prikazani su pravci rezidualne posmične čvrstoće određeni rezidualnim parametrima čvrstoće za uzorke sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti iz bušotine i na izdanaka flišne stijenske mase u dolini Rječine. Rezidualni kut unutarnjeg trenja se neznatno smanjuje s povećanjem stupnja trošnosti, s 20° za I (FR) stupanj trošnosti uzorka na 19° za IV/V (HW/CW) stupanj trošnosti uzorka. Vrijednosti rezidualne kohezije su male, od 4 do 12 kPa i neznatno se razlikuju za pojedine stupnjeve trošnosti. Parametri ne ukazuju na pravilni pad rezidualnog kuta trenja i porast rezidualne kohezije s porastom stupnja trošnosti.

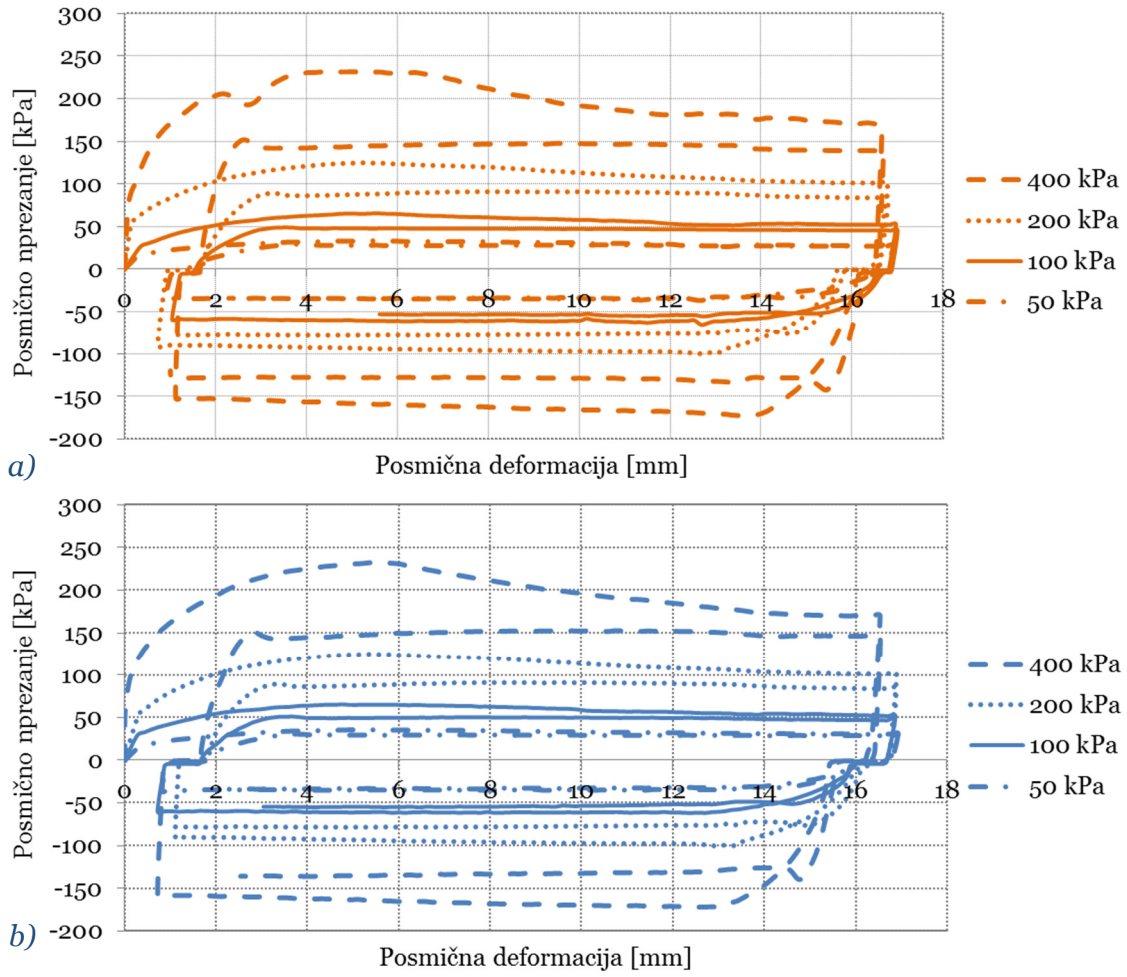


Slika 4.39 *Dijagram odnosa posmično naprezanje - posmična deformacija uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša: a) I (FR), b) II (SW), c) III/IV (MW/HW) i d) IV/V (HW/CW) stupnjeva trošnosti iz bušotine i izdanaka flišne stijenske mase u dolini Rječine pri ispitivanju u uređaju za izravno smicanje*

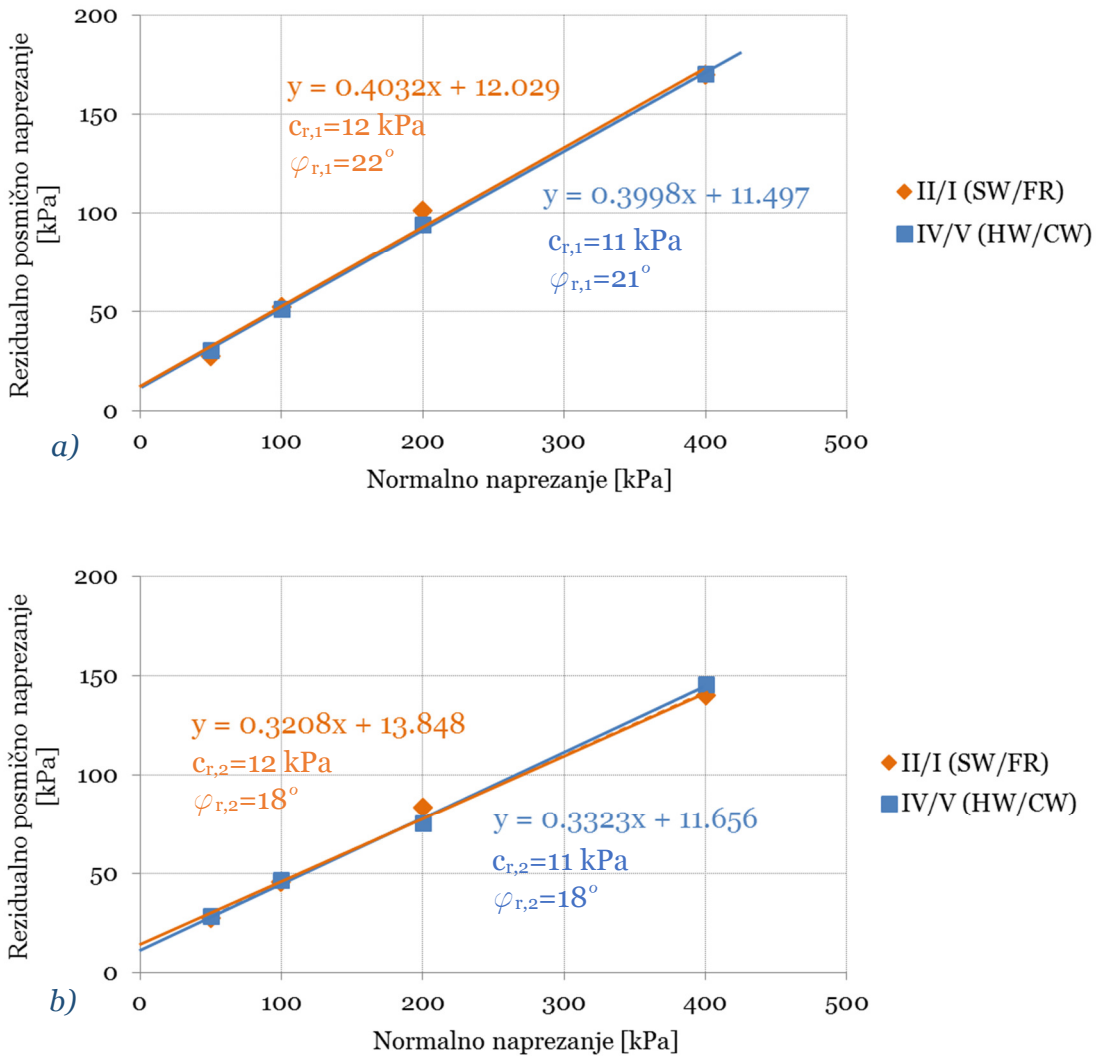


Slika 4.40 *Pravci rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih u bušotini i na izdancima flišne stijenske mase u dolini Rječine pri ispitivanju u uređaju za izravno smicanje*

Pravci rezidualne posmične čvrstoće određeni rezidualnim parametrima čvrstoće za uzorke sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti s flišnog izdanka u Vinodolskoj dolini za prvi i drugi ciklus ispitivanja u uređaju za izravno smicanje prikazani su na Slici 4.42. Rezidualni kut unutarnjeg trenja i rezidualna kohezija se neznatno smanjuju s povećanjem stupnja trošnosti, kut trenja s 22°, odnosno kohezija s 12 kPa za II/I (SW/FR) stupanj trošnosti uzorka na 21°, odnosno 11 kPa za IV/V (HW/CW) stupanj trošnosti uzorka. Nakon drugog ciklusa smicanja, rezidualna kohezija ima istu vrijednost kao u prvom ciklusu dok se vrijednost rezidualnog kut unutarnjeg trenja smanjuje na vrijednost od 18° za oba uzorka.



Slika 4.41 *Dijagram odnosa posmično naprezanje - posmična deformacija uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša: a) II/I (SW/FR) i b) IV/V (HW/CW) stupanj trošnosti s flišnog izdanka Vinodolskoj dolini, za dva ciklusa ispitivanja u uređaju za izravno smicanje*



Slika 4.42 *Pravci rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na izdancima flišne stijenske mase u Vinodolskoj dolini: a) nakon prvog ciklusa smicanja, b) nakon drugog ciklusa smicanja u uređaju za izravno smicanje*

Sumarni prikaz rezultata ispitivanja rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na području istraživanja dan je u Tablici 4.14. Svi uzorci pokazuju znatan pad rezidualne posmične čvrstoće s povećanjem stupnja trošnosti. Rezidualna kohezija pada dok rezidualni kut trenja raste s porastom stupnja trošnosti. Jedino uzorci iz flišnih izdanaka u dolini Rječine ne pokazuju nikakav trend pada čvrstoće s porastom trošnosti. Uzorci sitnozrnastih litoloških članova fliša iz doline Rječine nisu uzeti na jedinstvenom izdanku, odnosno iz iste bušotine pa je moguće da uzeti i ispitani uzorci ne potječu od istog izvornog materijala.

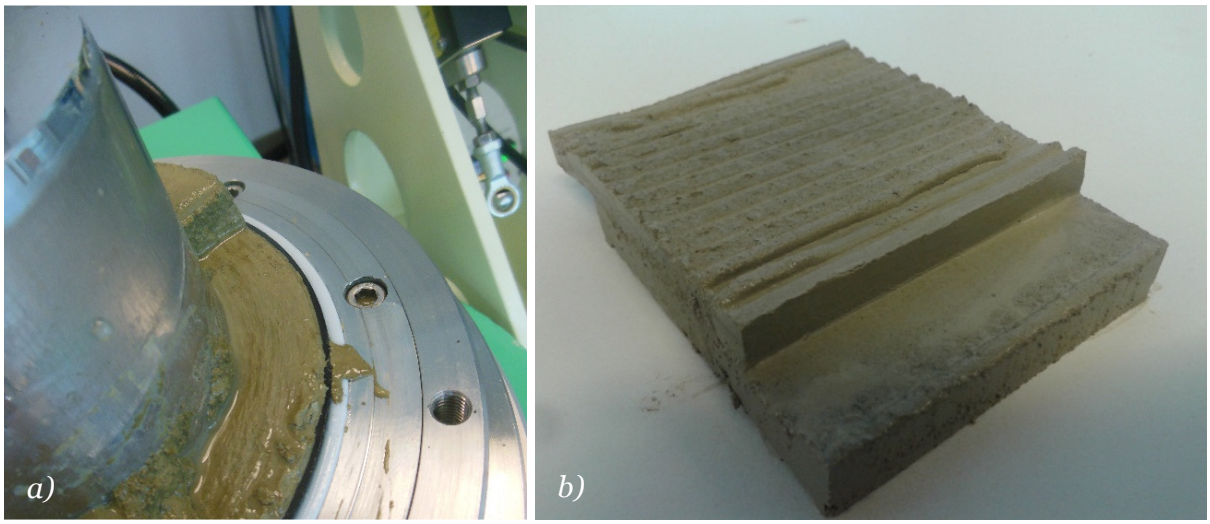
Tablica 4.14 *Rezidualni parametri čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na području istraživanja*

Uzorak sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti			Ispitivanje					
Simbol	Opis	Lokacija uzorkovanja	Izravno smicanje				Prstenasto smicanje	
			1.ciklus		2.ciklus			
			ϕ_r [°]	c_r [kPa]	ϕ_r [°]	c_r [kPa]	ϕ_r [°]	c_r [kPa]
FR	Svježi	Izdanak flišne stijenske mase u sjevernoj Istri	25	12	23	15	23	56
MW	Srednje trošan		25	15	22	14	27	51
CW	Potpuno trošan		22	13	20	14	31	42
SW/FR	Slabo trošan/Svježi	Dno akumulacije Valići u dolini Rječine	28	28			30	32
HW/CW	Jako/ Potpuno trošan		31	19			35	11
FR	Svježi	Bušotina i izdanak flišne stijenske mase u dolini Rječine	20	4				
SW	Slabo trošan		27	7				
MW/HW	Srednje/Jako trošan		18	12				
HW/CW	Jako/ Potpuno trošan		19	9				
SW/FR	Slabo trošan/Svježi	Izdanak flišne stijenske mase u Vinodolskoj dolini	22	12	18	12		
HW/CW	Jako/ Potpuno trošan		21	11	18	11		

Vidljiva je znatna razlika u rezultatima dobivenih uređajem za prstenasto smicanje i uređajem za izravno smicanje. Korišteni uređaj za prstenasto smicanje je svakako više prilagođen ispitivanju parametara rezidualne posmične čvrstoće od uređaja za izravno smicanje, iz sljedećih razloga:

i) uređaj za prstenasto smicanje omogućuje velike, odnosno beskonačne posmične deformacije na plohi smicanja dok uređaj za izravno smicanje omogućuje posmičnu deformaciju od 15 mm što ne mora nužno biti dovoljno za razvoj rezidualne posmične čvrstoće;

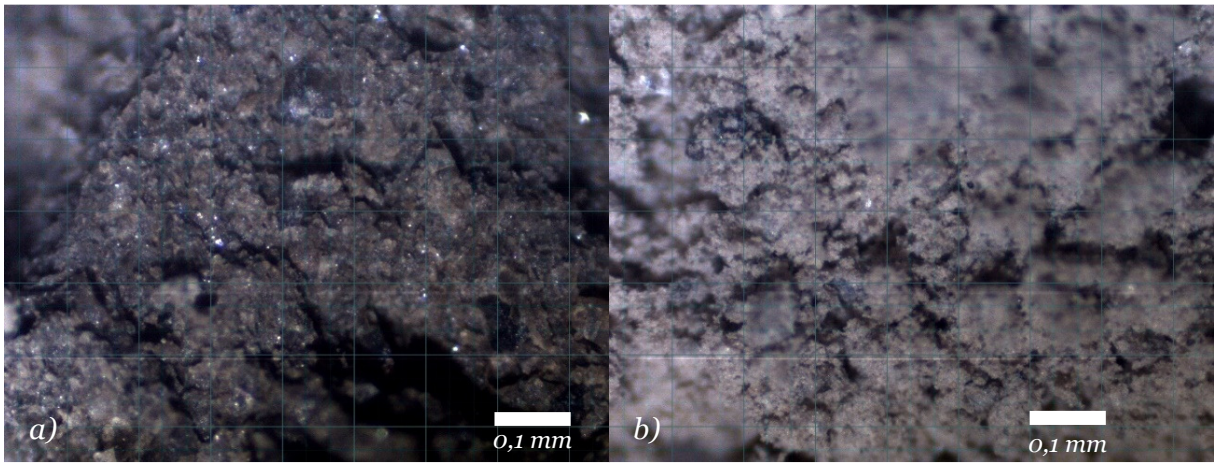
ii) u uređaju za prstenasto smicanje smicanje se razvija po plohi smicanja konstantne površine (Slika 4.43 a) i pri konstantnom naprezanju dok se u uređaju za izravno smicanje ploha smicanja mijenja (smanjuje) tijekom smicanja (Slika 4.43 b), a stanje naprezanja nije homogeno;
iii) pravac rezidualne posmične čvrstoće u uređaju za izravno smicanje je određen primjenom metode najmanjih kvadrata odstupanja kroz četiri pojedinačna rezultata dok se u uređaju za prstenasto smicanje kroz rezultat dobiva cjeloviti pravac čvrstoće;
iv) mjerenje pornog pritiska na plohi smicanja je omogućeno u uređaju za prstenasto smicanje dok uređaj za izravno smicanje nema tu mogućnost;
v) u uređaju za prstenasto smicanje moguće je smicanjem uz kontrolu vertikalnih deformacija što je značajno pri dosezanju stanja dinamičke ravnoteže dok se u uređaju za izravno smicanje ne može, ili je vrlo teško postići, konstantnu vertikalnu deformaciju tijekom smicanja;
vi) ispitivanja u uređaju za izravno smicanje provedena su za konstantnu brzinu smicanja od 0,015 mm/min dok u uređaju za prstenasto smicanje minimalna dopuštena brzina smicanja iznosi 0,01 cm/s (6 mm/min).



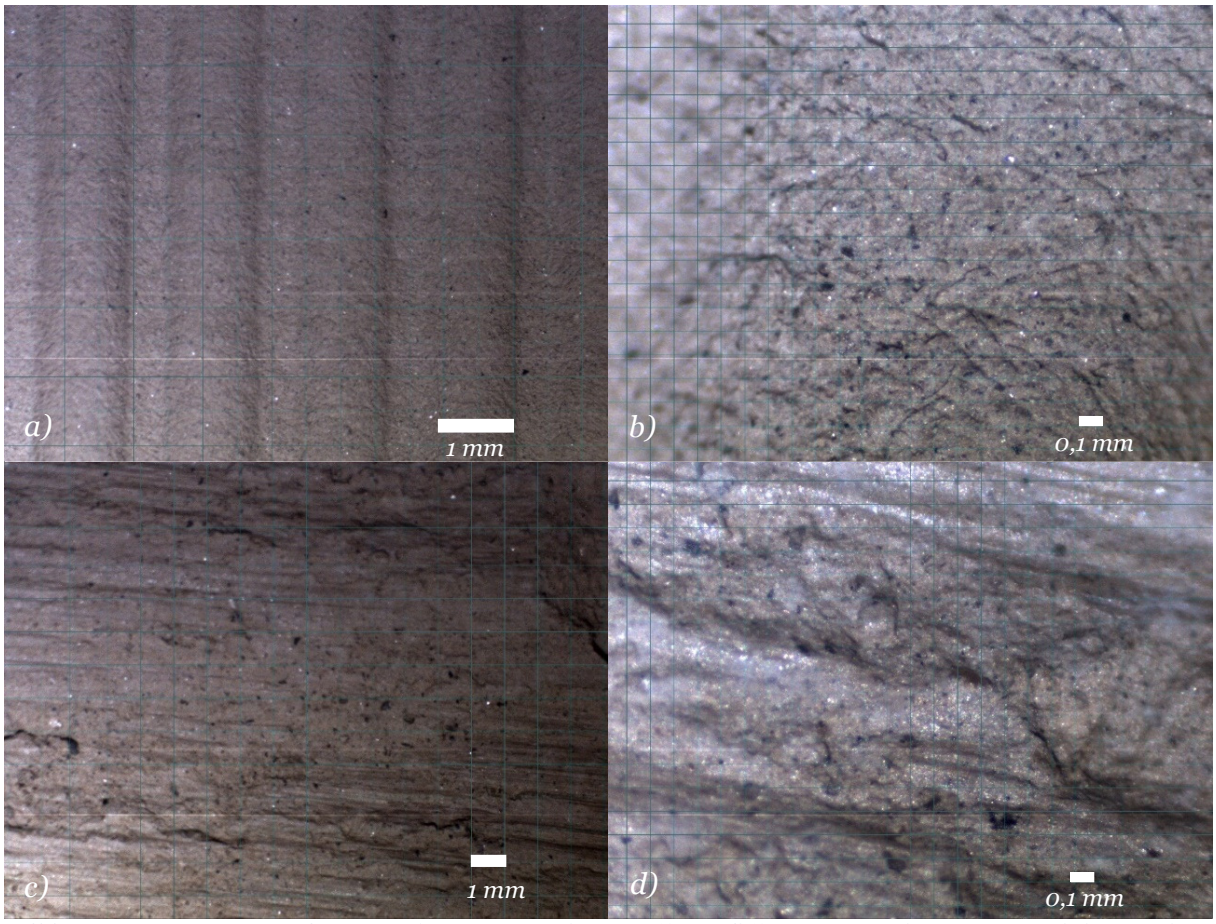
Slika 4.43 *Ploha smicanja u uređaju za: a) prstenasto smicanje, b) izravno smicanje*

Uzorak potpuno trošne flišne stijenske mase s izdanka flišne stijenske mase u Vinodolskoj dolini snimljen je elektronskim mikroskopom i povećanjem 225 puta. Slika 4.44 a prikazuje uzorak u originalnom stanju, a Slika 4.44 b nakon pripreme za smicanje, odnosno nakon usitnjavanja. Uspoređujući slike vidljivo je da se usitnjavanjem uzorka kidaju veze između čestica, ali veličina sitnozrnastih čestica nije

promijenjena. Nakon smicanja u uređaju za izravno smicanje, mikroskopom je snimljena gornja kontaktna ploha između uzorka i poroznog metala (Slika 4.45 a, b) te ploha smicanja (Slika 4.45 c, d). Na plohi smicanja je vidljiva zaglađena površina i orijentacija sitnozrnastih čestica fliša u smjeru smicanja.



Slika 4.44 *Fotografije uvećanja elektronskim mikroskopom uzorka trošne flišne stijenske mase: a) u izvornom stanju, b) nakon laboratorijskog usitnjavanja, s mrežom na razmaku od 0,1 mm*



Slika 4.45 *Fotografije uvećanja uzorka trošne flišne stijenske mase elektronskim mikroskopom s mrežom na različitom razmaku: a), b) na gornjoj kontaktnoj plohi između uzorka i poroznog metala; c), d) na plohi smicanja u uređaju za izravno smicanje*

4.6.1.5. Postupak i rezultati ispitivanja postojanosti sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti iz Istre

Proces trošenja u sitnozrnastim materijalima iz flišnog kompleksa može uglavnom biti opisan kao fizičko trošenje, kombinirano s kemijskim trošenjem na površini uzoraka i na zidovima pukotina unutar stijenske mase, podrazumijevajući sve površine materijala koje mogu biti u kontaktu s vodom. Proces trošenja flišne stijenske mase se uglavnom razvija kad je materijal izložen procesu naizmjeničnog sušenja i vlaženja. Za ispitivanje postojanosti provedeno je više od dva standardna ciklusa sušenja i vlaženja kako bi se utvrdilo dugotrajno ponašanje trošenja uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti.

Provedeno je:

1. deset ciklusa sušenja i vlaženja (DWT) na:
- uzorcima sitnozrnastih litoloških članova I (FR), II (SW), III (MW) i IV (CW) stupnja trošnosti s izdanka flišne stijenske mase blizu sela Cunj u Istri;
2. pet ciklusa sušenja i vlaženja dinamičkim uređajem za ispitivanje postojanosti (SDT) na:
- uzorcima I (FR) i III (MW) stupnja trošnosti s pokosa izgrađenog u flišnoj stijenskoj masi blizu sela Sovinjak u Istri;
- uzorcima I (FR) i III (MW) stupnja trošnosti s izdanka flišne stijenske mase blizu sela Cunj u Istri.

4.6.1.5.1. Postupak i rezultati ispitivanja postojanosti laboratorijskim oponašanjem procesa sušenja i vlaženja

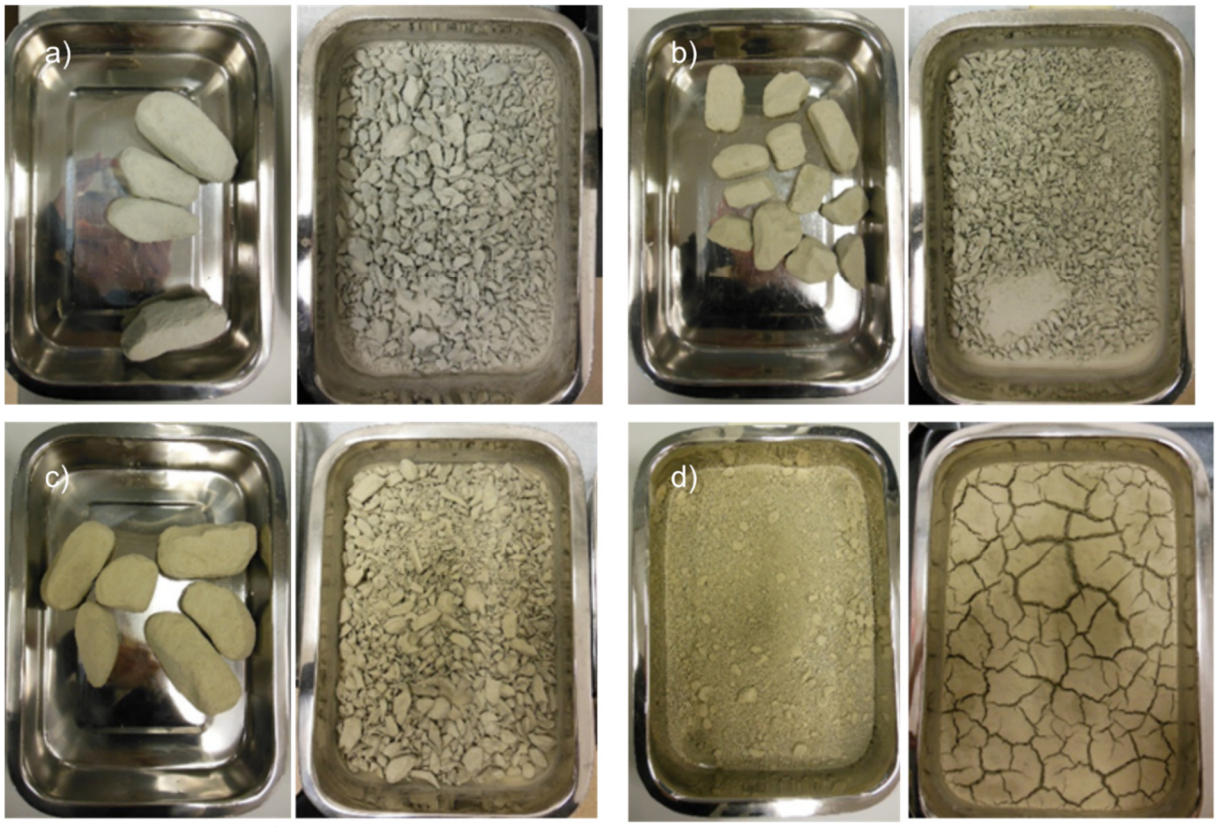
Intaktni uzroci flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti s izdanka blizu sela Cunj u Istri bili su izloženi laboratorijskom oponašanju trošenja s deset ciklusa sušenja i vlaženja (eng. *Drying Wetting Test*, DWT). Uvjeti tijekom ispitivanja postojanosti uzoraka oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja prikazani su u Tablici 4.15. Pojedini ciklus sastojao se od 24 satnog sušenja na 105 °C u sušioniku, 24 satnog sušenja na laboratorijskoj temperaturi (20 °C) i 24 satnog potapanja u destiliranoj vodi. Nakon svakog pojedinog ciklusa određena je granulometrijska krivulja sijanjem kroz sita veličine 16, 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,125 i 0,063 mm. Nakon svakog ciklusa obavljen je i vizualni pregled uzorka te su uzorci nakon sijanja fotografirani. Naposljetku su

određeni indeks postojanosti te indeks raspadanja i modificirani indeks raspadanja uzoraka različitih stupnjeva trošnosti.

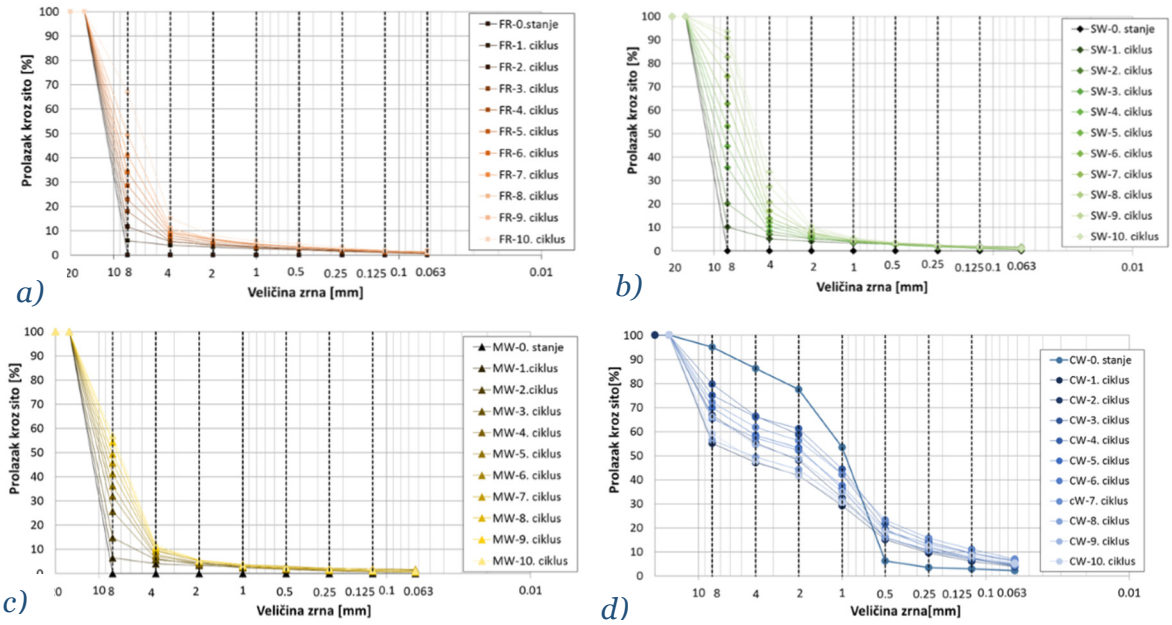
Tablica 4.15 *Uvjeti ispitivanja postojanosti laboratorijskim oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja (eng. Drying Wetting Test, DWT)*

Stupanj trošnosti uzorka				Operacija	Uvjeti tijekom operacije	Trajanje operacije	Trajanje ciklusa	Broj ciklusa
I (FR)	II (SW)	III (MW)	V (CW)	Vlaženje	Destilirana voda	24 h	3,5 dana	10
				Sušenje	105°C	24 h		
				Hlađenje	20°C	24 h		
				Sijanje	Sita veličine 16, 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,125 i 0,063 mm			
				Vizualna interpretacija	Fotografiranje			

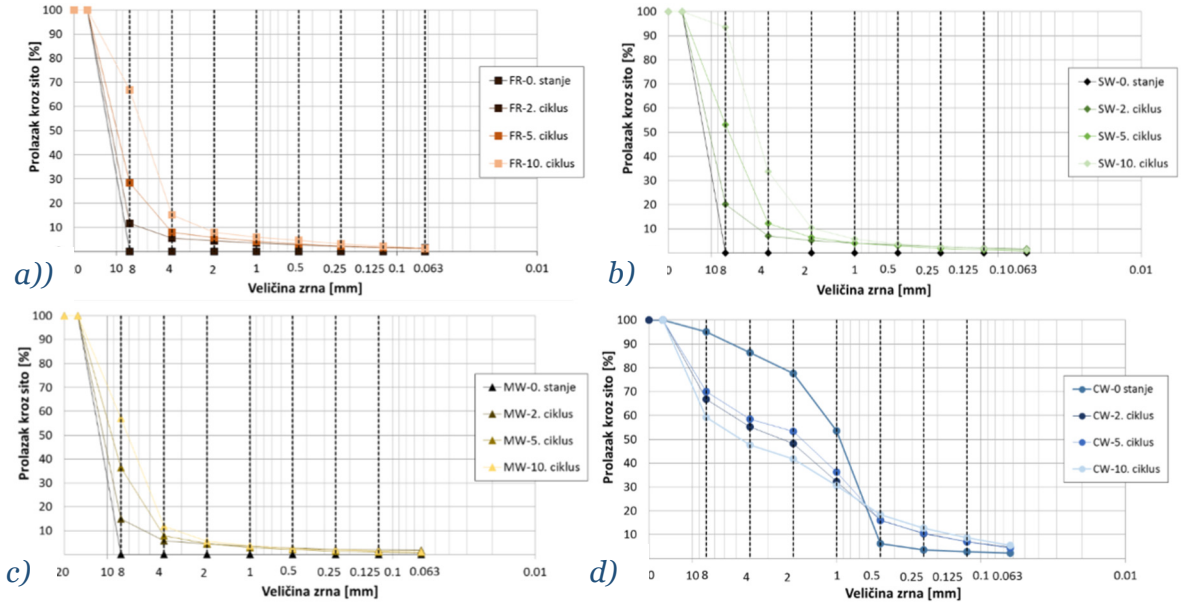
Unutar deset ciklusa sušenja i vlaženja odlomci sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase su se raspali u čestice veličine pijeska, kao što je prikazano na Slici 4.46. Slike 4.47 i 4.48 prikazuju razvoj granulometrijske krivulje tijekom deset ciklusa sušenja i vlaženja za svaki pojedini stupanj trošnosti stijenske mase. Postotak sitnih čestica povećava se s povećanjem broja ciklusa, odnosno granulometrijska krivulja se pomiče prema gore s povećanjem učešća pijeska i praha.



Slika 4.46 *Uzorak flišne stijenske mase: a) I (FR), b) II (SW), c) III (MW) i d) V (CW) stupnja trošnosti iz Istre u početnom stanju (lijevo) i nakon deset ciklusa sušenja i vlaženja (desno)*



Slika 4.47 *Granuloumetrijska krivulja kroz deset ciklusa sušenja i vlaženja za uzorak flišne stijenske mase: a) I (FR), b) II (SW), c) III (MW) i d) V (CW) stupnja trošnosti iz Istre*



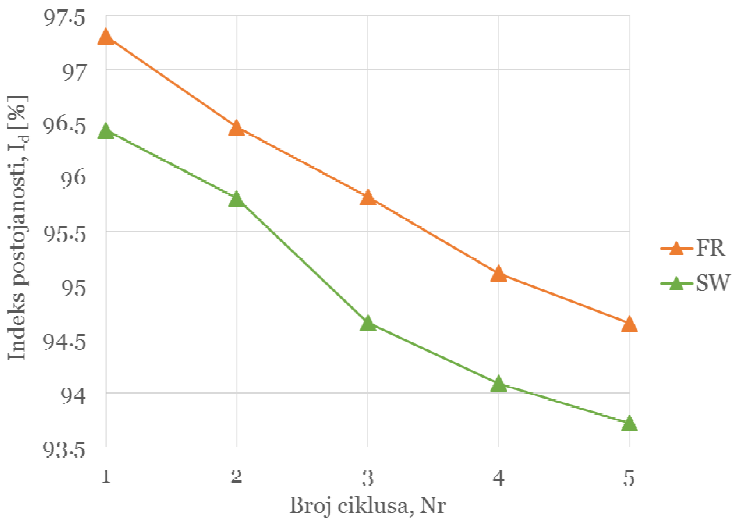
Slika 4.48 *Granulometrijska krivulja nakon drugog, petog i desetog ciklusa sušenja i vlaženja za uzorak flišne stijenske mase: a) I (FR), b) II (SW), c) III (MW) i d) V (CW) stupnja trošnosti iz Istre*

Rezultati deset ciklusa sušenja i vlaženja prikazani su u Tablici 4.16. Analizom tih rezultata utvrđeno je da indeks postojanosti ima vrlo visoke vrijednosti. Prema Gambleovoj (1971) klasifikaciji, i svježa i slabo trošna flišna stijenska masa pripadaju stijenskoj masi visoke postojanosti s indeksom postojanosti stijene nakon drugog ciklusa sušenja i vlaženja od 96,46 % za flišnu stijensku masu I (FR) stupnja trošnosti

i 95,8 % za flišnu stijensku masu II (SW) stupnja trošnosti. Na Slici 4.49 prikazana je promjena indeksa postojanosti, I_d, s brojem ciklusa, Nr, za uzorke flišne stijenske mase različitog stupnja trošnosti.

Tablica 4.16 *Rezultati ispitivanja postojanosti laboratorijskim oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja (DWT)*

		Indeks postojanosti, I_d				
		1.ciklus	2.ciklus	3. ciklus	4. ciklus	5. ciklus
Stupanj trošnosti	Oznaka	Id_1 [%]	Id_2 [%]	Id_3 [%]	Id_4 [%]	Id_5 [%]
I (FR)	8	97,30	96,46	95,82	95,11	94,64
II (SW)	9	96,43	95,8	94,65	94,09	93,72
		Indeks raspadanja, D_R				
		D_{R1}	D_{R2}	D_{R3}	D_{R4}	D_{R5}
I (FR)	8	0,8	0,77	0,74	0,73	0,7
II (SW)	9	0,77	0,73	0,68	0,64	0,61
		Modificirani indeks raspadanja, D_{RP}				
		D_{RP1}	D_{RP2}	D_{RP3}	D_{RP4}	D_{RP5}
I (FR)	8	0,21	0,23	0,26	0,28	0,3
II (SW)	9	0,23	0,27	0,32	0,36	0,39



Slika 4.49 *Dijagram indeksa postojanosti, I_d i broja ciklusa sušenja vlaženja, Nr za uzorak flišne stijenske mase I (FR) i II (SW) stupnja trošnosti iz Istre dobivenih oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja (DWT)*

Kako su provedenim ispitivanjima dobivene visoke vrijednosti indeksa postojanosti, a u prirodi se flišna stijenska masa značajno troši, raspada i usitnjava, potrebno je provjeriti stvarno ponašanje analizom granulometrijske krivulje, odnosno vrijednosti

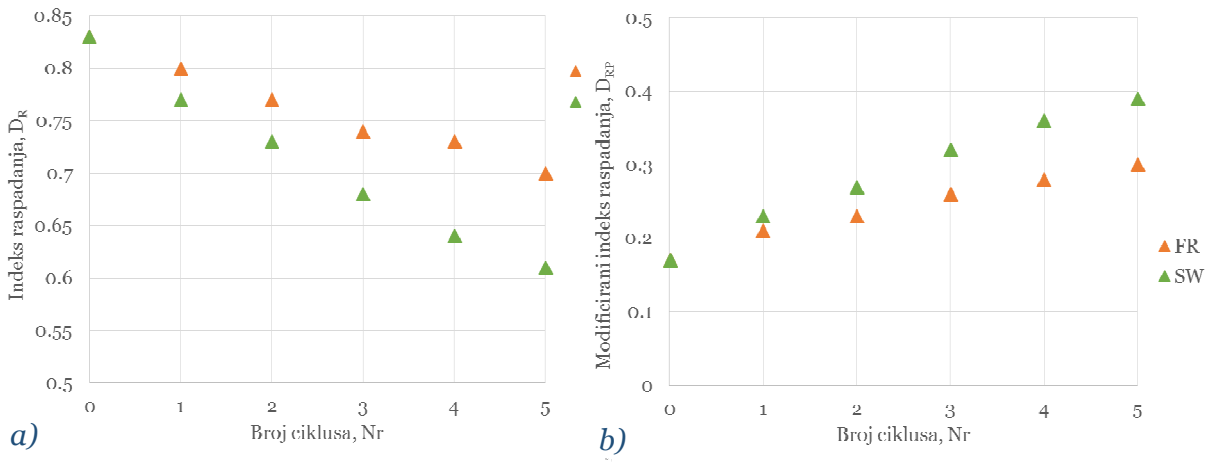
indeksa raspadanja, D_R. Prema klasifikaciji predloženoj od Erguler & Shakoor (2009), svježa i slabo trošna flišna stijenska masa pripadaju grupi srednje postojanih stijena s indeksom raspadanja od 0,77 za flišnu stijensku masu I (FR) stupnja trošnosti i 0,73 za flišnu stijensku masu II (SW) stupnja trošnosti. Slika 4.50 a prikazuje odnos između indeksa raspadanja, D_R, i broja ciklusa, Nr, za uzorke flišnu stijensku masu različitog stupnja trošnosti.

U prirodnim uvjetima uzorak je izložen vrlo velikom broju ciklusa sušenja i vlaženja pa se pomoću modificiranog indeksa raspadanja, D_{RP}, može predvidjeti raspadanje uzoraka u dužem vremenskom periodu. Slika 4.50 b prikazuje odnos između modificiranog indeksa raspadanja, D_{RP}, i broja ciklusa sušenja i vlaženja, Nr, za flišnu stijensku masu različitog stupnja trošnosti. Jednadžba 4.3 odgovara I (FR) stupnju trošnosti, a jednadžba 4.4 II (SW) stupnju trošnosti flišne stijenske mase:

$$D_{RP,FR} = 0{,}056 \cdot \ln(Nr) + 0{,}2024 \tag{4.3}$$

$$D_{RP,SW} = 0{,}1004 \cdot \ln(Nr) + 0{,}2179 \tag{4.4}$$

Iz predmetnih krivulja se može procijeniti broj ciklusa potreban da se postigne 50 % maksimalnog mogućeg raspadanja uzoraka stijene (D_{RP}=1), N_{50}. Broj ciklusa potreban da se postigne polovična degradacija flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti je 200 dok je za flišnu stijensku masu II (SW) stupnja trošnosti potreban značajno manji broj ciklusa sušenja i vlaženja, točnije samo 16 ciklusa.



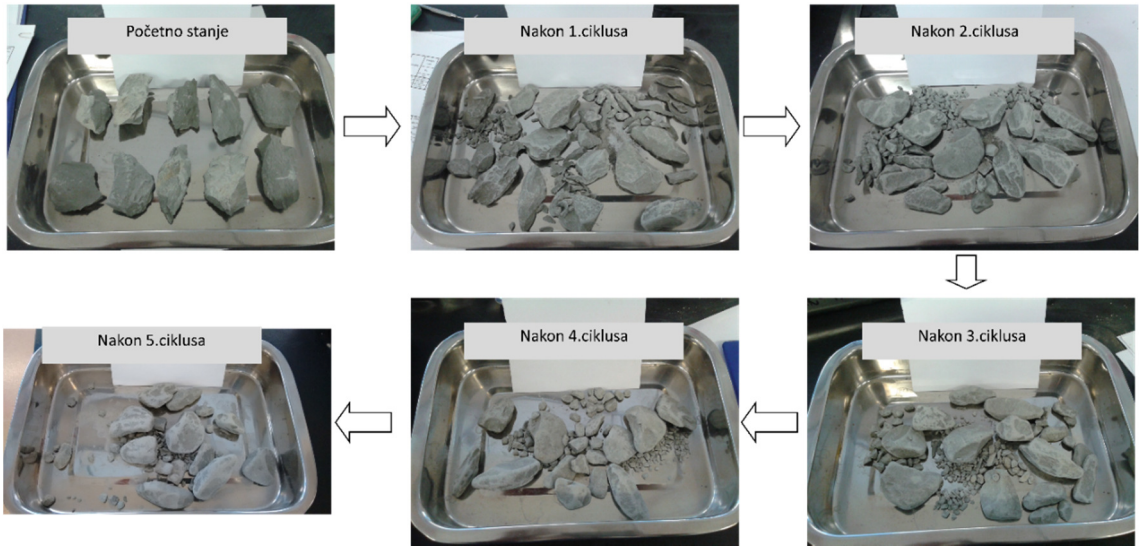
Slika 4.50 *Odnos između broja ponavljanja ciklusa sušenja i vlaženja, Nr, i: a) indeksa raspadanja, D_R, b) modificiranog indeksa raspadanja, D_{RP}, dobivenih oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja (DWT)*

4.6.1.5.2. Postupak i rezultati ispitivanja postojanosti sitnozrnastih litoloških članova fliša dinamičkim uređajem za ispitivanje postojanosti

Ispitivanje postojanosti provedeno je dinamičkim uređajem za ispitivanje postojanosti (eng. *Slake Durability Test*, SDT) na uzorcima flišne stijenske mase I (FR) i III (MW) stupnja trošnosti s dvije lokacije u Istri: pokos izgrađen u flišnoj stijenskoj masi blizu sela Sovinjak (oznake uzorka: (1) i (2)) i izdanak flišne stijenske mase blizu sela Cunj (oznake uzorka (3), (4), (5) i (6)). Priprema uzoraka i ispitivanje postojanosti izvedeni su prema standardu ASTM (2004), a provedeno je pet ciklusa sušenja i vlaženja. Rezultati ispitivanja postojanosti kombinirani su s analizama granulometrijskih krivulja koje su određene sijanjem kroz sita 50, 37,5, 31,5, 28, 20, 14, 10, 6,3, 5 i 2 mm. Na Slici 4.51 prikazano je ponašanje materijala istog stupnja trošnosti s dvije različite lokacije u Istri unutar pet provedenih ciklusa.

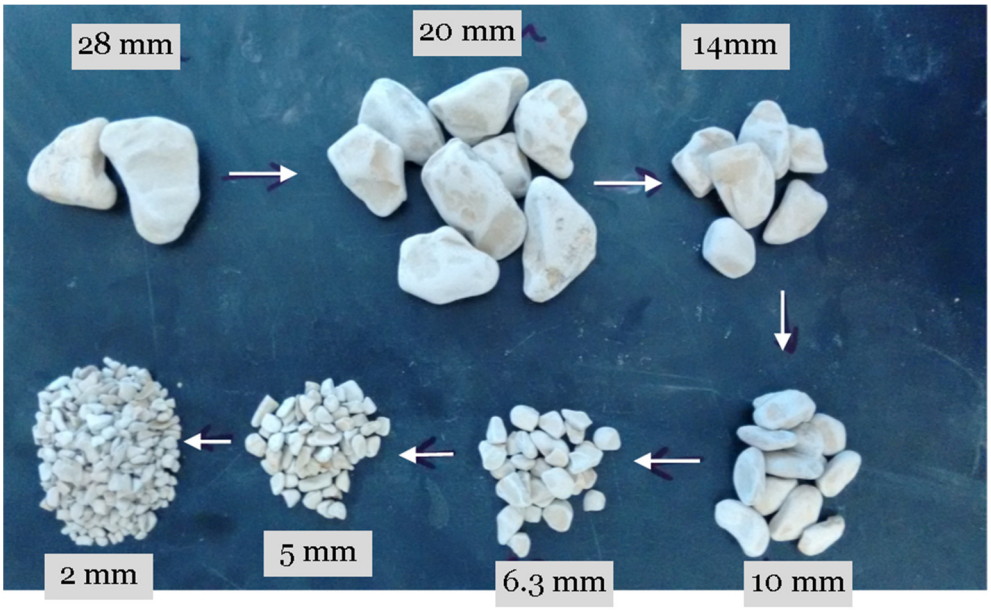
Slika 4.51 *Uzorak flišne stijenske mase u početnom stanu (lijevo), nakon drugog ciklusa (sredina) i nakon petog ciklusa (desno) ispitivanja postojanosti (SDT): a) I (FR) stupnja trošnosti (3), b) III (MW) stupnja trošnosti (4), c) I (FR) stupnja trošnosti (1), d) III (MW) stupnja trošnosti (2)*

Uzorci s lokacije Cunj su se zaoblili i neznatno raspali u manje komade (Slika 4.51 a, b) dok su se uzorci s lokacije Sovinjak znatno raspali i s povećanjem broja ciklusa raspali u fragmente različitih veličina (Slika 4.51 c, d, Slika 4.52).



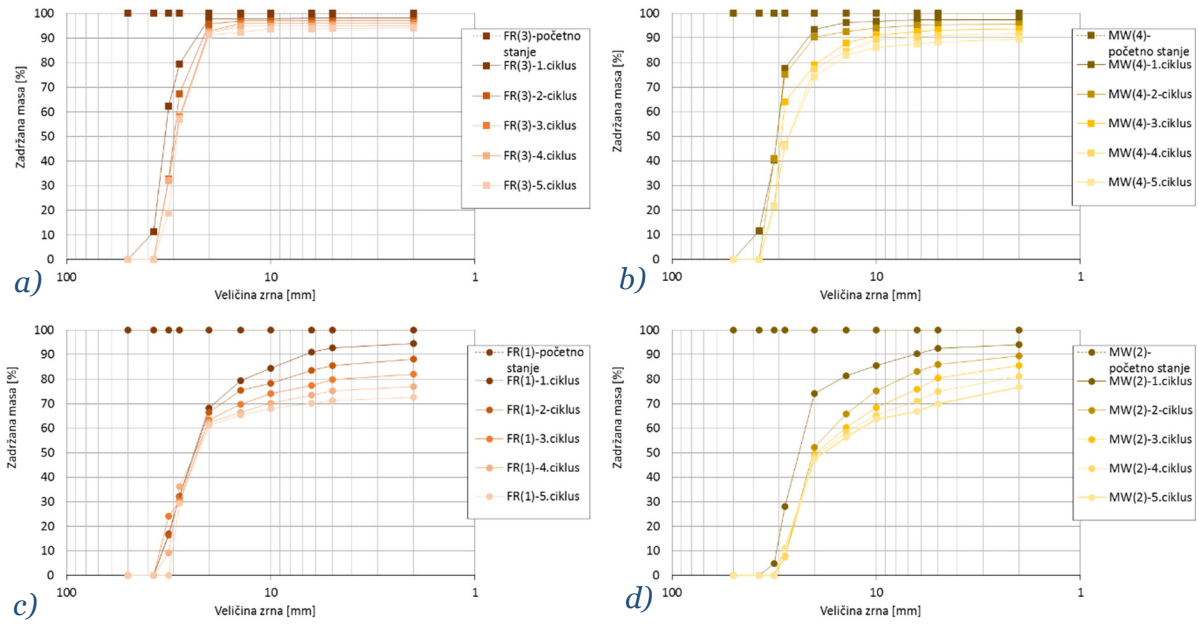
Slika 4.52 *Primjer trošenja uzorka flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti (1) tijekom ispitivanja postojanosti (SDT), Id_2=88,31 %*

Slika 4.53 prikazuje primjer razbijanja uzorka flišnih odlomaka I (FR) stupnja trošnosti (1) na odlomke različitih veličina preostalih u bubnju nakon petog ciklusa.



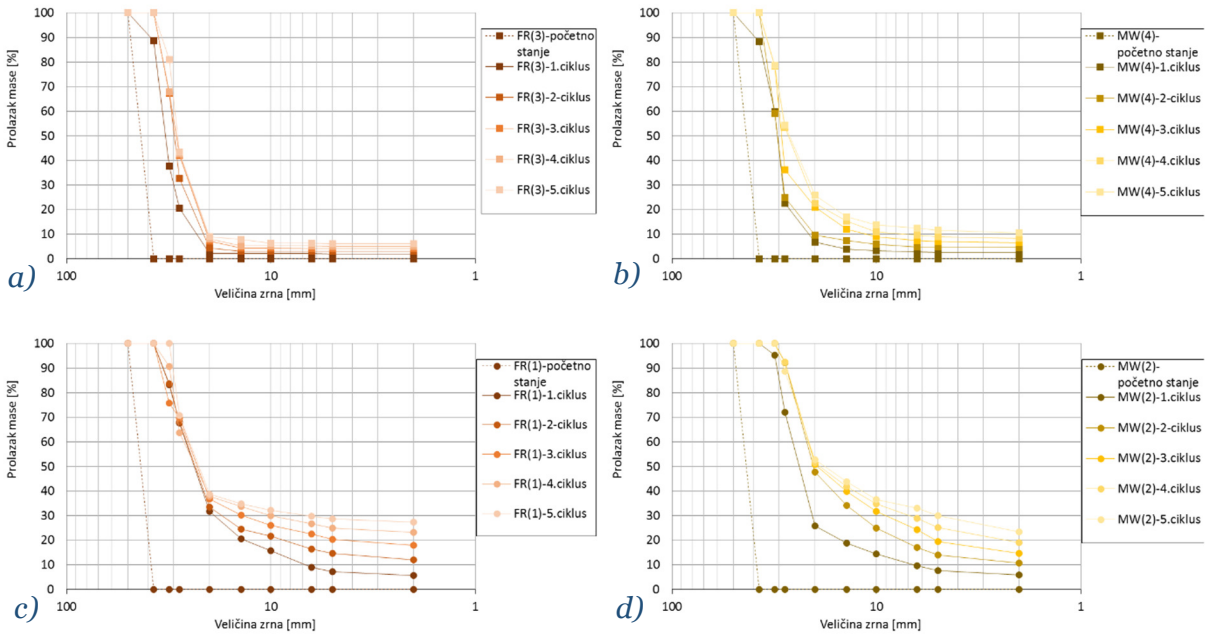
Slika 4.53 *Odlomci različitih veličina preostali u bubnju nakon petog ciklusa ispitivanja postojanosti (SDT) na uzorku flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti (1)*

Slika 4.54 prikazuje razvoj granulometrijske krivulje zadržane mase uzorka na situ tijekom pet ciklusa ispitivanja postojanosti za uzorke flišne stijenske mase s lokacije Cunj I (FR) stupnja trošnosti (3) (Slika 4.54 a) i III (MW) stupnja trošnosti (4) (Slika 4.54 b), te uzorke s lokacije Sovinjak I (FR) stupnja trošnosti (1) (Slika 4.54 c)i III (MW) stupnja trošnosti (2) (Slika 4.54 d).



Slika 4.54 *Granuloumetrijska krivulja zadržane mase uzorka na situ kroz pet ciklusa ispitivanja postojanosti (SDT) za uzorak: a) (3), b) (4), c) (1), d) (2)*

Granulometrijske krivulje prolaska mase uzorka na situ potrebne su za određivanje modificiranog indeksa raspadanja, D_{RP}. Na Slici 4.55 prikazan je razvoj granulometrijske krivulje prolaska mase tijekom pet ciklusa ispitivanja postojanosti za uzorke flišne stijenske mase s lokacije Cunj I (FR) stupnja trošnosti (3) (Slika 4.55 a) i III (MW) stupnja trošnosti (4) (Slika 4.55 b), te uzorke s lokacije Sovinjak I (FR) stupnja trošnosti (1) (Slika 4.55 c)i III (MW) stupnja trošnosti (2) (Slika 4.55 d).



Slika 4.55 *Granuloumetrijska krivulja prolaska mase uzorka na situ kroz pet ciklusa ispitivanja postojanosti (SDT) za uzorak: a) (3), b) (4), c) (1), d) (2)*

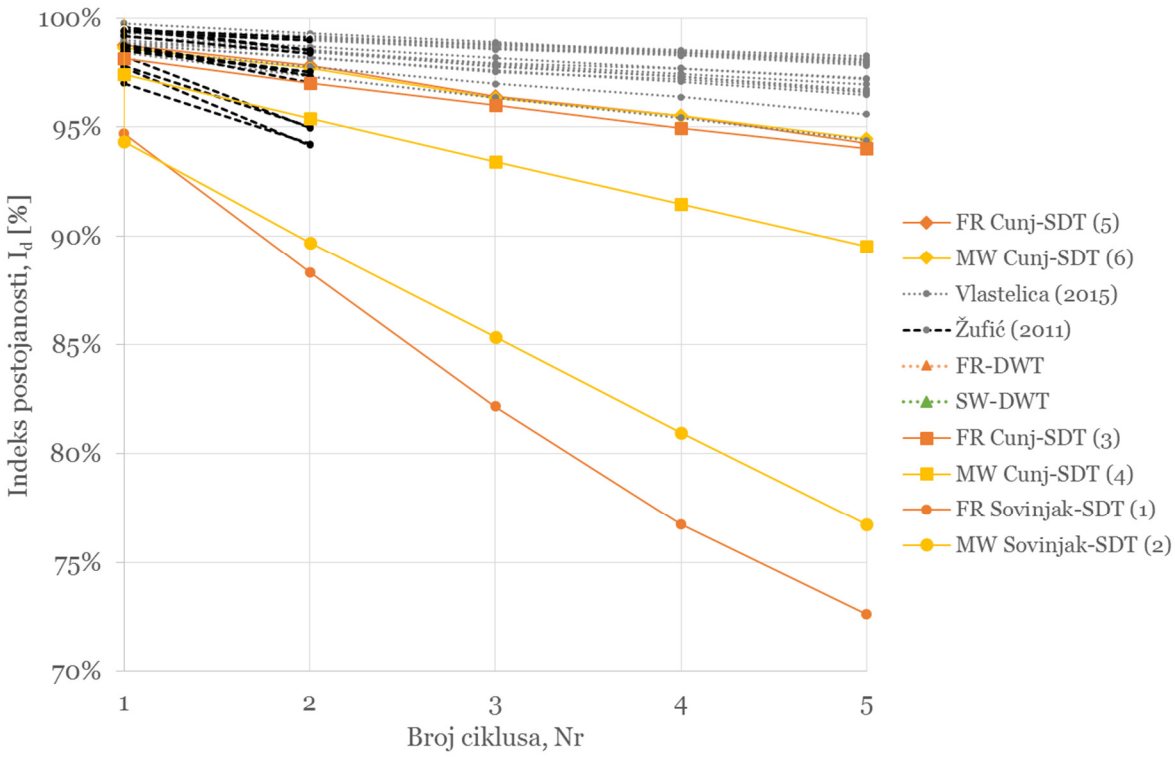
Određen je indeks postojanosti, I_d, indeks raspadanja, D_R, te modificirani indeks raspadanja, D_{RP}, za sve uzorke flišne stijenske mase I (FR) i III (MW) stupnja trošnosti u Istri na lokaciji Sovinjak (oznake uzorka (1) i (2)) i lokaciji Cunj (oznake uzorka (3), (4), (5) i (6)) nakon prvog, drugog, trećeg, četvrtog i petog ciklusa ispitivanja postojanosti, a rezultati su prikazani u Tablici 4.17.

Tablica 4.17 *Rezultati ispitivanja postojanosti dinamičkim uređajem za ispitivanje postojanosti (SDT)*

			Indeks postojanosti, I_d				
			1.ciklus	2.ciklus	3. ciklus	4. ciklus	5. ciklus
Stupanj trošnosti	Oznaka	Lokacija uzorkovanja	Id_1 [%]	Id_2 [%]	Id_3 [%]	Id_4 [%]	Id_5 [%]
I (FR)	(1)	Sovinjak	94,71	88,31	82,16	76,75	72,60
III(MW)	(2)		94,35	89,69	85,34	80,97	76,75
I (FR)	(3)	Cunj	98,15	97,03	95,99	94,96	94,01
III(MW)	(4)		97,41	95,39	93,40	91,45	89,52
I (FR)	(5)		98,76	97,82	96,41	95,51	94,24
III(MW)	(6)		98,64	97,73	96,32	95,52	94,45
			Indeks raspadanja, D_R				
			D_{R1}	D_{R2}	D_{R3}	D_{R4}	D_{R5}
I (FR)	(1)	Sovinjak	0,69	0,65	0,61	0,58	0,55
III(MW)	(2)		0,69	0,60	0,56	0,53	0,50
I (FR)	(3)	Cunj	0,84	0,81	0,79	0,78	0,76
III(MW)	(4)		0,82	0,79	0,75	0,72	0,69
			Modificirani indeks raspadanja, D_{RP}				
			D_{RP1}	D_{RP2}	D_{RP3}	D_{RP4}	D_{RP5}
I (FR)	(1)	Sovinjak	0,30	0,35	0,39	0,42	0,50
III(MW)	(2)		0,31	0,41	0,45	0,47	0,50
I (FR)	(3)	Cunj	0,16	0,20	0,21	0,22	0,24
III(MW)	(4)		0,18	0,22	0,25	0,28	0,31

Slika 4.56 prikazuje odnos indeksa postojanosti i broja ciklusa ispitivanja postojanosti dinamičkim uređajem za ispitivanje postojanosti na uzorcima flišne stijenske mase iz Istre s lokacije Sovinjak I (FR) i III (MW) stupnja trošnosti (oznake uzorka (1) i (2)) te s lokacije Cunj (oznake uzorka (3), (4), (5) i (6)). Vrijednost indeksa postojanosti nakon drugog ciklusa, I_{d2}, s lokacije Cunj za uzorak flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti kreće se od 97,03 do 97,82 %, za uzorak flišne stijenske mase III (MW) stupnja trošnosti kreće se od 95,99 do 96,41 %. Uzorci pripadaju stijenskoj masi visoke postojanosti prema Gambleovoj (1971) klasifikaciji. Uzorci svježe flišne stijenske mase imaju viši indeks postojanosti od uzoraka flišne stijenske mase veće trošnosti. Rezultati indeksa postojanosti na uzorcima flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti s lokacije Cunj dobiveni dinamičkim uređajem za ispitivanje postojanosti (SDT) (Tablica 4.17) imaju slične vrijednosti indeksa postojanosti dobivenih oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja (DWT) (Tablica 4.16). Vrijednosti indeksa postojanosti s lokacije Cunj pokazuju dobro poklapanje s rezultatima istraživanja prema Žufić (2011), gdje se vrijednost indeksa postojanosti nakon drugog ciklusa kreće u granicama od 94,1 do 98,99 %. Sličan raspon vrijednosti od 97,31 do 99,29% utvrdio je Vlastelica (2015) na uzorcima lapora iz Dalmacije.

Uzorci s lokacije Sovinjak imaju niži indeks postojanosti od uzoraka s lokacije Cunj. Zanimljivo je primijetiti da s lokacije Sovinjak uzorak flišne stijenske mase III (MW) stupnja trošnosti ima viši indeks postojanosti (89,69 %) od I (FR) stupnja trošnosti (88,31 %). Uzorci pripadaju grupi srednje do visoko postojanih stijena prema Gambleu (1971). Međutim, osim ostanka mase u bubnju, potrebno je analizirati i granulometrijski sastav istih uzoraka.

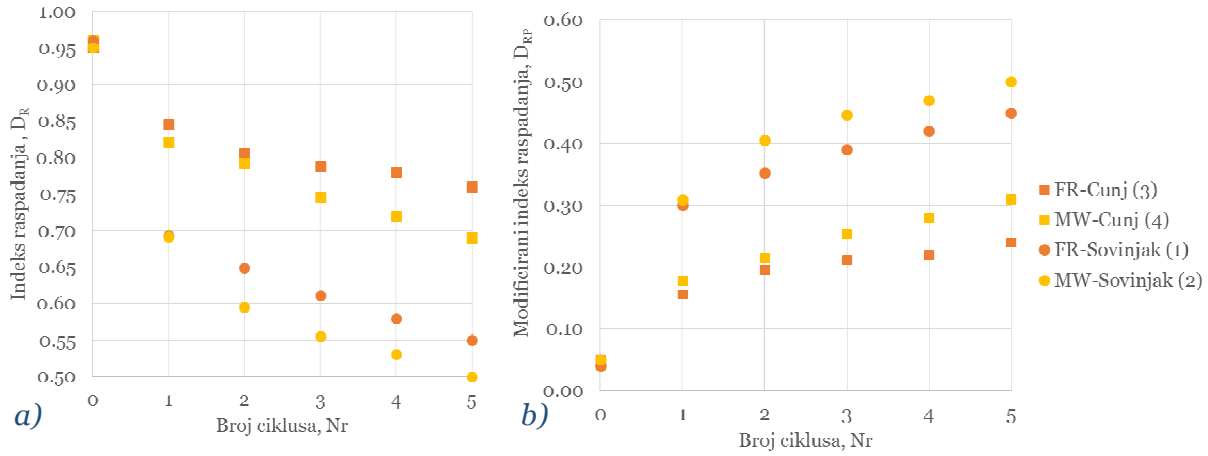


Slika 4.56 *Odnos između indeksa postojanosti, I_d, i broja ponavljanja ciklusa, Nr, dobivenih ispitivanjem postojanosti dinamičkim uređajem (SDT) i oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja (DWT) te od strane drugih autora*

Vrijednosti indeksa raspadanja, D_R, padaju s porastom broja ciklusa te s porastom stupnja trošnosti uzorka kao što je prikazano na Slici 4.57 a. Indeks raspadanja nakon drugog ciklusa s lokacije Cunj uzorka flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti iznosi 0,81 i viši je od uzorka III (MW) stupnja trošnosti koji iznosi 0,79.

Razmatrajući samo indeks postojanosti nakon drugog ciklusa uzoraka flišne stijenske mase s lokacije Sovinjak moglo bi se zaključiti da je trošna flišna stijenska masa postojanija od svježe. Međutim, uzimajući u obzir i granulometrijski sastav, vidljivo je da se trošna flišna stijenska masa značajnije raspada od svježe, što je dokazano višom vrijednosti indeksa raspadanja nakon drugog ciklusa uzorka flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti od 0,65 u odnosu na uzorak III (MW) stupnja trošnosti od 0,60. Uzorci pripadaju grupi srednje do visoko postojanih stijena prema klasifikaciji predloženoj od Erguler & Shakoor (2009). Uzorci flišne stijenske mase s lokacije Sovinjak imaju nižu postojanost od uzoraka s lokacije Cunj.

Slika 4.57 b prikazuje odnos modificiranog indeksa raspadanja, D_{RP}, i broja ponavljanja ciklusa sušenja i vlaženja, Nr.

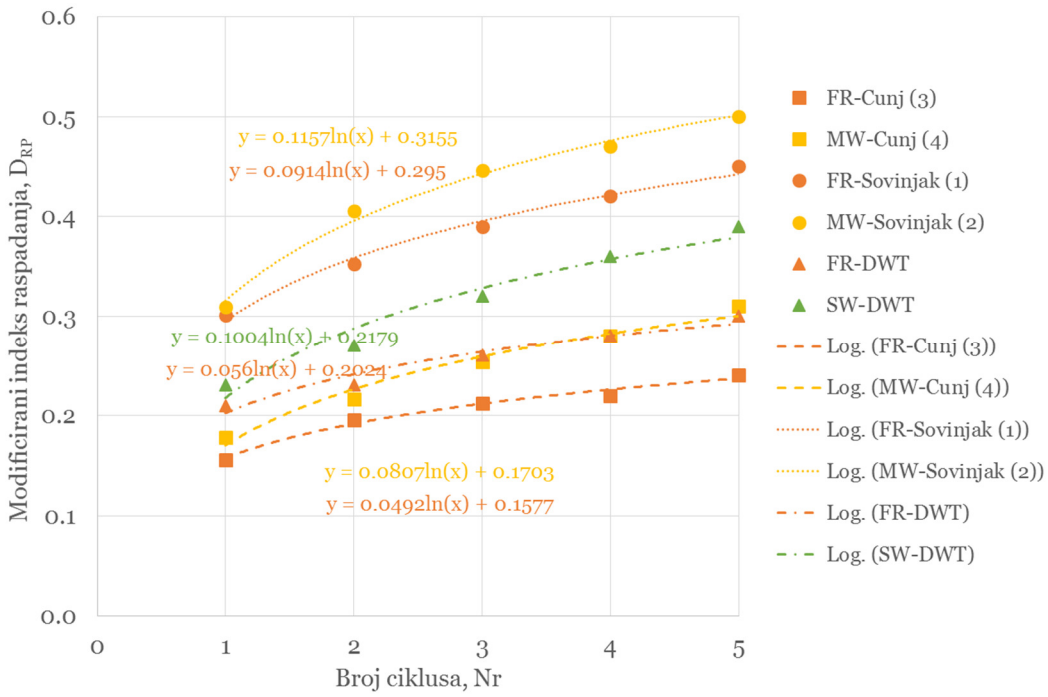


Slika 4.57 *Odnos između broja ponavljanja ciklusa, Nr i: a) indeksa raspadanja, D_R, b) modificiranog indeksa raspadanja, D_{RP}, dobivenih ispitivanjem postojanosti dinamičkim uređajem (SDT)*

Broj ciklusa potreban da se postigne 50 % maksimalnog mogućeg raspadanja uzorka flišne stijenske mase, N_{50}, prikazan je u Tablici 4.18. Uzorci s lokacije Cunj su znatno postojaniji od uzoraka s lokacije Sovinjak te se i broj ciklusa znatno razlikuje. Na lokaciji Cunj, broj ciklusa potreban da se postigne polovična degradacija uzorka I (FR) stupnja trošnosti je 1.050, a uzorka III (MW) stupnja trošnosti je 60. Na lokaciji Sovinjak su ti iznosi značajno manji, za uzorak I (FR) stupnja trošnosti potrebno je devet ciklusa za postizanje polovične degradacije, a za uzorak III (MW) stupnja trošnosti samo pet ciklusa. Slika 4.58 prikazuje korelacijske krivulje između modificiranog indeksa raspadanja, D_{RP}, i broja ponavljanja ciklusa sušenja i vlaženja, Nr.

Tablica 4.18 *Odnos modificiranog indeksa postojanosti, D_{RP}, s brojem ciklusa potrebnih da se postigne 50% maksimalnog mogućeg raspadanja uzorka*

Stupanj trošnosti	Oznaka	Lokacija uzorkovanja	Izraz	R^2	N_{50}
I (FR)	(1)	Sovinjak	D_{RP} =0,0914 ln(Nr) + 0,295	0,9879	9
III(MW)	(2)		D_{RP} =0,1157 ln(Nr) + 0,3155	0,9915	5
I (FR)	(3)	Cunj	D_{RP} =0,0492 ln(Nr) + 0,1577	0,9814	1.050
III(MW)	(4)		D_{RP} =0,0807 ln(Nr) + 0,1703	0,9727	60



Slika 4.58 *Korelacijske krivulje između broja ponavljanja ciklusa, Nr, i modificiranog indeksa raspadanja, D_{RP}, dobivenih ispitivanjem postojanosti dinamičkim uređajem (SDT) i oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja (DWT)*

4.6.2. Utjecaj trošenja na mineraloške značajke sitnozrnastih litoloških članova fliša

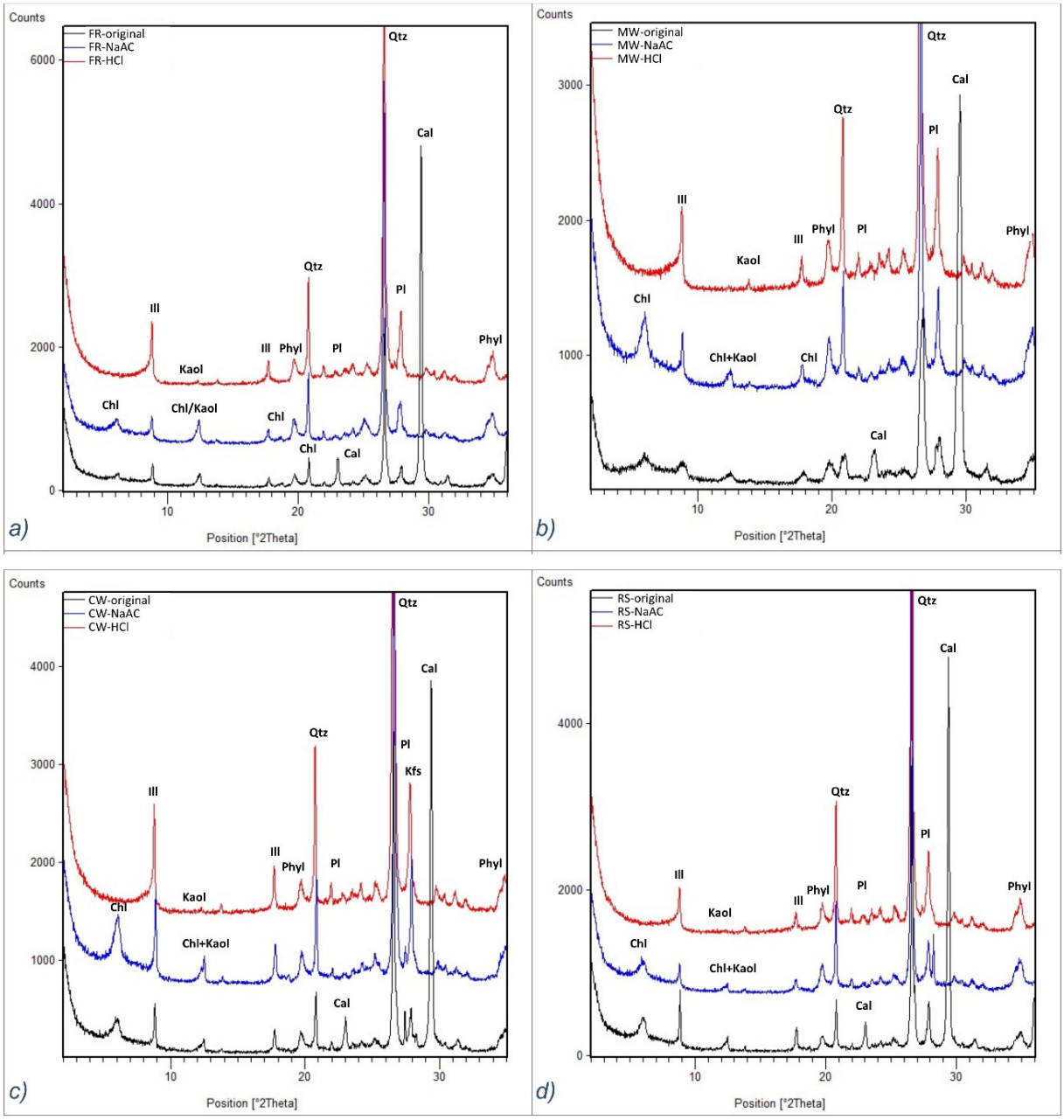
U nastavku su prikazani rezultati ispitivanja utjecaja trošenja na mineraloške značajke sitnozrnastih litoloških članova fliša uzorkovanih na izdanku flišne stijenske mase u Istri i bliskim izdancima flišne stijenske mase u dolini Rječine.

Provedene su mineraloške analize:

- uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti - I (FR), III (MW), V (CW) i VI (RS) s flišnog izdanku blizu sela Cunj u Istri (Slika 4.5 a) ;
- uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti - I (FR), II (SW), III (MW) i V (CW) s flišnih izdanaka u dolini Rječine (Slika 4.7).

4.6.2.1. Utjecaj trošenja na mineraloške značajke sitnozrnastih litoloških članova fliša iz Istre

Difraktogrami originalnih neorijentiranih uzoraka različitih stupnjeva trošnosti prikazani su zajedno s difraktogramima njihovih netopivih ostataka, tj. nakon otapanja puferom Na-acetat/octena kiselina (pri pH 5) koji otapa kalcit, te nakon otapanja s HCl 1:1 koja otapa klorit na Slici 4.59. Crna linija prikazuje difraktograme originalnih uzoraka, plava linija netopive ostatke nakon otapanja u puferu pri pH5 i crvena linija netopivi ostatak nakon otapanja u kloridnoj kiselini.



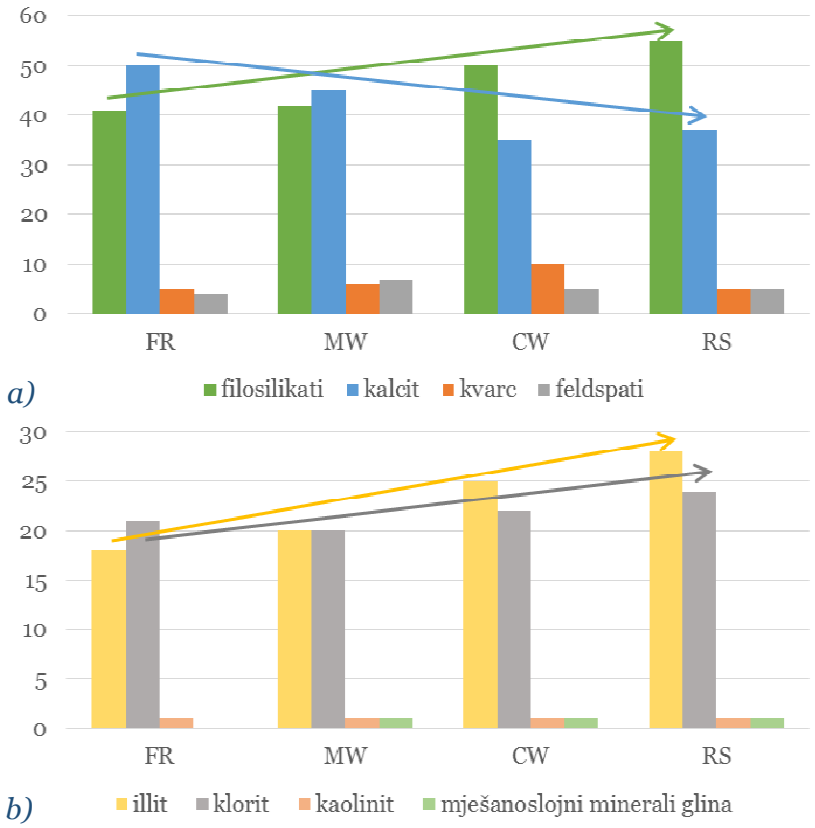
Slika 4.59 *Dio difrakcijskih slika neorijentiranih uzoraka flišne stijenske mase: a) I (FR), b) III (MW), c) V (CW) stupnja trošnosti i d) rezidualnog tla (RS) iz Istre*

Na temelju otapanja (kalcit i klorit), te usporedbom s difraktogramima standarda uzorci imaju sljedeći mineralni sastav (Tablica 4.19): kalcit (35-50%, uglavnom se smanjujući s porastom stupnja trošnosti stijene), kvarc (5-10%), plagioklasi (do 10%), K-feldspat (trag u samo jednom uzorku), te minerali glina (40-55%). Od minerala glina u uzorcima su utvrđene značajne količine illita i klorita, te u tragovima kaolinita i mješanoslojnih minerala glina. Udio pojedinih minerala glina, kao i ukupni udio minerala glina raste dok se sadržaj kalcita smanjuje s porastom stupnja trošnosti (Slika 4.60).

Tablica 4.19 *Udio minerala u uzorcima flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz Istre*

Oznaka uzorka	Cal	Qtz	Pl	Kfs	Ill	Chl	Kaol	ML	Minerali glina
FR	50	~ 5	<5	-	15-20	21	*	-	~ 40
SW	45	~ 5	5-10	-	15-20	20	*	*	~ 40
CW	35	5-10	5-10	*	~25	22	*	**	~ 50
RS	37	5-10	5-10	-	~30	24	*	**	~ 55

*Cal = kalcit, Qtz = kvarc, Pl = plagioklasi, Kfs = K-feldspat, Ill = illit, Chl = klorit, Kaol = kaolinit, ML = mješanoslojni minerali glina, - = bez prisustva minerala, * = mineral u tragovima, ** = manje količine minerala*



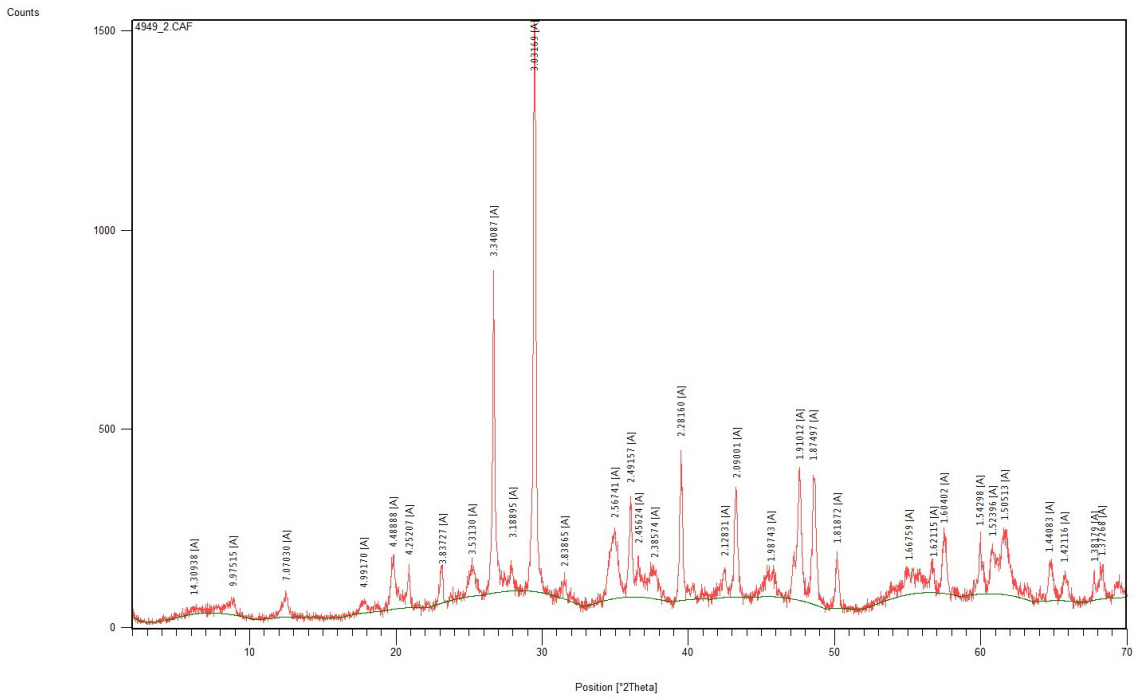
Slika 4.60 *a) Mineralni sastav i b) minerali glina u uzorcima flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz Istre*

Kapacitet kationske zamjene (CEC) uzoraka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti kreće se od 8,1 do 14,8 14.8 meq/100 g. CEC raste s porastom stupnja trošnosti kao što je prikazano u Tablici 4.20.

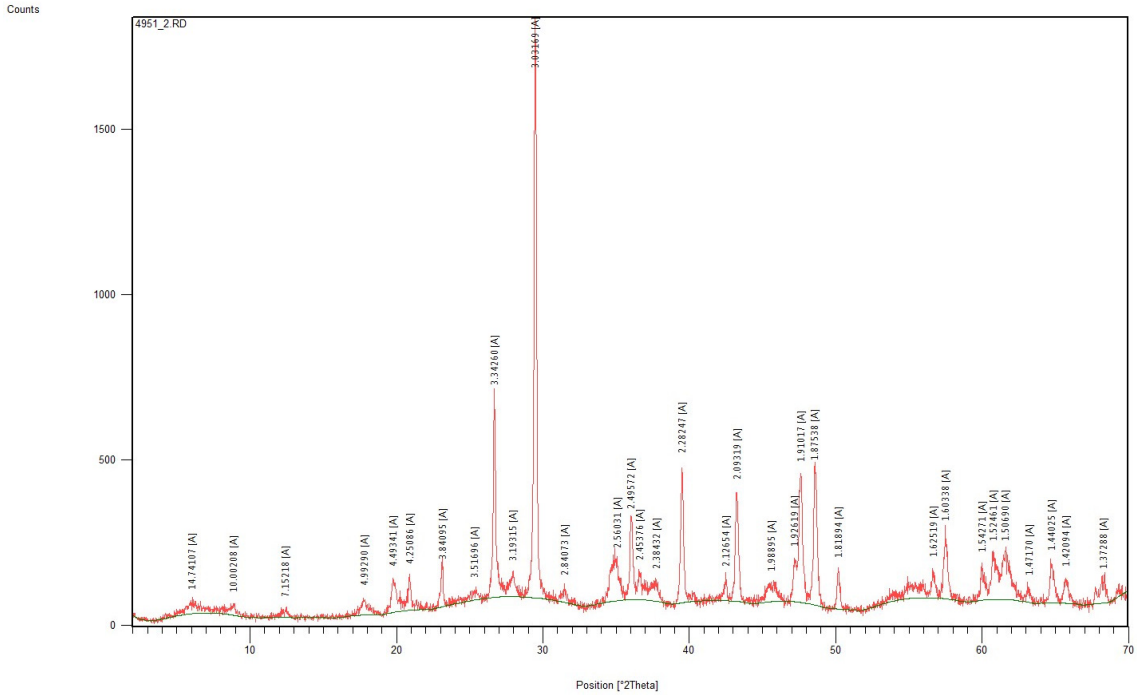
Tablica 4.20 *Kapacitet kationske zamjene uzoraka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz Istre*

Oznaka uzorka	CEC (meq/100g)
FR	8,1
SW	7,1
CW	10,2
RS	14,8

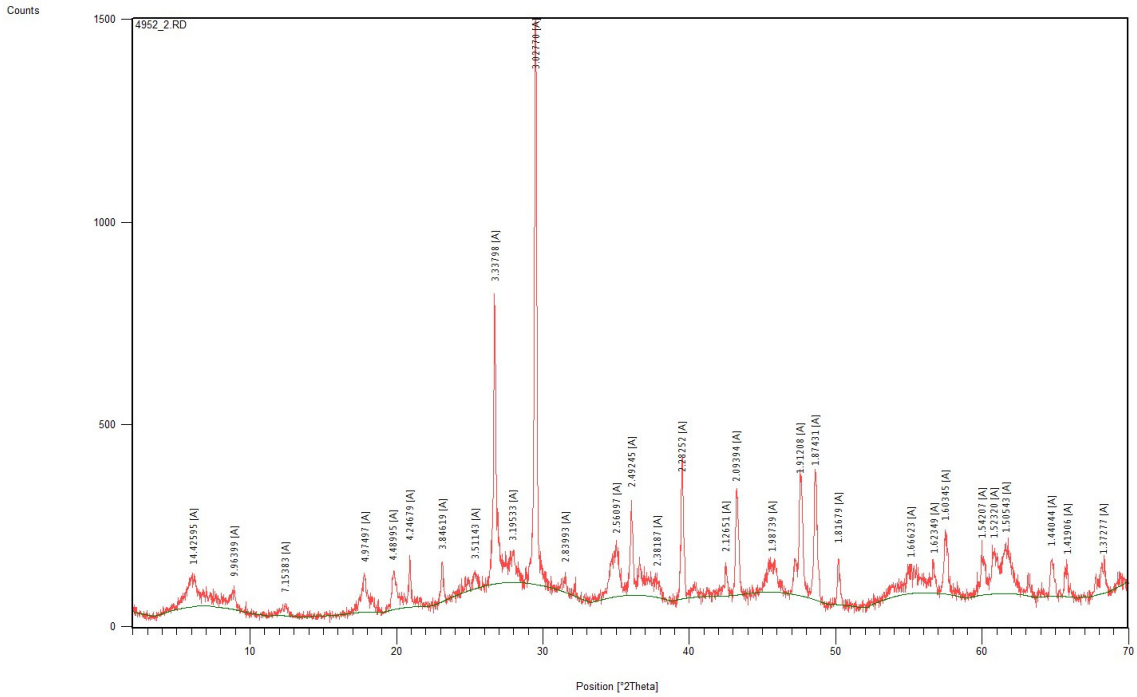
Frakcija glina (<2 μm) analiziranih uzoraka sastoji se od manjih količina kvarca i kalcita, moguće neznatnih količina plagioklasa te od značajnih količina minerala glina (Slike 4.61 - 4.64).



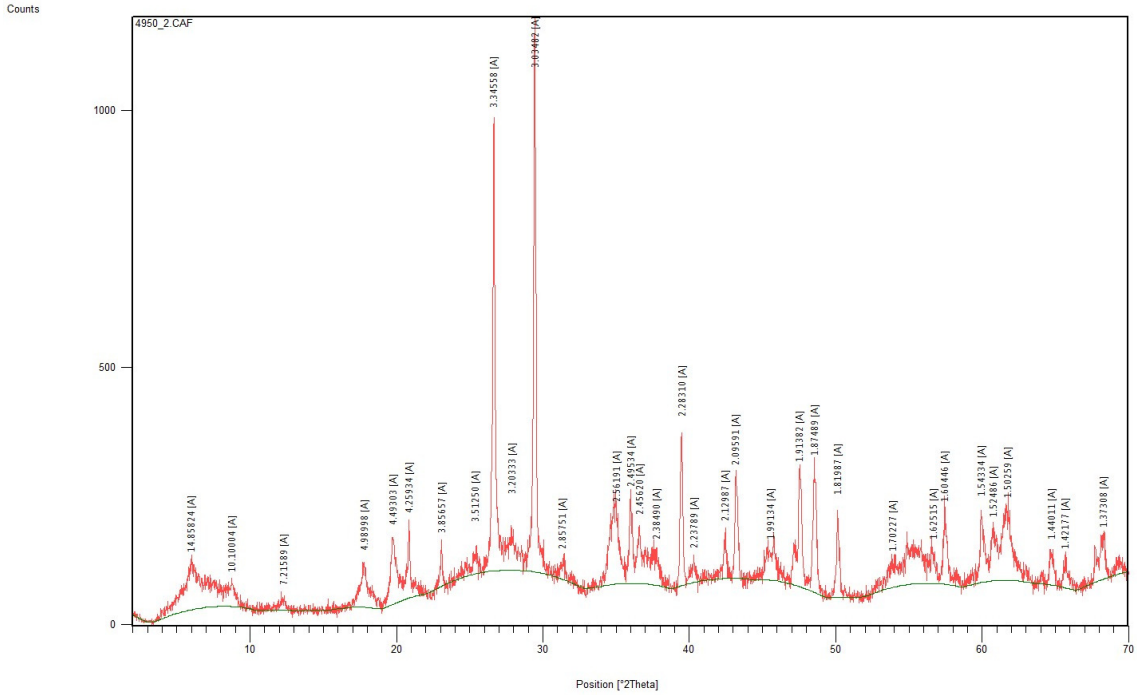
Slika 4.61 *Difrakcijska slika neorijentirane frakcije čestica < 2 μm uzorka flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti iz Istre*



Slika 4.62 *Difrakcijska slika neorijentirane frakcije čestica < 2 μm uzorka flišne stijenske mase III (MW) stupnja trošnosti iz Istre*

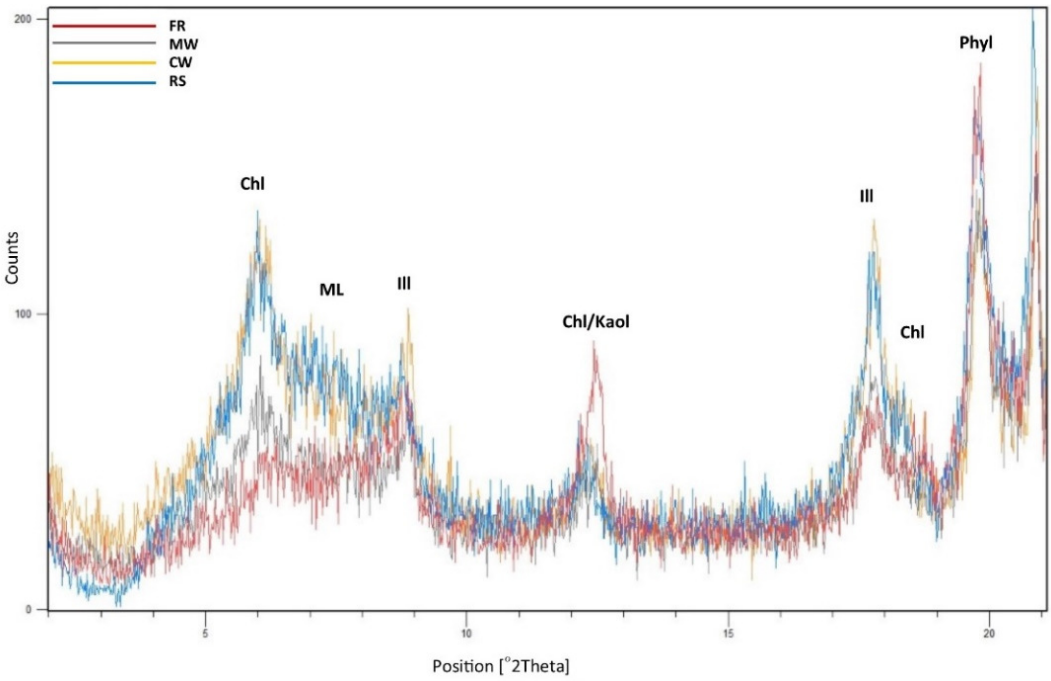


Slika 4.63 *Difrakcijska slika neorijentirane frakcije čestica < 2 μm uzorka flišne stijenske mase V (CW) stupnja trošnosti iz Istre*



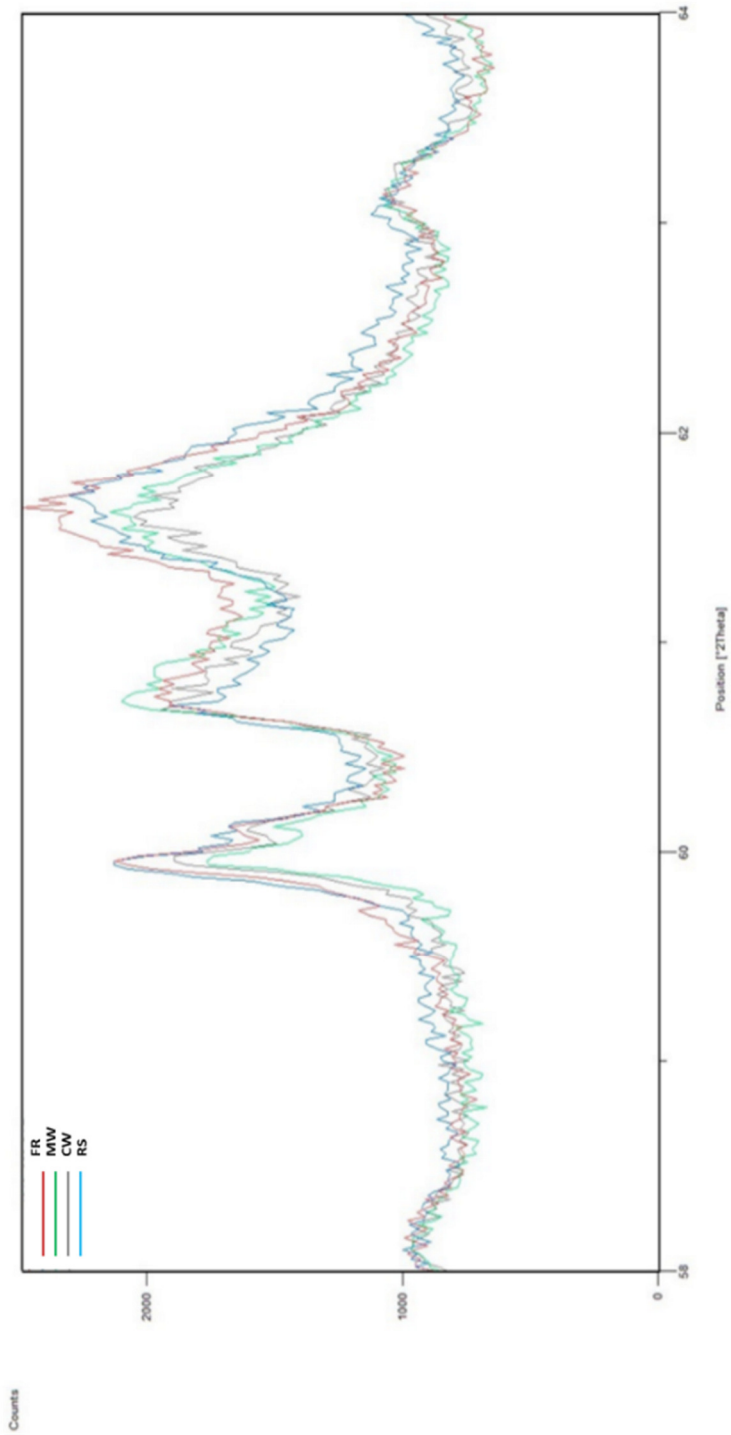
Slika 4.64 *Difrakcijska slika neorijentirane frakcije čestica < 2 µm uzorka rezidualnog tla iz Istre*

U svim uzorcima vidljivi su difrakcijski maksimumi minerala glina na 14 Å, 10 Å i 7 Å čiji se intenziteti razlikuju među uzorcima (Slika 4.65). Najveće razlike difrakcijskih maksimuma nalaze se na poziciji klorita, illita i mješanoslojnih minerala glina.



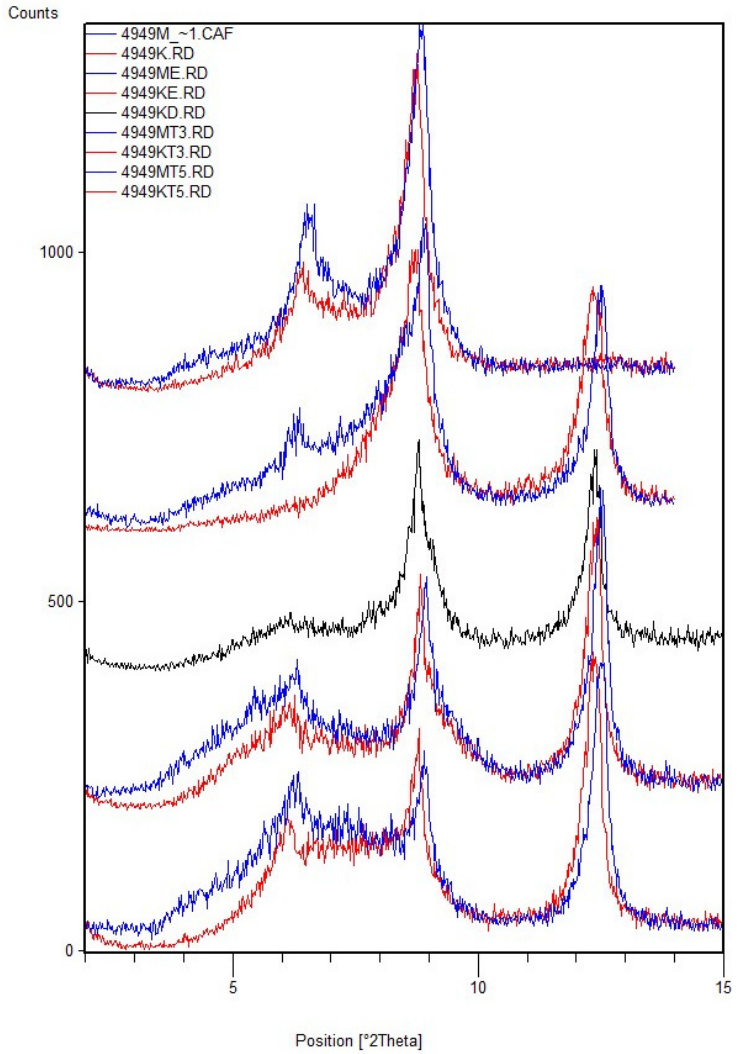
Slika 4.65 *Difrakcijske slike neorijentiranih frakcija čestica < 2 µm uzorka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz Istre u području niskih kuteva °2θ (područje razlikovanja pojedinih minerala glina)*

Karakter oktaedrijske mreže filosilikata u svim uzorcima je jednak i ukazuje na dioktaedrijske gline, tj. illitični materijal (difrakcijski maksimum na 61,7°2θ, tj. međumrežni razmak d=1,5 Å), te moguće na trioktaedrijske gline, tj. klorite koji su dijelom maskirani difrakcijskim maksimumom kvarca na približno 60°2θ(Slika 4.66).



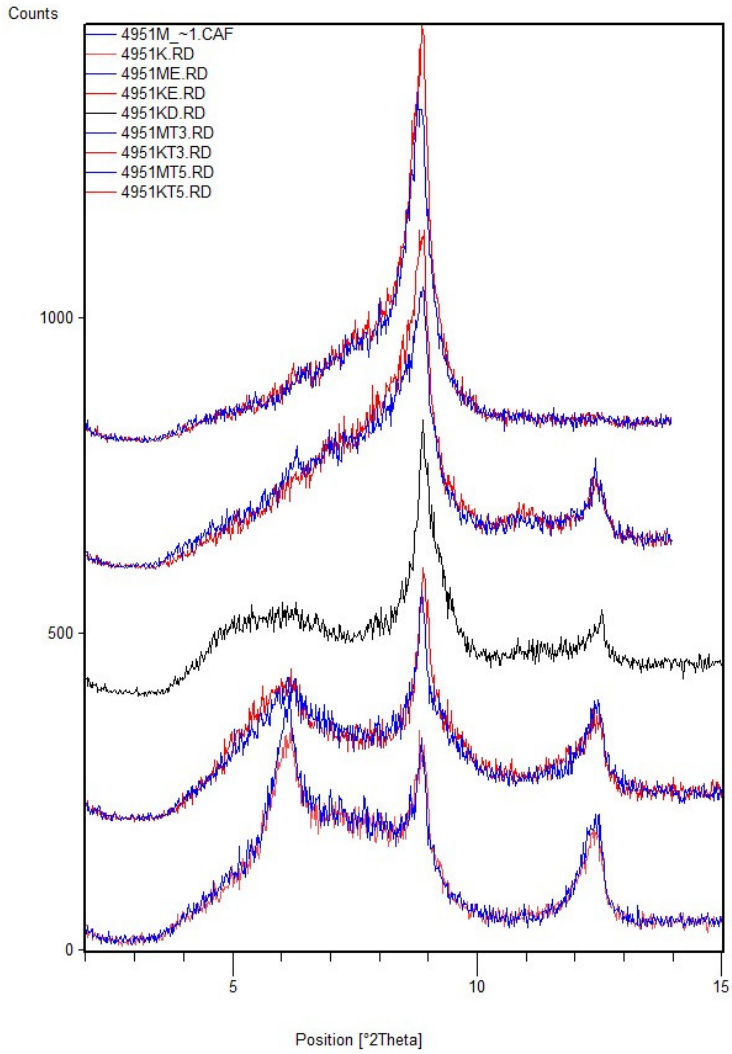
Slika 4.66 *Difrakcijske slike neorijentiranih frakcija čestica < 2 µm uzoraka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz Istre u području visokih kuteva °2θ, tj. oko 60 °2θ (područje za određivanje karaktera oktaedrijske mreže filosilikata pomoću 060 refleksa minerala glina)*

Uzorak flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti (Slika 4.67) od minerala glina sadrži značajne količine klorita i illitičnog materijala, te neznatne količine dobro kristaliziranog kaolinita. Postoje naznake da u uzorku postoji loše kristalizirani kaolinit, no ne može se sa sigurnošću utvrditi jer je moguće da je difrakcijski maksimum na 7 Å zapravo 002 refleks klorita (tako jaki 002 refleks kod klorita je rezultat visokog udjela željeza). U ovom uzorku postoje naznake i o postojanju nepravilno interstratificiranog minerala glina. Nema indicija za bubreće minerale glina iz grupe smektita i vermikulita.



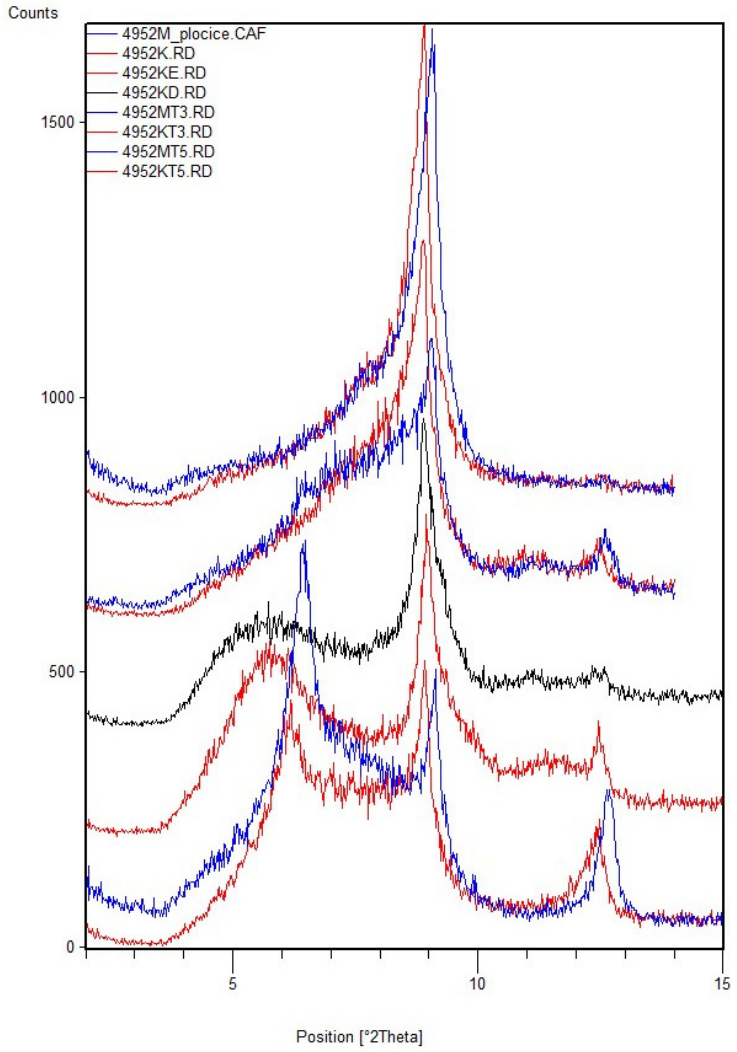
Slika 4.67 *Difrakcijske slike orijentirane frakcije < 2 μm uzorka flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti iz Istre nakon pojedinih tretmana*

Uzorak flišne stijenske mase III (MW) stupnja trošnosti (Slika 4.68) od minerala glina sadrži značajne količine illitičnog materijala, dobro i loše kristalizirani kaolinit i 14 Å mineral koji se pri tretmanima ponaša slično kao i u prethodnom uzorku. U uzorku ima i nepravilno interstratificiranih minerala.



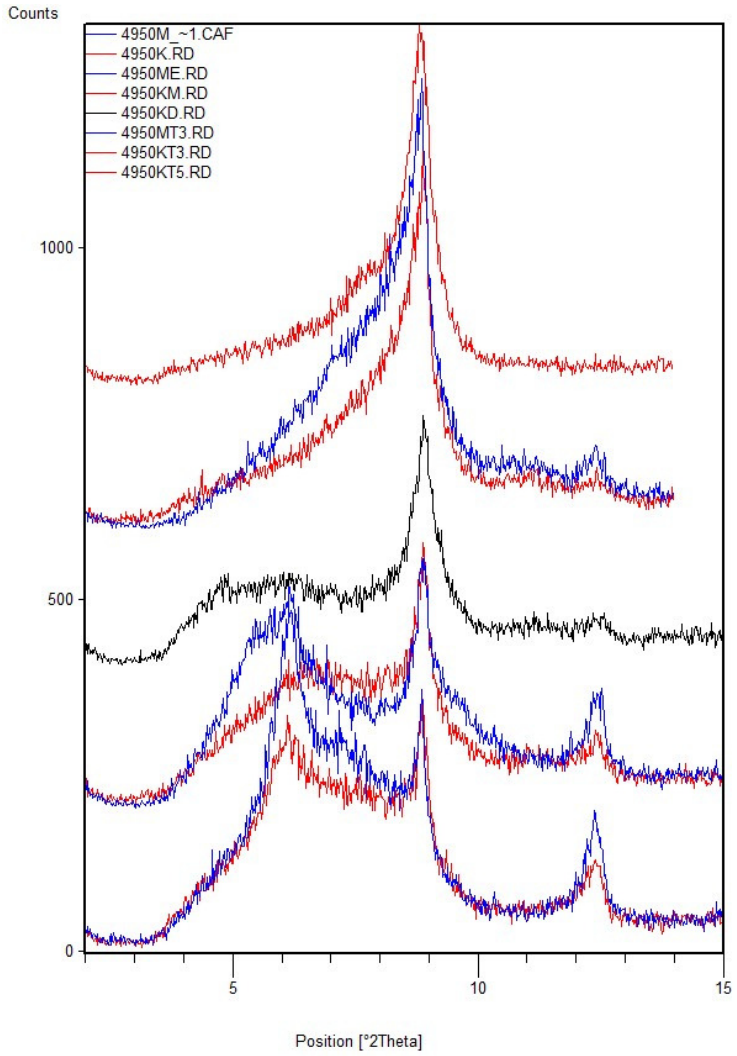
Slika 4.68 *Difrakcijske slike orijentirane frakcije < 2 μm uzorka flišne stijenske mase III (MW) stupnja trošnosti iz Istre nakon pojedinih tretmana*

Uzorak flišne stijenske mase V (CW) stupnja trošnosti (Slika 4.69) od minerala glina sadrži illitični materijal koji je prisutan u većim količinama nego u prethodna dva uzorka. Također, ovaj uzorak sadrži i najviše 14 Å minerala koji u ovom uzorku pokazuje određeni stupanj bubrivosti. U uzorku ima i nešto nepravilno interstratificiranih minerala, a potvrđen je i kaolinit.



Slika 4.69 *Difrakcijske slike orijentirane frakcije < 2 μm uzorka flišne stijenske mase V (CW) stupnja trošnosti iz Istre nakon pojedinih tretmana*

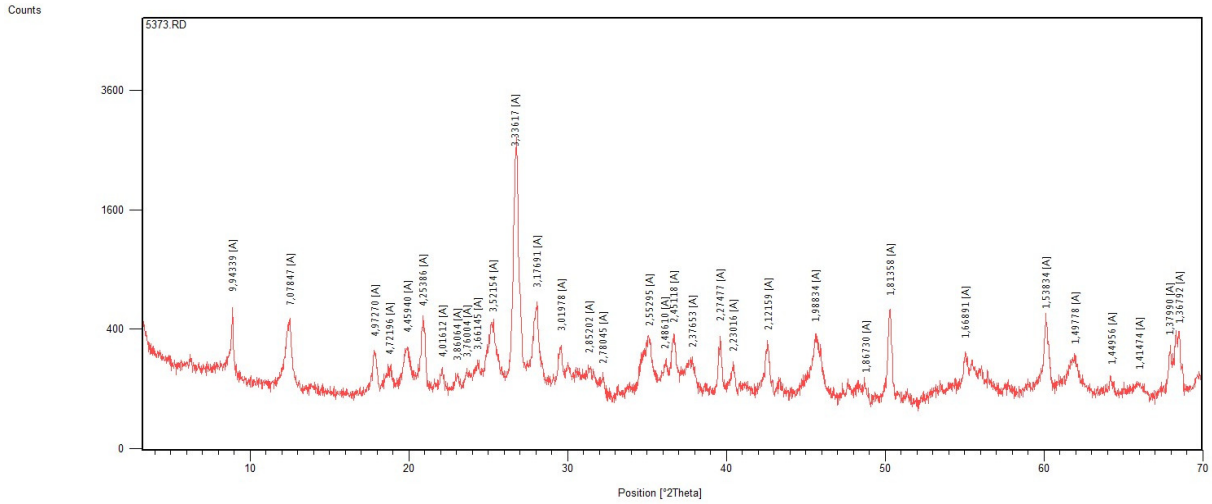
Uzorak rezidualnog tla (RS) (Slika 4.70) od minerala glina sadrži značajne količine 14 Å mineral i illitičnog materijala, te dobro (većina) i loše kristalizirani kaolinit. 14 Å mineral teško je definirati no s obzirom na tretman magnezijem, mogao bi biti i prijelaz iz klorita u vermikulit. U uzorku ima i nepravilno interstratificiranih minerala koji u sebi dijelom moguće sadrže i slojeve bubrećih minerala glina.



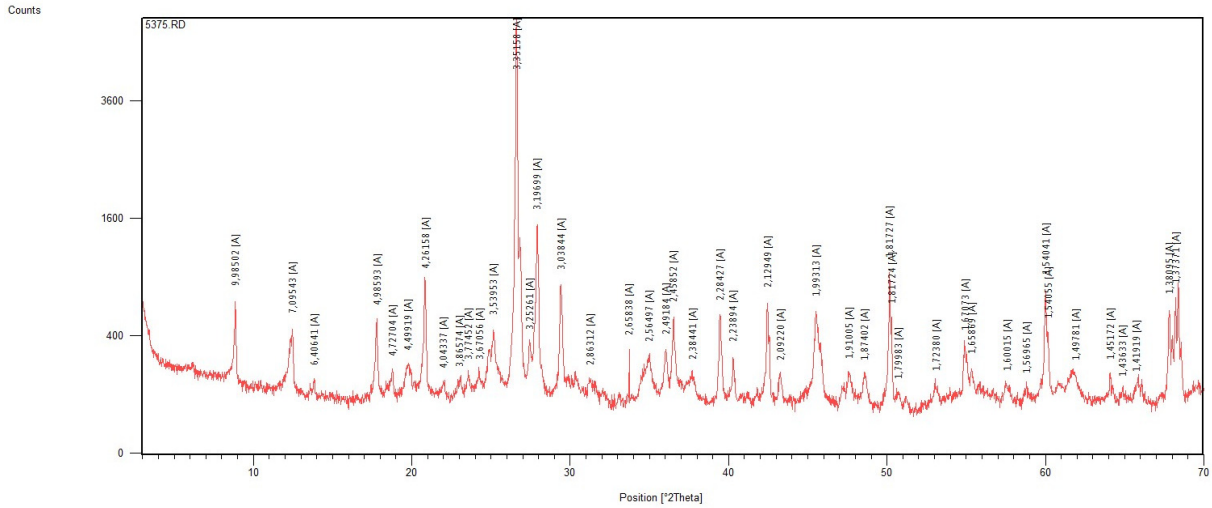
Slika 4.70 *Difrakcijske slike orijentirane frakcije < 2 μm uzorka rezidualnog tla iz Istre nakon pojedinih tretmana*

4.6.2.2. Utjecaj trošenja na mineraloške značajke sitnozrnastih litoloških članova fliša iz doline Rječine

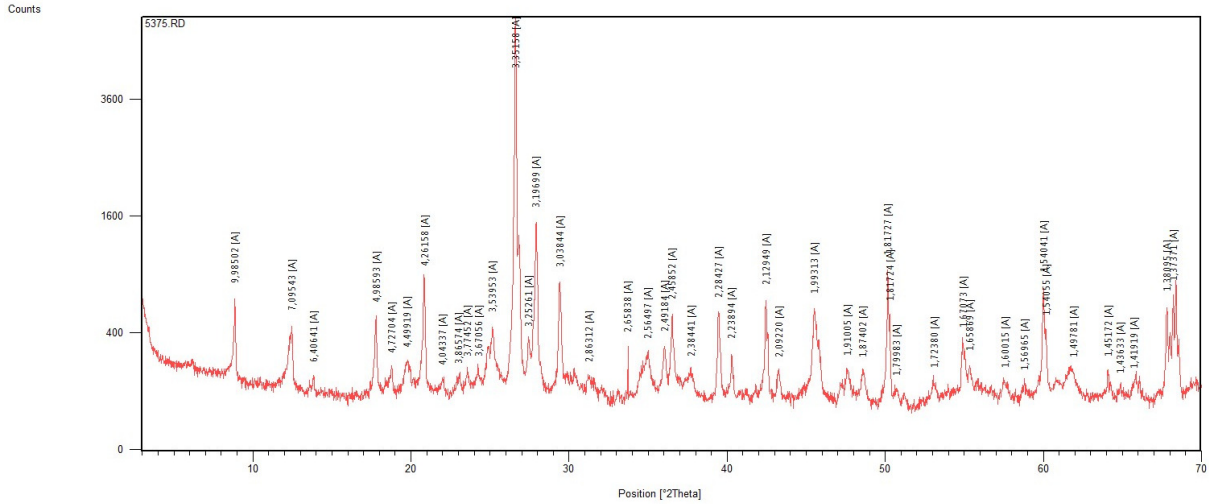
Difraktogrami originalnih neorijentiranih uzoraka s naznačenim međumrežnim razmacima za svaki pojedini difrakcijski maksimum prikazani su na Slikama 4.71 - 4.74.



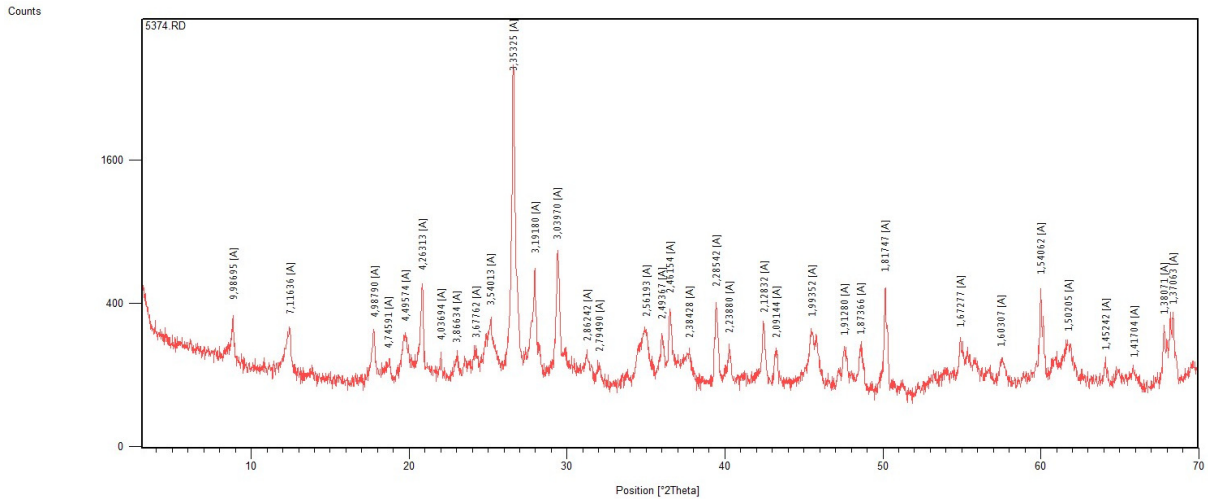
Slika 4.71 *Difrakcijska slika originalnog uzorka flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti iz doline Rječine*



Slika 4.72 *Difrakcijska slika originalnog uzorka flišne stijenske mase II (SW) stupnja trošnosti iz doline Rječine*

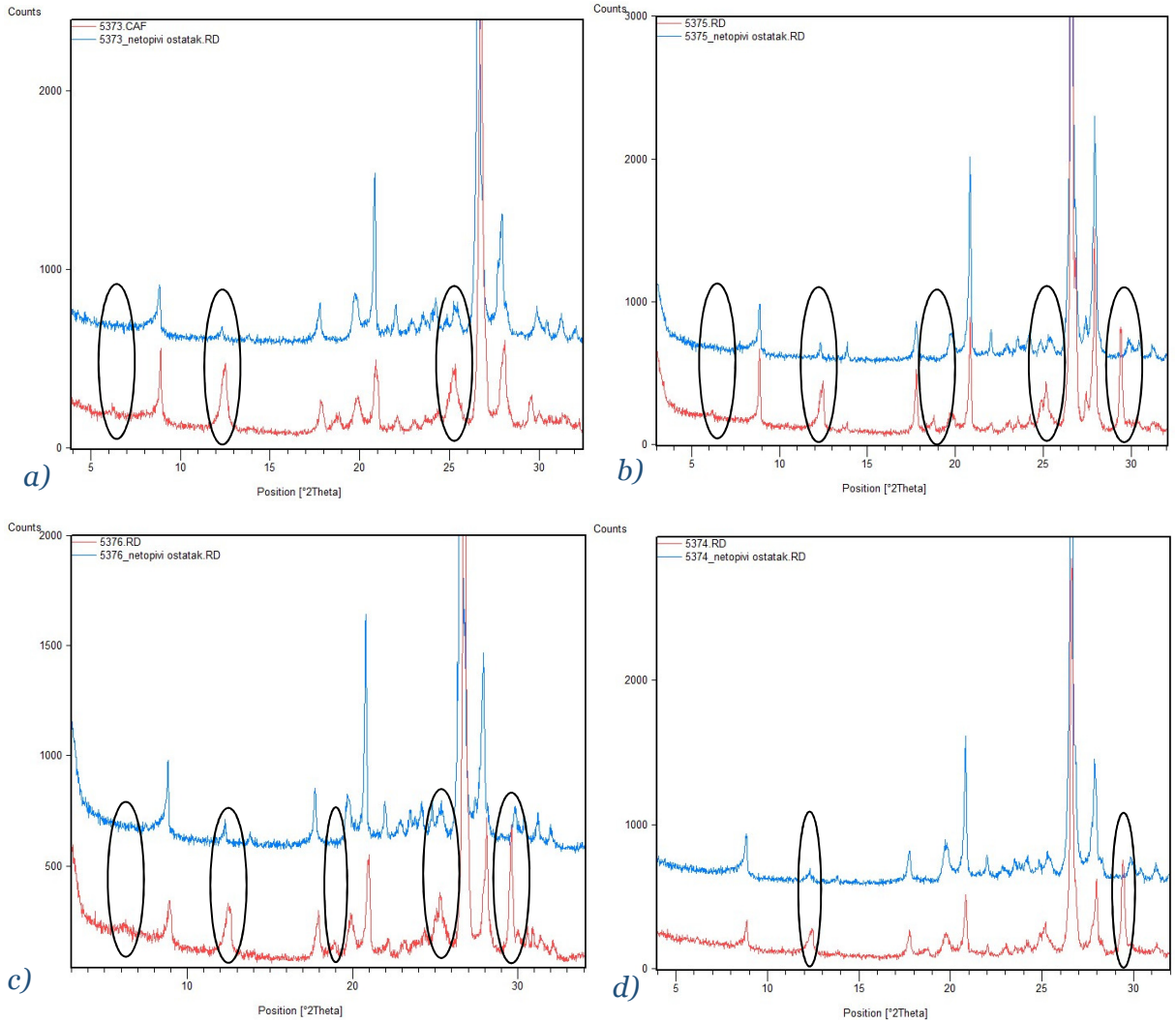


Slika 4.73 *Difrakcijska slika originalnog uzorka flišne stijenske mase III/IV (MW/HW) stupnja trošnosti iz doline Rječine*



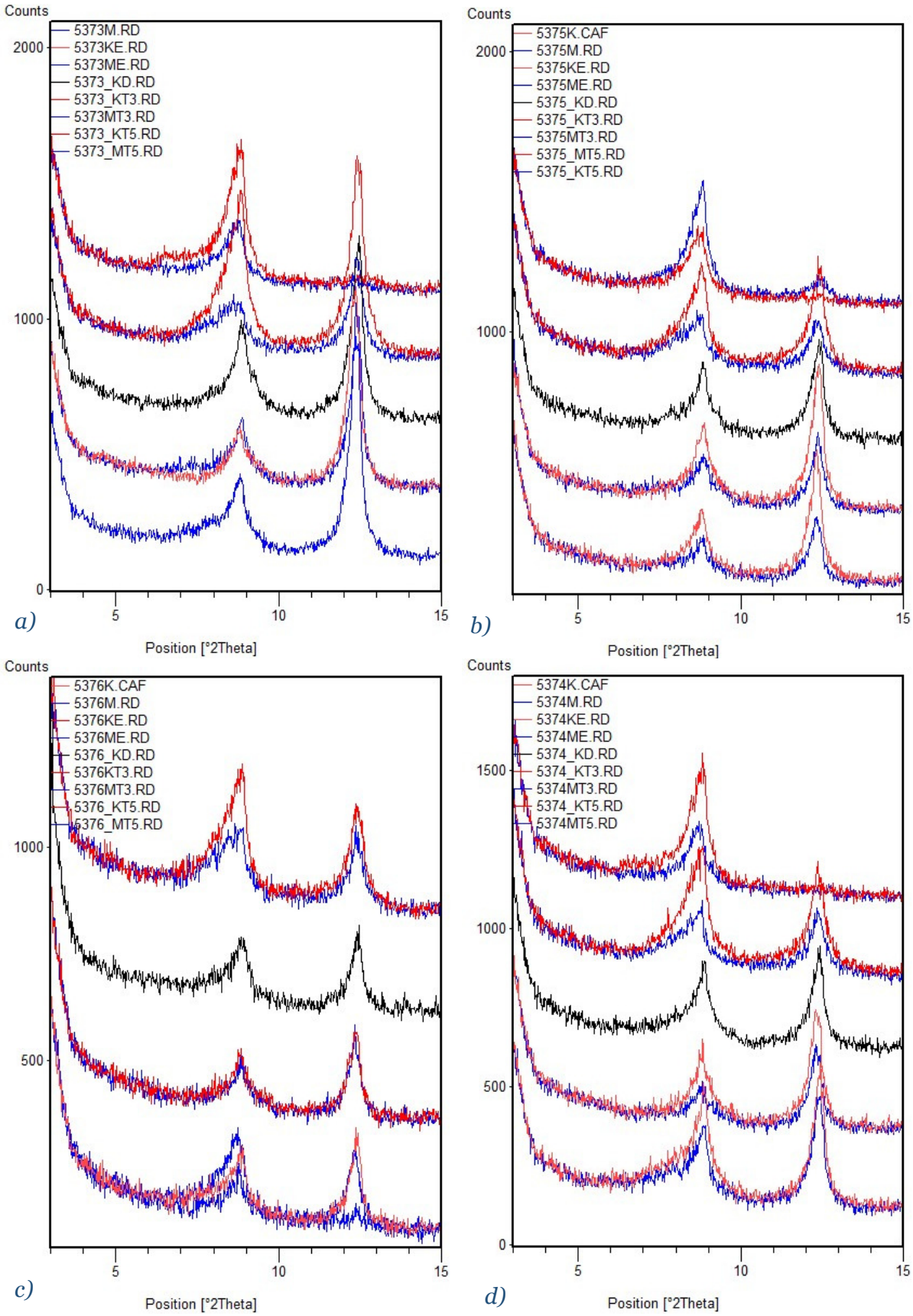
Slika 4.74 *Difrakcijska slika originalnog uzorka flišne stijenske mase V (CW) stupnja trošnosti iz doline Rječine*

Na Slici 4.75 prikazani su difraktogrami originalnih uzoraka različitih stupnjeva trošnosti zajedno s difraktogramima njihovih netopivih ostataka, odnosno nakon otapanja HCl 1:1. Na navedenim slikama vide se izostanci difrakcijskih maksimuma klorita i kalcita nakon otapanja uzoraka. Crvena linija prikazuje difraktograme originalnih uzoraka, a plava linija difraktograme netopivih ostataka nakon otapanja u kloridnoj kiselini.



Slika 4.75 *Dio difrakcijskih slika neorijentiranih uzoraka flišne stijenske mase: a) I (FR), b) II (SW), c) III/IV (MW/HW), d) V (CW) stupnja trošnosti iz doline Rječine*

Na Slici 4.76 prikazani su difraktogrami frakcije < 2 µm s različitim tretmanima radi utvrđivanja pojedinih minerala glina. Na temelju kalcimetrije, otapanja uzorka u kloridnoj kiselini (klorit) te usporedbom s difraktogramima standarda, analizirani uzorci imaju sljedeći mineralni sastav (Tablica 4.21): kalcit (3.7-10%), kvarc (10-20%), plagioklasi (20-35%), K-feldspat (trag u samo jednom uzorku), te minerali glina (50-70%). Od minerala glina u uzorcima postoje značajne količine illitičnog materijala (30-50%) i klorita (16-18%), te u tragovima kaolinita i mješanoslojnih minerala glina. Nije vidljiva nikakva zakonitost u smanjenju ili povećanju udjela pojedinih minerala glina, kao ni ukupni udio minerala glina sa stupnjem trošnosti (Slika 4.77).

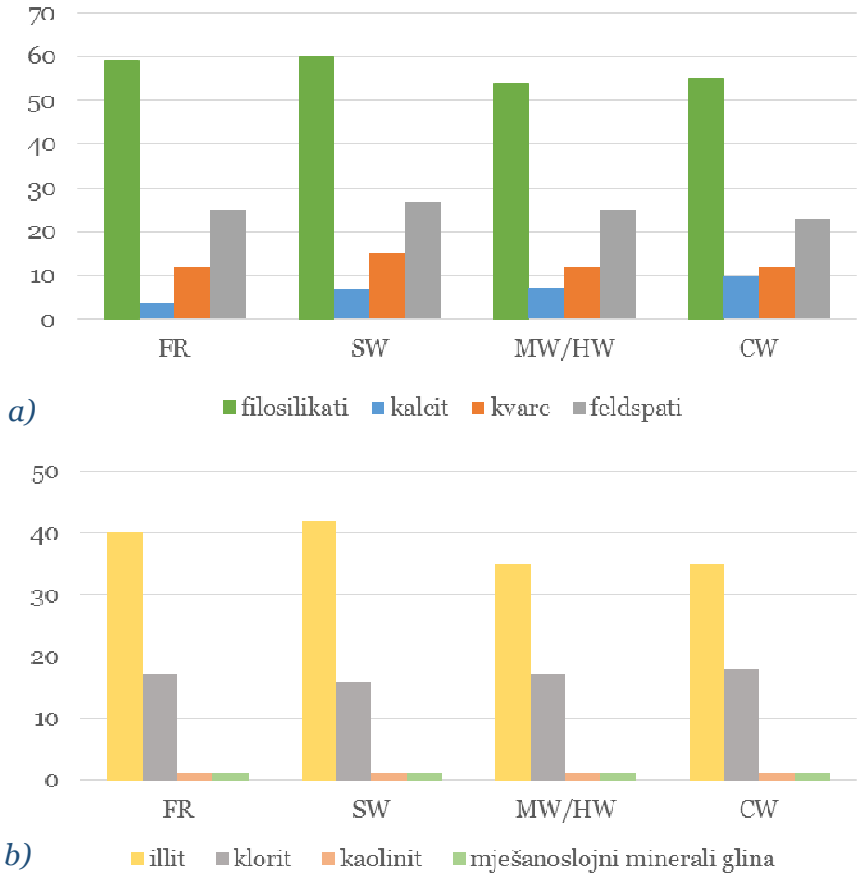


Slika 4.76 *Difrakcijske slike orijentirane frakcije < 2 µm uzoraka flišne stijenske mase: a) I (FR), b) II (SW), c) III/IV (MW/HW), d) V (CW) stupnja trošnosti iz doline Rječine nakon pojedinih tretmana*

Tablica 4.21 *Udio minerala u uzorcima flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz doline Rječine*

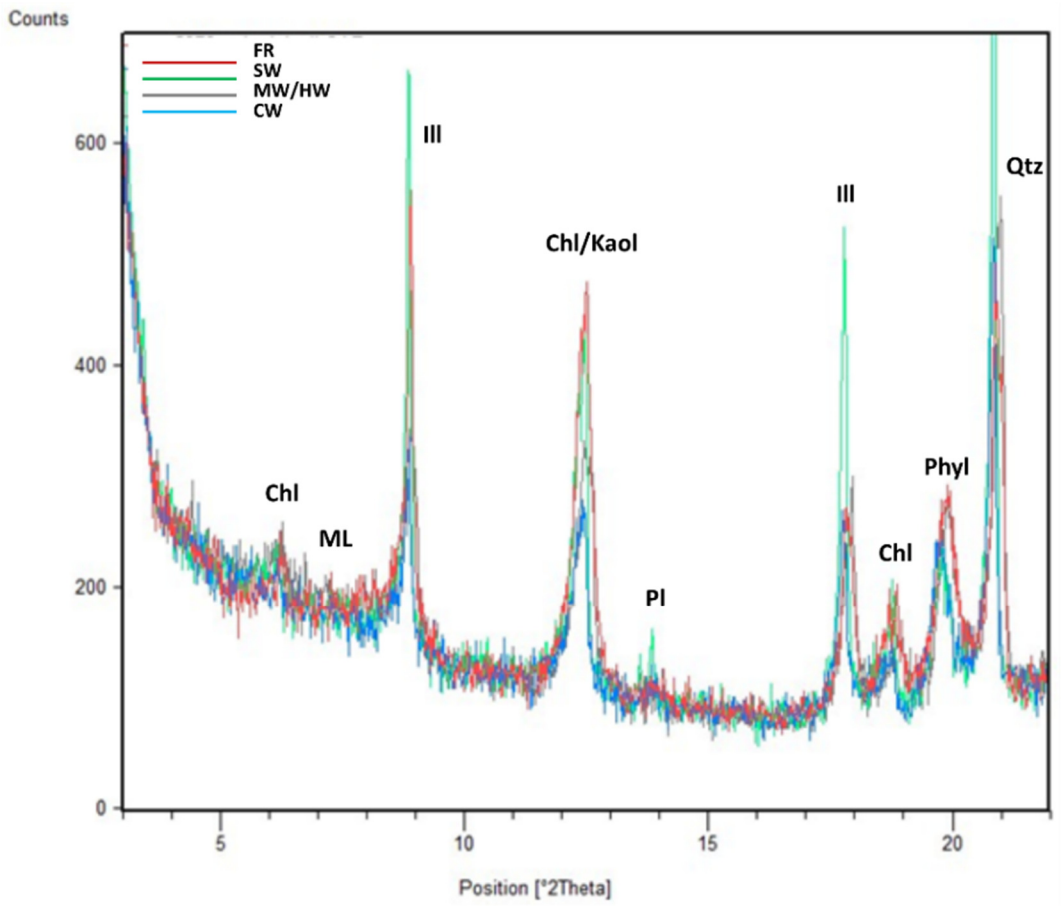
Oznaka uzorka	Cal	Qtz	Pl	Kfs	Ill	Chl	Kaol	ML	Minerali glina
FR	3.7	10-15	20-30	-	35-45	17	*	*	~ 59
SW	7	15-20	25-35	*	40-50	16	*	*	~ 60
MW/HW	7.2	10-15	20-30	-	30-40	17	*	*	~ 54
CW	10	10-15	20-30	-	30-40	18	*	*	~ 55

*Cal = kalcit, Qtz = kvarc, Pl = plagioklasi, Kfs = K-feldspat, Ill = illit, Chl = klorit, Kaol = kaolinit, ML = mješanoslojni minerali glina, - = bez prisustva minerala, * = mineral u tragovima*



Slika 4.77 *a) Mineralni sastav i b) minerali glina u uzorcima flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz doline Rječine*

U svim uzorcima vidljivi su difrakcijski maksimumi minerala glina na 10 Å i 7 Å, ali se njihovi intenziteti ne razlikuju (Slika 4.78).



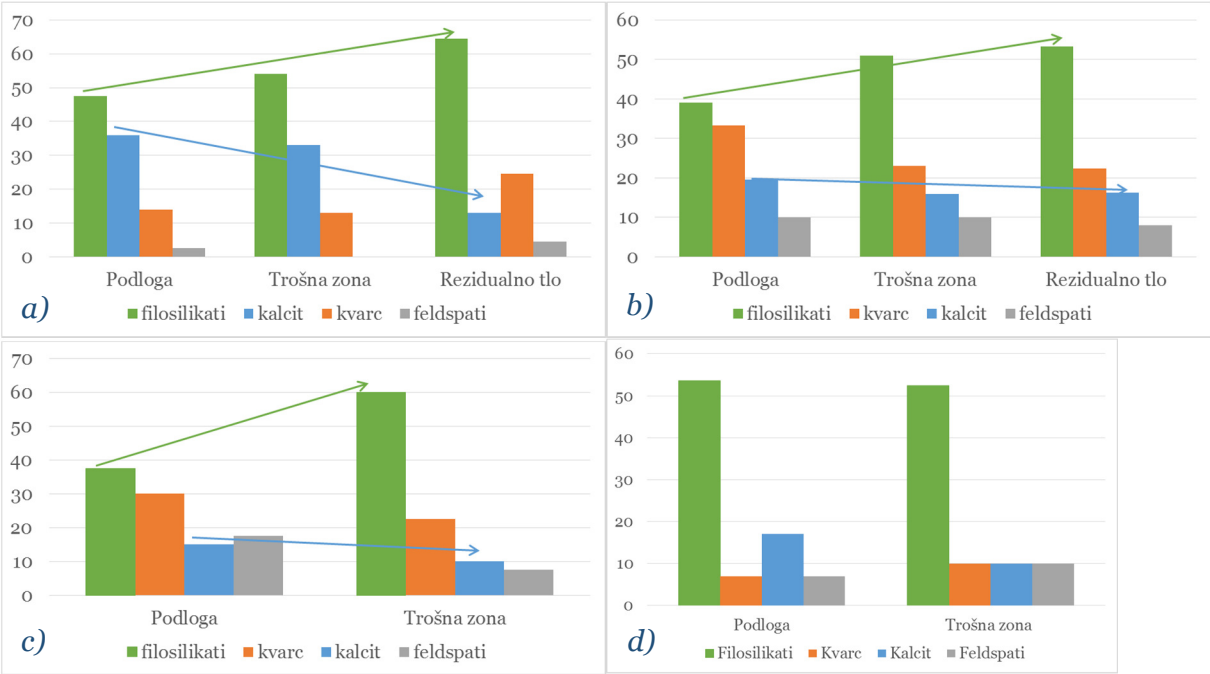
Slika 4.78 *Difrakcijske slike neorijentiranih frakcija čestica < 2 μm uzorka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz doline Rječine u području niskih kuteva °2θ (područje razlikovanja pojedinih minerala glina)*

Tablica 4.22 prikazuje kapacitet kationske zamjene (CEC) uzoraka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz doline Rječine. CEC ima visoku vrijednost zbog visoke specifične površine minerala klorita i illita. CEC ne pokazuje nikakvu zakonitost promjene s promjenom stupnja trošnosti.

Tablica 4.22 *Kapacitet kationske zamjene uzoraka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz doline Rječine*

Oznaka uzorka	CEC (meq/100g)
FR	29,02 ± 2,47
SW	31,77 ± 3,34
MW/HW	25,24 ± 1,94
CW	26,02 ± 1,11

Kao što prikazuje Slika 4.79, sva prethodna istraživanja na području istraživanja ukazuju na najveći udio filosilikata u svim uzorcima fliša različitih stupnjeva trošnosti. Uočen je porast sadržaja filosilikata i smanjenje sadržaja kalcita s porastom stupnja trošnosti flišne stijenske mase u svim prethodnim istraživanjima osim u slivu Slani Potok gdje nema pravilnog odnosa udjela minerala s porastom trošnosti.



Slika 4.79 *Mineralni sastav uzoraka flišne stijenske mase s: a) klizišta Krbavčići u sjevernoj Istri (Arbanas et al. 2006), b) klizišta Grohovo u dolini Rječine (Benac et al. 2014), c) sliva Mala Dubračina u Vinodolskoj dolini (Jurak 1980), d) sliva Slani Potok u Vindolskoj dolini* (Jurak et al. 2005)

Rezultati mineraloških analiza ovog doktorskog rada i prethodnih istraživanja ukazuju da su filosilikati najzastupljeniji minerali gdje klorit i illitični materijal čine glavni udio minerala gline u svim uzorcima različitih stupnjeva trošnosti na cijelom području istraživanja.

U uzorcima iz područja sjeverne Istre, sadržaj filosilikata raste s porastom stupnja trošnosti te sadržaj pojedinih minerala iz skupine filosilikata, poput klorita i illita raste dok sadržaj kalcita pada s porastom trošnosti, a što se poklapa s rezultatima provedenih mineraloških analiza pisanim u prethodnim istraživanjima. CEC također raste s porastom stupnja trošnosti.

Međutim, uzorci flišne stijenske mase iz doline Rječine ne pokazuju značajne promjene u mineralnom sastavu s porastom stupnja trošnosti. Svi uzorci različitih stupnjeva trošnosti imaju približno jednak mineralni sastav, a jedino uzorak SW iskače u kvantitativnom mineralnom sastavu i pokazuje bolju kristalizaciju i viši CEC. Isti uzorak pokazuje odstupanja i prilikom ispitivanja rezidualne posmične čvrstoće u uređaju za izravno smicanje. Moguće je da veće razlike u mineralnom sastavu s porastom stupnja trošnosti nisu utvrđene jer se uzorci po stupnju trošnosti manje razlikuju. Zbog izuzetne tektonske poremećenosti u dolini Rječine vjerojatno je da ipak postoje znatnija odstupanja u osnovnom mineralnom sastavu svježe flišne stijenske mase uzetih uzoraka, što se u konačnici reflektira na konačne rezultate ispitivanja.

Kvalitativni sastav uzoraka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz doline Rječine sličan je onome uzoraka iz Istre, međutim odnosi minerala su drugačiji: uzorci imaju puno više kvarca i illitičnog materijala te puno manje karbonata. Također uzorci iz doline Rječine sadrže više minerala gline, točnije illita i klorita, u odnosu na uzorke iz Istre.

Generalno, provedenim mineraloškim analizama uzoraka flišne stijenske mase iz područja istraživanja dokazano je da se tijekom procesa trošenja mijenja mineralni sastav sitnozrnastih litoloških članova iz flišne stijenske mase i dolazi do promjene sadržaja pojedinih minerala. S obzirom da su parametri čvrstoće tla značajno ovisni o mineralnom sastavu glina, slijedi da proces trošenja sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase značajno utječe na veličine i vršnih i rezidualnih parametara čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase.

5. NUMERIČKE ANALIZE I SIMULACIJE PONAŠANJA KLIZIŠTA U FLIŠU

Na temelju rezultata laboratorijskih ispitivanja parametara čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti provedene su dvodimenzionalne (2D) analize stabilnosti i trodimenzionalne (3D) simulacije ponašanja klizišta. Kao mjerodavna klizišta odabrana su dva umirena klizišta u naslagama fliša za koja se ispitani materijali mogu smatrati bliskim i odgovarajućim: klizište Krbavčići II u sjevernoj Istri te klizište Valići u dolini Rječine. Za potrebe izrade podloga numeričkih modela izvršeno je geodetsko snimanje ili lasersko skeniranje sadašnjeg stanja navedenih umirenih klizišta što omogućuje analizu njihove reaktivacije. Za provedbu 2D analiza stabilnosti korišten je računalni program Rocscience Slide dok su numeričke simulacije ponašanja klizišta provedene računalnim programom LS-Rapid.

5.1. UVOD I PREGLED REZULTATA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Najpoznatije metode analize stabilnosti padina su prema Li (2009): metoda analize granične ravnoteže (uvjeti ravnoteže zadovoljeni su samo za sile koje djeluju u padini); metoda granične analize (daje egzaktno rješenje za problem stabilnosti padine čije je ponašanje definirano mehanikom kontinuuma); numeričke metode (numeričko modeliranje stanja naprezanja i deformacija u padini); probabilističke metode (faktor sigurnosti određuje se pomoću funkcije distribucije različitih parametara koji utječu na stabilnost padine); empirijske metode (zasnivaju se na iskustvima stečenim promatranjem ponašanja zasjeka tijekom izvedbe); i uporaba fizičkih modela (u kontroliranom okruženju se simuliraju uvjeti koji utječu na stabilnost promatrane padine).

Analize stabilnosti padina provode se kako bi se primjenom jedne od numeričkih metoda, metode konačnih elemenata ili metoda granične ravnoteže utvrdio stupanj stabilnosti padine preko faktora sigurnosti (FS). Faktor sigurnosti definira odnos posmične čvrstoće materijala na plohi sloma i posmičnog naprezanja izazvanog

djelovanjem aktivnih sila, a slom padine nastupa kada je faktor sigurnosti jednak ili ispod vrijednosti 1,0. Analize stabilnosti padine provode se na geotehničkom modelu s poznatim rasporedom naslaga u geotehničkom profilu, parametrima čvrstoće tla i razinom podzemne vode.

Dvodimenzionalnim (2D) analizama stabilnosti pretpostavlja se da je padina beskonačno široka, međutim postoje mnogi slučajevi u kojima bi trodimenzionalna (3D) analiza stabilnosti bila prikladnija, u slučajevima kada je geometrija složena te je teško odrediti karakteristični 2D presjek, kada geometrija padine i kliznog tijela znatno varira u bočnim smjerovima, kada su materijalne karakteristike vrlo nehomogene i izotropne, kada je padina lokalno predopterećena ili u slučaju kada su posmična čvrstoća i/ili porni pritisak u tlu na padini složeni pa je nužno kombinirati utjecaje geometrije padine i posmične čvrstoće materijala kako bi se odredio smjer kretanja koji rezultira minimalnim faktorom sigurnosti ili je potrebno provesti povratnu analizu padine na kojoj je nestabilnost već nastupila (Albataineh 2006). Trodimenzionalne analize stabilnosti padina koje se temelje na metodi granične ravnoteže predložili su brojni autori (Baligh & Azzouz 1975; Hovland 1977; Chen & Chameau 1983; Ugai 1985; Lehchinsky et al. 1985; Xing 1988; Hungr 1987; Hungr et al. 1989; Lam & Frendlund 1993; Chang 2002). Većina tih analiza predstavljaju proširenje 2D metode lamela koje su razvili Bishop (1955), Spencer (1967) te Morgenstern & Price (1965), a međusobno se razlikuju po pretpostavkama koje se odnose na sile među pojedinim stupcima. Klizno tijelo podijeljeno je na određeni broj vertikalnih stupaca, a za određivanje faktora sigurnosti koriste se uvjeti statičke ravnoteže nakon što se usvoje određene pretpostavke o silama koje djeluju između pojedinih stupaca.

Navedenim analizama može se modelirati promjenu hidrodinamičkih sila u padini i ukazati na mogući slom u tlu i proces početka klizanja, ali ne postoji mogućnost analize procesa kretanja od početka do propagacije klizanja niz padinu. Za razliku od drugih računalnih programa za analize stabilnosti padina, čija je uloga samo određivanje faktora sigurnosti, računalni program LS-Rapid simulira dinamičko ponašanje klizišta nakon njegovog pokretanja.

Brojni autori istraživali su stabilnost padine u mekim stijenama podložnim procesima trošenja i posljedičnim promjenama značajki čvrstoće materijala u padini. Franklin &

Dusseault (1989) opisali su vremenski proces trošenja meke stijene tijekom eksploatacije objekta. Utili (2004) je predložio model kvantitativnog predviđanja razvoja prirodnih padina izloženih procesu trošenju. Vlastelica (2015) opisuje utjecaj procesa trošenja na vremenski razvoj geometrije zasjeka u mekoj stijeni. Eberhardt et al. (2005) su numeričkim modelima na primjeru klizišta Rufi u Švicarskoj pokazali da se inicijalno klizanje događa zbog smanjenja čvrstoće lapora uslijed procesa trošenja i saturacije padine uslijed infiltracije oborina. Klizna ploha na klizištu Rufi se nalazi unutar stijenske mase izložene utjecajima trošenja. Miščević et al. (2009) su pokazali korištenjem numeričkih modela da trošenje lapora utječe na pojavu plitkih klizišta na primjeru klizišta Bol u Hrvatskoj. Sassa et al. (2014) provode simulaciju starog megaklizišta Unzen-Mayuyama u Japanu pokrenutog porastom pornog pritiska, cikličkim naprezanjima ili potresom, primjenom rezultata ispitivanja tla uređajem za prstenasto smicanje. Dugonjić Jovančević (2013) je u svom radu provela 3D determinističku analizu hazarda za flišne padine u okolici grada Buzeta u Istri, a Vivoda et al. (2014) provode 3D determinističke analize pojave klizišta u dolini Rječine.

5.1.1. Numeričko modeliranje programom LS-Rapid

Računalnim programom LS-Rapid moguće je simulirati dinamičko ponašanje cjelokupnog procesa klizanja, od početka klizanja uzorkovanog porastom razine podzemne vode i/ili potresom te propagacije i razvoja klizanja niz padinu sve do umirenja klizanja i zauzimanja novog stabilnog položaja. Numerički model bazira se na rezultatima laboratorijskih ispitivanja i realnim zapisima potresa. Osnovni koncept simulacije predstavljen je radom Sassa et al. (2010) pomoću sila koje djeluju na vertikali stupac unutar klizne mase, te je prikazan jednadžbom 5.1 i objašnjen Slikom 5.1.

$$am = (W + Fv + Fx + Fy) + \left(\frac{\partial Px}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial Py}{\partial y}\Delta y\right) + R \qquad (5.1)$$

gdje su: a = akceleracija;
m = klizna masa;
W = vlastita težina stupca;
Fv = vertikalna seizmička sila;

Fx = seizmička sila u x-smjeru;

Fy = seizmička sila u y-smjeru;

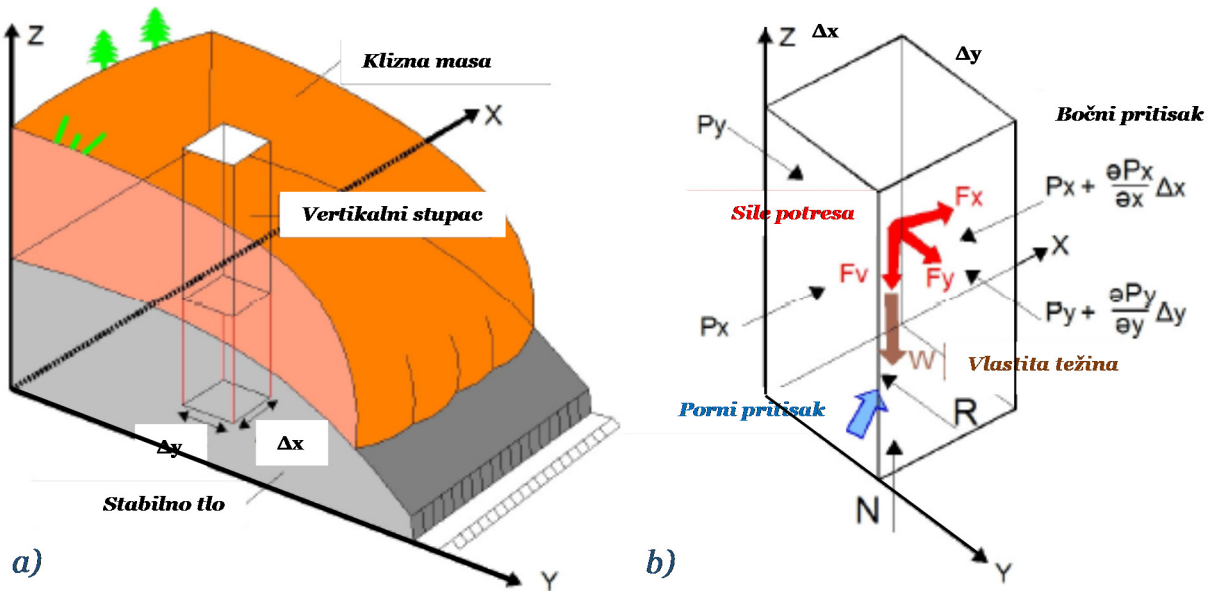
P = bočni pritisak koji djeluje na zidove stupca;

R = posmični otpor na bazi stupca koji obuhvaća djelovanje sila:

N = normalno naprezanje na bazi stupca kao reakcija stabilnog tla na vertikalnu komponentu vlastite težine stupca;

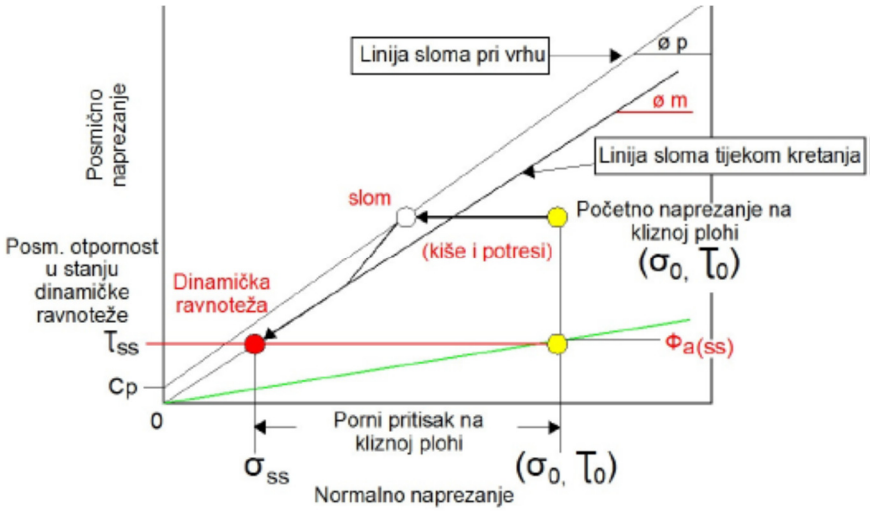
U = porni pritisak na bazi stupca.

Klizna masa (m) ubrzava pod djelovanjem akceleracije (a) koja je jednaka sumi djelovanja svih spomenutih sila (vlastita težina + seizmičke sile) + bočni pritisak + posmični otpor.



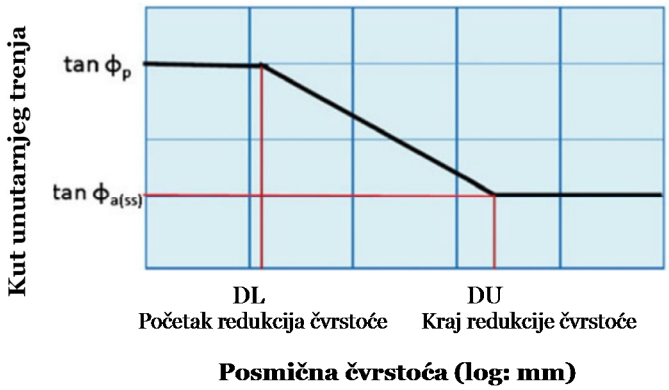
Slika 5.1 *Osnovni princip programskog paketa LS-Rapid: a) vertikalni stupac unutar klizne mase; b) djelovanje sila na vertikalni stupac (prema Sassa et al. 2010)*

Promjene naprezanja na kliznoj plohi odvijaju se uslijed porasta pornih pritisaka uzrokovanih infiltracijom padalina i/ili potresa. Pokretanje mase na padini započinje kada trag efektivnog naprezanja dosegne plohu sloma pri vršnim vrijednosti parametara tla. Porni pritisak se generira s porastom posmične deformacije u saturiranim tlima kada se događa smanjenje volumena uslijed sloma kroz čestica tla. Posmična naprezanja se tijekom kretanja smanjuju po pravcu efektivnog traga naprezanja sve do stanja dinamičke ravnoteže nakon čega se, uz povećanje posmične deformacije, više ne događa slom kroz čestice tla, a porni pritisak i posmični otpor su konstantni, kao što je prikazano na Slici 5.2.



Slika 5.2 *Prividni koeficijent trenja (φ_a), posmični otpor u stanju dinamičke ravnoteže (τ_{ss}) i koeficijent trenja tijekom kretanja (φ_m) (prema Sassa et al. 2010)*

Na Slici 5.3 prikazano je posmično ponašanje prije sloma sve do postizanja stanja dinamičke ravnoteže. Vršni kut unutarnjeg trenja, φ_p, je mjerodavan u stanju prije sloma sve do dosezanja posmične deformacije, DL, kada započinje redukcija posmične čvrstoće. Posmična čvrstoće se linearno smanjuje (u logaritamskom mjerilu) sve do dosezanja posmične deformacije, DU, kada završava redukcija posmične čvrstoće, odnosno započinje klizanje tla u stanju dinamičke ravnoteže. Kretanje u dinamičkoj ravnoteži započinje pod djelovanjem prividnog koeficijenta trenja u dinamičkoj ravnoteži, $\varphi_{a(ss)}$, nakon dosezanja posmične deformacije, DU.



Slika 5.3 *Model redukcije posmične čvrstoće s povećanjem posmične deformacije (prema Sassa et al. 2010)*

Uvjeti pornog pritiska koji su rezultat procesa infiltriranja vode u tlo te su u modelu prikazani preko koeficijenta pornog pritiska r_u, gdje je $r_u = u/\gamma z$, odnosno odnos pornog pritiska i geostatičkih naprezanja na određenoj dubini.

Promjena pornog pritiska, r_u, kohezije, c, i prividnog koeficijenta trenja,tan ϕ_a, opisana je u tri faze, redom jednadžbama 5.2 – 5 4:

1. Inicijalno stanje prije sloma($D < DL$):

$$tan\varphi_a = tan\varphi_p$$
$$c = c_p \qquad (5.2)$$
$$r_u = r_u$$

2. Stanje dinamičke ravnoteže ($D > DU$):

$$tan\varphi_a = tan\varphi_{a(ss)}$$
$$c = 0\ kPa \qquad (5.3)$$
$$r_u = 0\ kPa$$

3. Prijelazna faza ($DL < D < DU$)

$$tan\varphi_a = tan\varphi_p - \frac{logD - logDL}{logDU - logDL}(tan\varphi_p - tan\varphi_{a(ss)})$$
$$c = c_p\left(1 - \frac{logD - logDL}{logDU - logDL}\right) \qquad (5.4)$$
$$r_u = r_u \cdot \frac{logDU - logD}{logDU - logDL}$$

gdje su: DL - posmična deformacija na početku redukcije čvrstoće;

DU - posmična deformacija na kraju redukcije čvrstoće;

φ_p - vršni kut unutarnjeg trenja;

φ_a - prividni kut unutarnjeg trenja;

$\varphi_{a(ss)}$ - prividni kut unutarnjeg trenja u stanju dinamičke ravnoteže;

c_p – vršna kohezija;

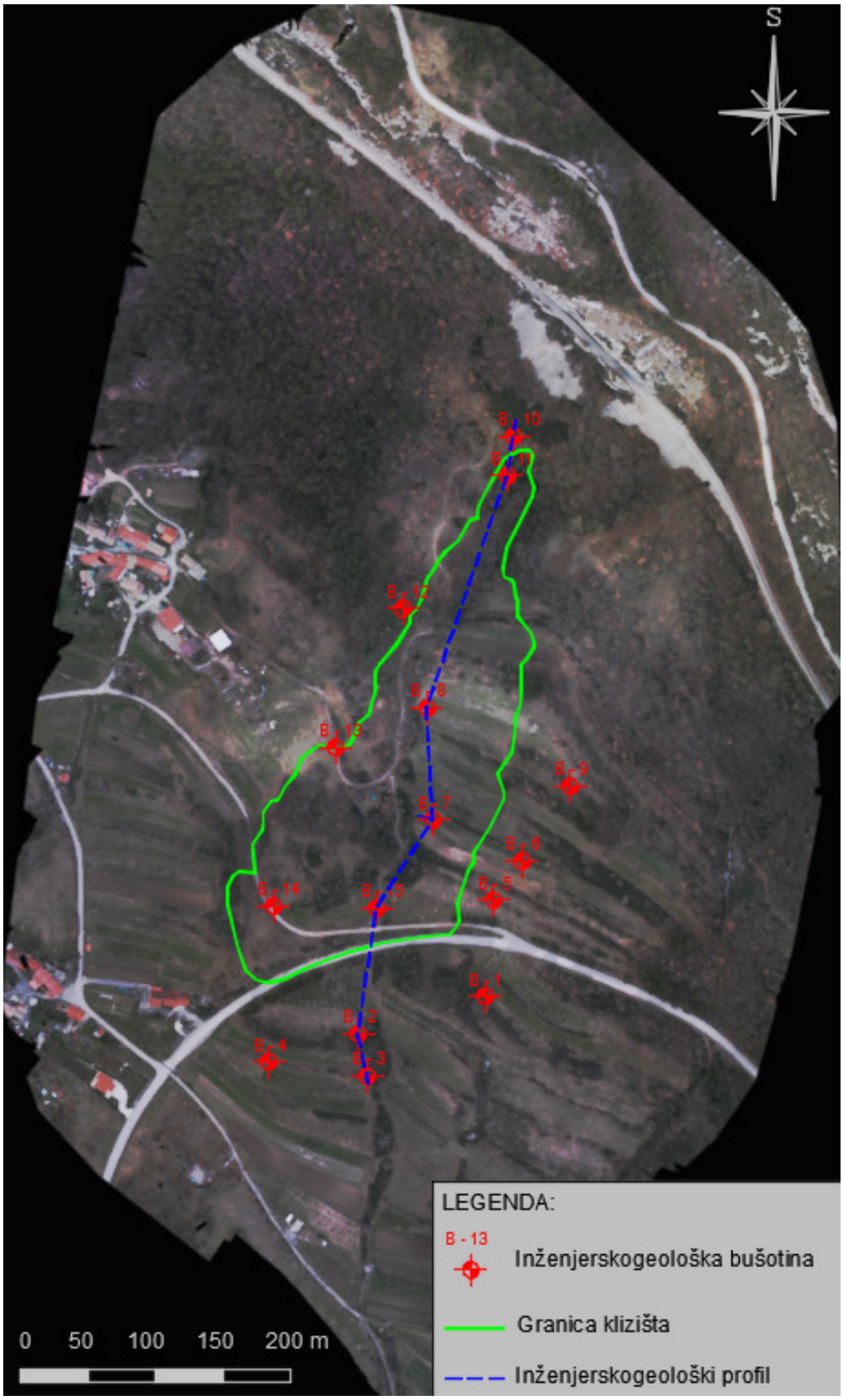
r_u - koeficijent pornog pritiska.

5.1.2. Klizište Krbavčići II u Istri

Klizište Krbavčići II pokrenuto je krajem siječnja 1979. godine nakon perioda dugotrajnih kiša. Klizanje je zahvatilo dio padine od podnožja željezničke pruge do ceste Buzet - Željeznička stanica Buzet (Slika 5.4). Najveća oštećenja nastala su na novoizgrađenoj cesti gdje je došlo do oštećenja potpornog zida i deformacije kolnika. Prema izjavama mještana sela Krbavčići, potporni zid nije bio temeljen unutar flišne stijenske podloge već na vezanom siparu. Nakon nastalih pomaka, klizno tijelo zauzelo je novi stabilni položaj te su pomaci zaustavljeni. Klizište je prvi puta pregledano 25. ožujka 1979. godine i od tada do danas nije doživjelo značajnije promjene. Prema izjavama mještana na terenu su se i ranije u više navrata primjećivale pojave nestabilnosti, ali nikada takvog intenziteta.

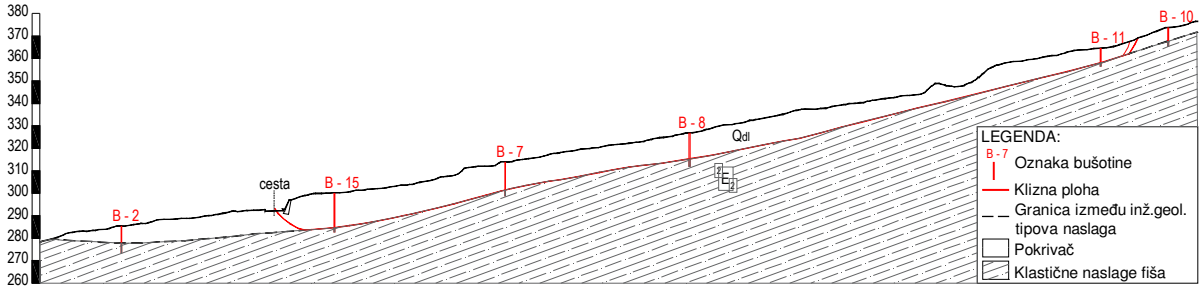
Dimenzije klizišta prema IAEG (1990) iznose: ukupna duljina klizišta oko 370 m; širina pokrenute mase iznosi 30 m u gornjem dijelu, do 150 m u stopi; približna dubina pokrenute mase jednaka je dubini klizne plohe koja iznosi oko 13 m, s pretpostavkom da se nalazi na kontaktu vezanog sipara s laporima u podlozi. Čelo i bočni rubovi klizišta su jasno uočljivi pukotinama po kojima je došlo do usjedanja kliznog tijela: glavna pukotina, bočne i poprečne pukotine te mjestima izbacivanja materijala u nožici (zelena linija na Slici 5.4). Stopa klizišta zamaskirana je nasipom oko ceste pa je približno locirana. Prema klasifikaciji Skempton & Hutchinson (1969) ovo klizište se može svrstati u translacijsko klizanje.

Za potrebe izrade modela klizišta Krbavčići II, korištena je digitalna kamera Sony Alpha 7R na bespilotnoj letjelici s RTK (eng. *Real Time Kinematic*) sustavom za pozicioniranje i terestrički laserski skener FARO X330. Rezolucija snimanja iznosila je 1,0 cm. Podaci su povezani u Hrvatski državni koordinatni sustav HTRS96/TM koristeći geoid HVRS71. Rezultat je digitalna ortofoto karta (Slika 5.4) sa slojnicama na razmaku od 1,0 m korištena kao podloga za izradu numeričkog modela.



Slika 5.4 *Ortofoto karta klizišta Krbavčići II snimljena 2016. godine kombinacijom fotosnimanja iz zraka i terestričkog laserskog skeniranja, s naznačenom granicom klizišta i pozicijama bušotinama izvedenih 1979. godine*

Inženjerskogeološki profil terena prikazan je na Slici 5.5. Trasa željezničke pruge Divača - Pula iznad klizišta usječena je u naslagama alveolinskih vapnenaca i njoj vjerojatno ne prijeti opasnost zbog eventualnog retrogresivnog napredovanja klizištu i daljnjih pomaka. Klizište neposredno ugrožava jedino dio ceste Buzet - Željeznička stanica Buzet u dužini od oko 150 m. Godine 1979. predložene su dvije varijante sanacije klizišta, međutim sanacija nikada nije uslijedila nakon prirodnog umirenja klizišta. Uvedena su opažanje klizišta reperima i piezometrima u periodu od godinu dana kako bi se dobili neophodni dodatni podaci o stanju klizišta (Rijekaprojekt 1979).



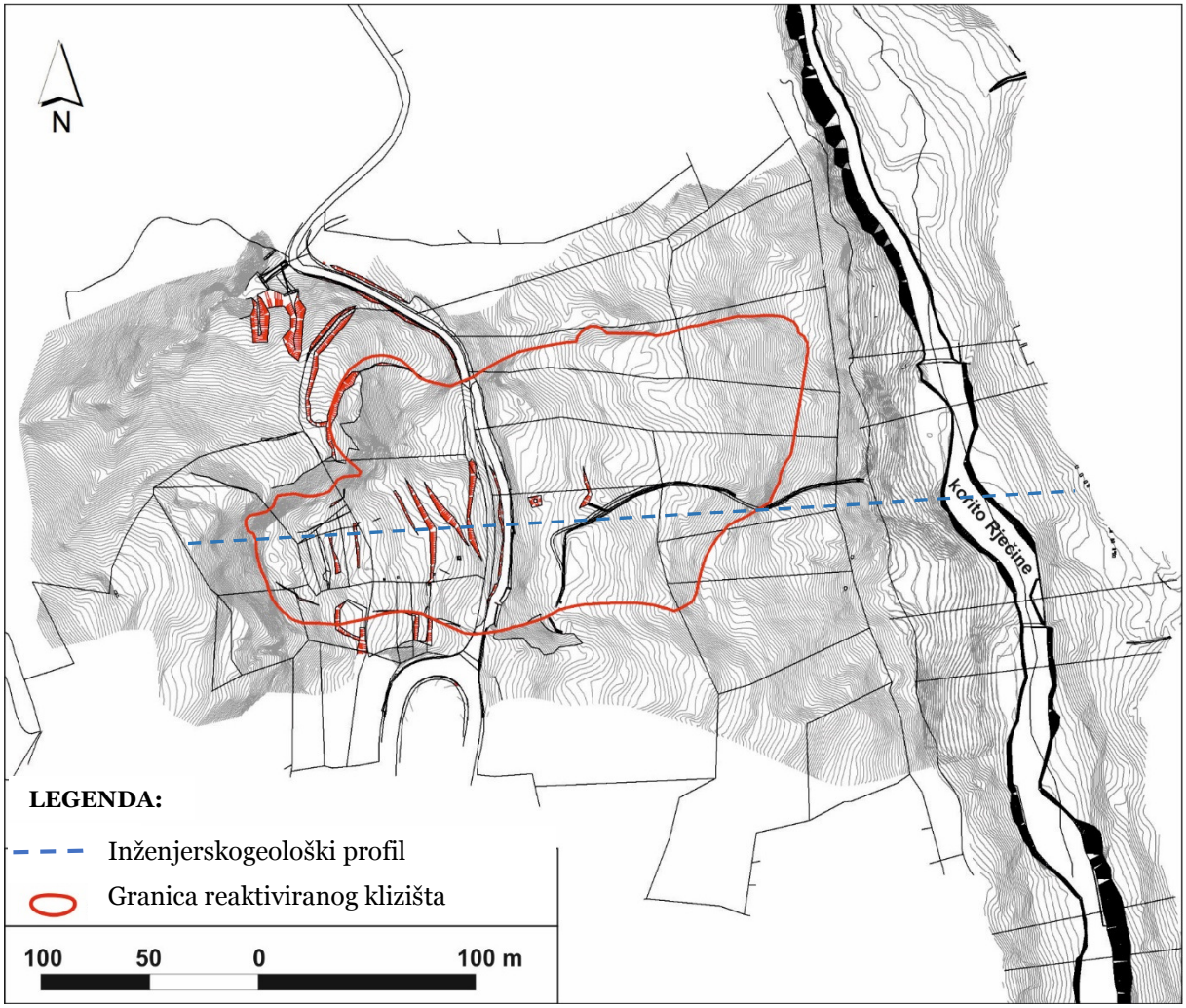
Slika 5.5 *Inženjerskogeološki profil terena kroz tijelo klizišta Krbavčići II (prema Rijekaprojekt 1979)*

5.1.3. Klizište Valići u dolini Rječine

Klizište Valići u dolini Rječine na području desnog boka akumulacije Valići pokrenuto je 13.2.2014. godine. Kako nisu provedeni detaljni istražni radovi i istraživanje na području aktiviranog klizišta, granica klizišta identificirana je na temelju daljinskih istraživanja i inženjerskogeološkog kartiranja klizišta na terenu, dok je položaj klizne plohe procijenjen na temelju rezultata povratnih analiza stabilnosti padine. Inženjerskogeološko kartiranje klizišta na terenu provedeno je neposredno nakon njegova aktiviranja u veljači 2014. godine, te nakon snimanja geodetske situacije u prosincu 2014. godine. Geodetski snimak područja klizišta i isušenog akumulacije izrađen je u studenom 2014. godine (Slika 5.6). Daljinska istraživanja provedena su vizualnom interpretacijom LiDARskih snimaka iz ožujka 2012. godine.

Na ovako istraženom području identificirana su dva klizišta: povijesno klizište nastalo prije više od 50 godina, na kojemu je izgrađena lokalna cesta i koje je djelomično

sanirano u vrijeme gradnje brane i akumulacijskog jezera Valići; i klizište reaktivirano unutar koluvijalne mase povijesnog klizišta početkom veljače 2014. godine. Ova dva klizišta predstavljaju reaktivirano veliko, duboko do srednje duboko klizište (približnog volumena 1,3 Mm^3) unutar kojega je formirano umjereno veliko, srednje plitko klizište (približnog volumena 3,68 x 10^5 m^3). U središnjem dijelu pokrenute mase reaktiviranog klizišta nalazi se lokalna cesta, a nožica reaktiviranog klizišta nalazi se u akumulacijskom jezeru Valići.

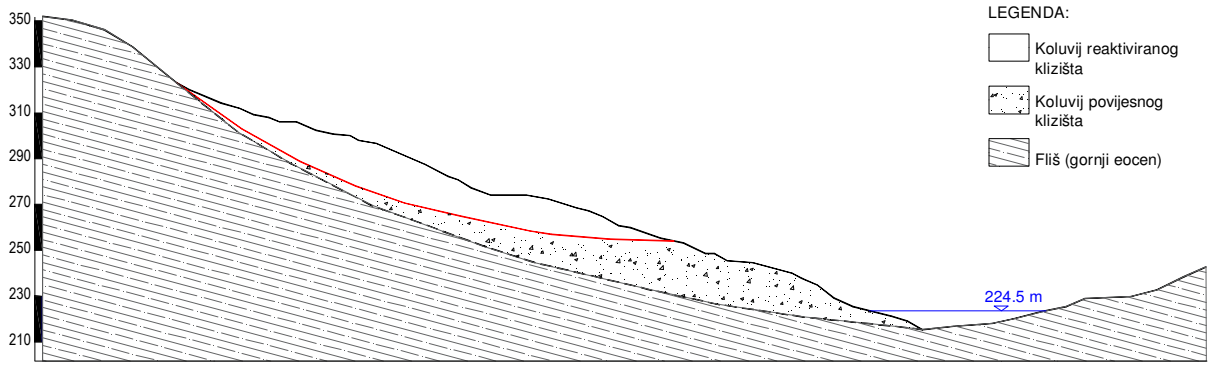


Slika 5.6 *Geodetski snimak područja klizišta Valići i isušenog korita rijeke Rječine*

Dimenzije reaktiviranog klizišta prema IAEG (1990) iznose: duljina klizne plohe iznosi oko 230 m, ukupna duljina klizišta oko 230 m, širina pokrenute mase je oko 120 m, približna dubina pokrenute mase jednaka je dubini klizne plohe koja iznosi oko 20 m. Jasno je izražena kruna klizišta i glavna pukotina te bokovi klizišta i pokrenuta masa, dok nožica klizišta nije jasno izražena. Inženjerskogeološki profil terena prikazan je na

Slici 5.7. Prema klasifikaciji Skempton & Hutchinson (1969) klizište Valići spada u translacijsko klizanje.

Preduvjeti klizanja su trošni, smicani i raspucani materijali koluvijalnog porijekla u padini, izmjena slojeva različite propusnosti i njihov utjecaj na razinu podzemne vode, dugotrajne visoke oborine te loše održavanje drenažnog sustava povijesnog klizišta. Pokretači klizanja su oborine iz siječnja i veljače 2014. godine.



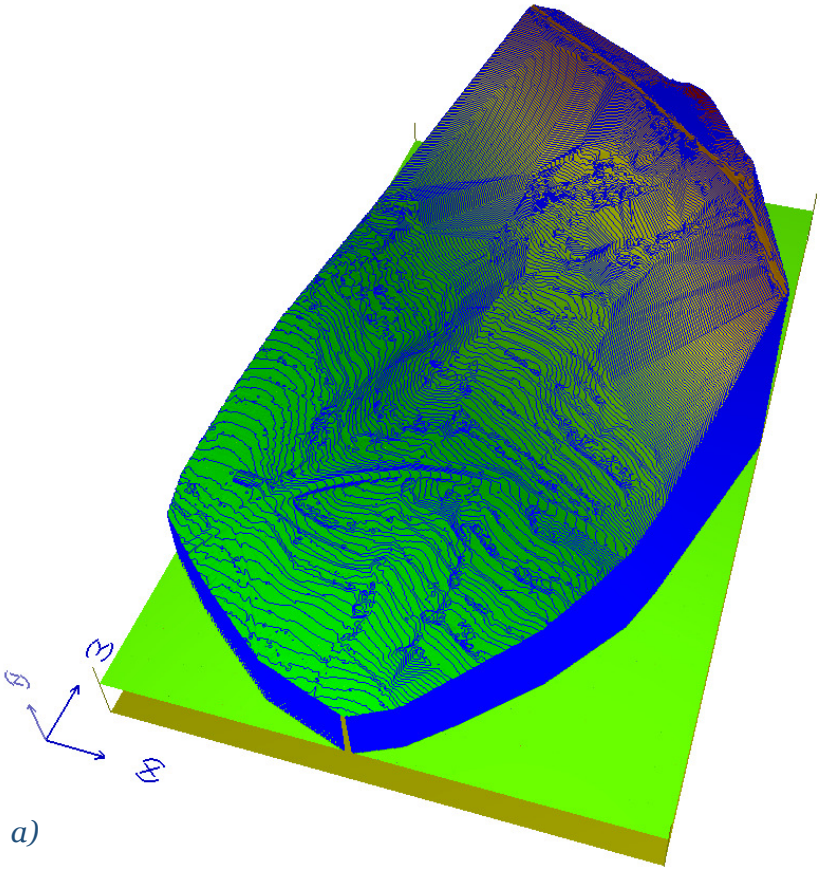
Slika 5.7 *Inženjerskogeološki profil terena kroz tijelo klizišta Valići u dolini Rječine (Arbanas et al. 2015)*

5.2. REZULTATI ANALIZA STABILNOSTI I NUMERIČKIH SIMULACIJA PONAŠANJA KLIZIŠTA

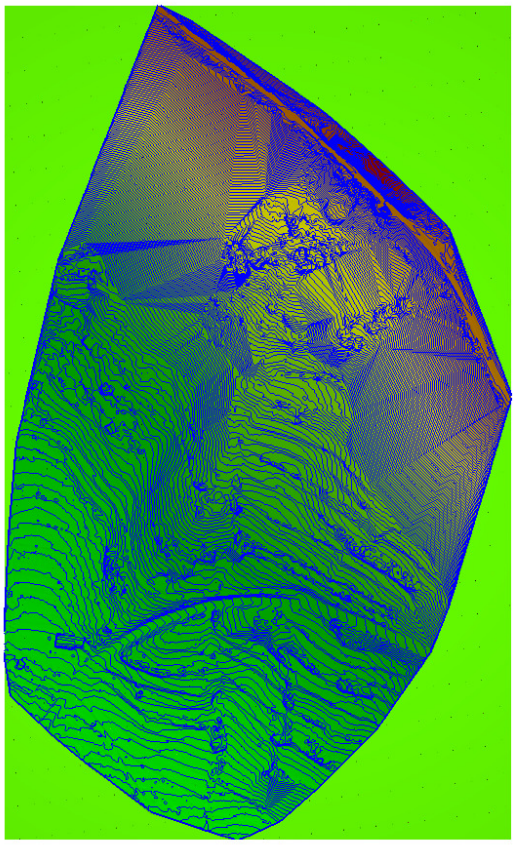
Izvedene su dvodimenzionalne analize stabilnosti padine metodama analiza stabilnosti, koje koriste metodu analize granične ravnoteže i ne razmatraju progresivni slom u padini dok su programom LS-Rapid dobiveni realniji rezultati zbog mogućnosti smanjivanja čvrstoće uslijed deformacija i progresivnog sloma.

5.2.1. Rezultati modeliranja klizišta Krbavčići II u Istri

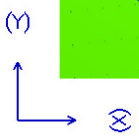
Klizište Krbavčići II opisano je u prethodnom poglavlju. Područje numeričkog modela za simulaciju klizišta Krbavčići II iznosi 535 m (x smjer) i 880 m (y smjer) s veličinom mreže 1 x 1 m (Slika 5.8a i Slika 5.8b). Maksimalna nadmorska visina modela je 462 m n.m., a najniža iznosi 260 m n.m..



a)

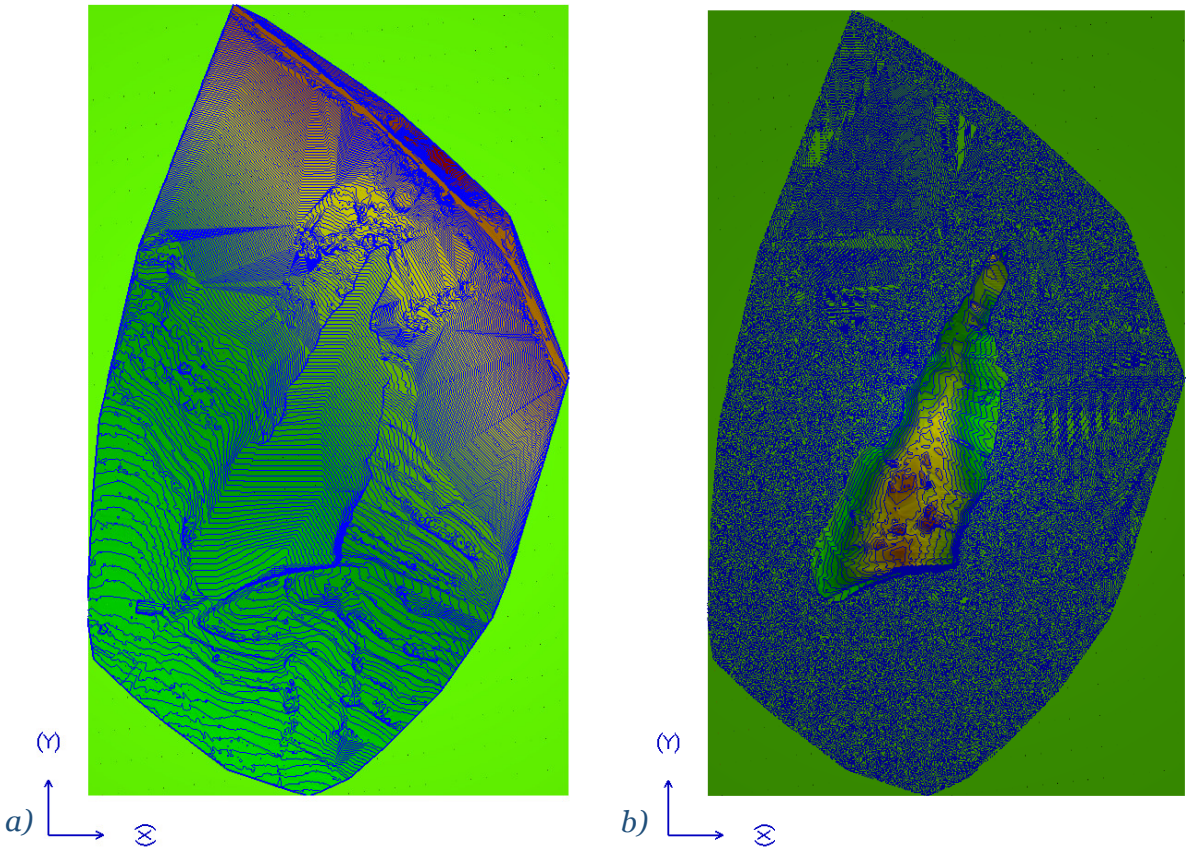


b)



Slika 5.8 *Digitalni model terena za područje istraživanja klizišta Krbavčići II u Istri u programu LS-Rapid: a) 3D prikaz, b) 2D prikaz, sa slojnicama na razmaku 1 m*

Prema Rijekaprojekt (1979), klizna ploha se nalazi na kontaktu pokrivača i flišne stijenske mase. Za potrebe izrade numeričkog modela klizna ploha (Slika 5.9 a) je određena na osnovu inženjerskogeoloških profila klizišta (1-1' do 6-6') izrađenih na osnovi izvedenih istražnih radova iz 1979. godine (bušotine B-1 do B-15, Slika 5.4). Dubina klizne plohe (Slika 5.9 b) kreće se od 10,4 m (bušotina B-11) do maksimalnih 15,4 m (bušotina B-15).



Slika 5.9 *Klizna ploha za područje istraživanja klizišta Krbavčići II u Istri u programu LS-Rapid: a) digitalni model površine klizne plohe, b) debljina kliznog tijela*

Vrijednosti parametara korištenih u ovom numeričkom modelu prikazane su u Tablici 5.1. Te su vrijednosti dobivene na osnovi kombinacije vrijednosti podataka dobivenih laboratorijskim ispitivanjem u uređajima za izravno i prstenasto smicanje (Slika 4.31, Slika 4.32, Slika 4.36, Tablica 4.14), prosječnih vrijednosti parametara iz prethodnih istraživanja i okvirnih preporučenih vrijednosti parametara za slučaj kada nisu dostupni svi podaci s područja istraživanja (Sassa et al. 2010). Odabrana zapreminska težina materijala tla γ_t=20 kN/m^3, koeficijent mirnog zemljanog pritiska k=0,70, koeficijent razvoja pornog pritiska B_{ss}=0,5, posmična deformacija pri slomu DL=5

mm, posmična deformacija na kraju redukcije posmične čvrstoće DU=200 mm te koeficijent pornog pritiska r_u=0 do r_u=0,60.

Porast pornog pritiska zadan je kao pokretač klizanja dok seizmičke sile nisu uključene u analizu. Veličina pornog pritiska izražena je preko koeficijenta pornog pritiska, r_u koji se povećava od vrijednosti 0 na vrijednost 0,60, nakon čega vrijednost ostaje konstantna Vrijednost koeficijenta pornog pritiska r_u=0 odgovara slučaju bez podzemne vode, dok vrijednost r_u=0,60 odgovara razini podzemne vode na površini terena. Zadano vrijeme porasta koeficijenta pornog pritiska proračuna od 3 sekunde proporcionalno je realnom razdoblju od 30 dana.

Tablica 5.1 *Vrijednosti parametara za numerički model klizišta Krbavčići II u Istri*

Parametar	Vrijednost parametra
Zapremninska težina tla (γ_t)	20 kN/m³**
Mirni zemljani pritisak (k=σ_h/σ_v) (eng. *lateral pressure ratio*)	0,7**
Posmična deformacija na početku redukcije čvrstoće (DL)	5 mm*
Posmična deformacija na kraju redukcije čvrstoće (DU)	200 mm*
Koeficijent razvoja pornog pritiska (B_{ss}) (eng. *rate of excess pore-pressure generation*)	0,50****
Koeficijent pornog pritiska (r_u) (eng. *pore pressure ratio*)	0 – 0,60***

** vrijednosti dobivene ispitivanjem u uređaju za prstenasto smicanje*
*** vrijednosti dobivene ispitivanjem u uređaju za izravno smicanje*
**** prosječne vrijednosti podataka iz prethodnih istraživanja na sličnim flišnim lokacijama*
***** okvirne preporučene vrijednosti parametara za slučaj kada nisu dostupni svi podaci s područja istraživanja*

Ostali parametari tla potrebni za modeliranje (kohezija unutar klizne mase (c_i), vršna (c_p) i mobilizirana (c_m), kohezija na kliznoj plohi, kut trenja unutar klizne mase ($\tan\varphi_i$), vršni kut trenja ($\tan\varphi_p$) i mobilizirani kut trenja na kliznoj plohi ($\tan\varphi_p$), posmični otpor na kliznoj plohi u stanju dinamičke ravnoteže (τ_{ss})) ovise o stupnju trošnosti materijala i njihove vrijednosti su prikazani u Tablici 5.2.

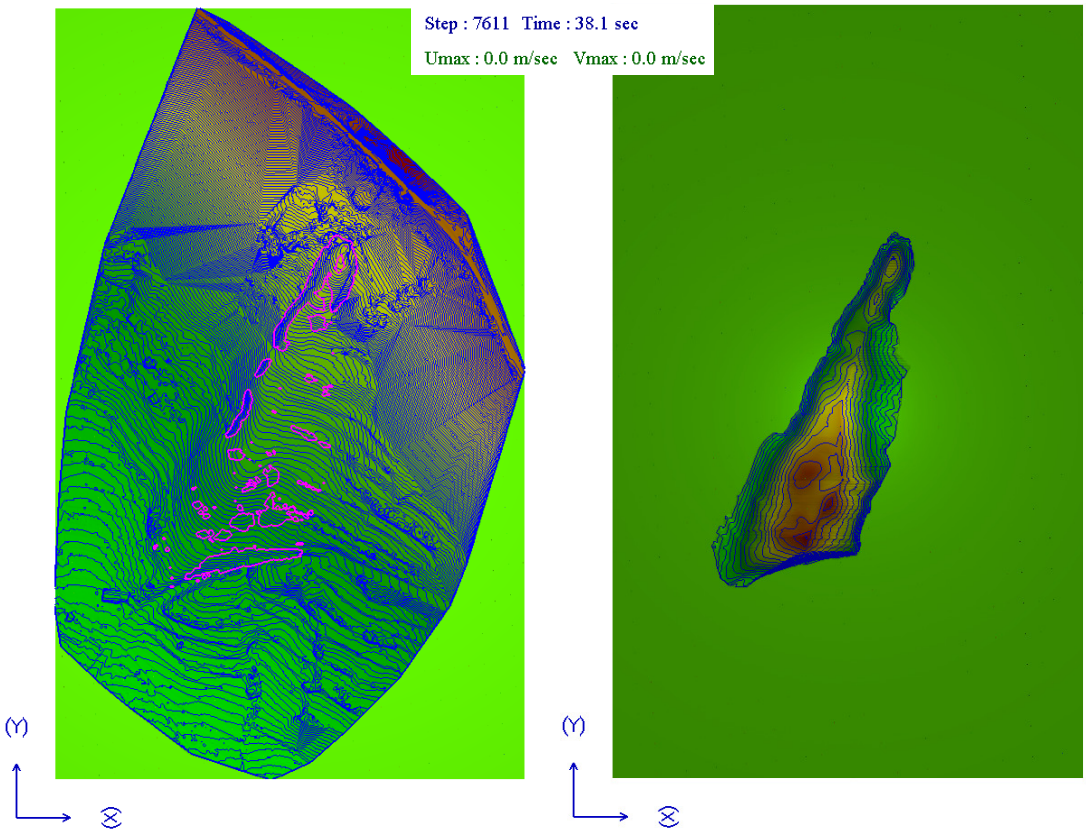
Tablica 5.2 *Vrijednosti parametara za model klizišta Krbavčići II u flišnoj stijenskoj masi različitih stupnjeva trošnosti*

Parametar	Vrijednosti parametara ovisno o stupnju trošnosti flišne stijenske mase		
	I (FR) stupanj trošnosti	III (MW) stupanj trošnosti	V (CW) stupanj trošnosti
Kut trenja na kliznoj plohi tijekom kretanja ($\tan\varphi_m$)**	0,42	0,40	0,37
Vršni kut trenja na kliznoj plohi ($\tan\varphi_p$)***	0,5	0,45	0,42
Kut trenja unutar klizne mase ($\tan\varphi_i$)***	0,45	0,42	0,39
Posmični otpor na kliznoj plohi u stanju dinamičke ravnoteže (τ_{ss})*	38 kPa	44 kPa	42 kPa
Kohezija na kliznoj plohi tijekom kretanja (c_m)**	15,24 kPa	14,73 kPa	14,12 kPa
Vršna kohezija na kliznoj plohi (c_p)***	15,24 kPa	14,73kPa	14,12 kPa
Kohezija unutar klizne mase (c_i)****	0 kPa	0 kPa	0 kPa

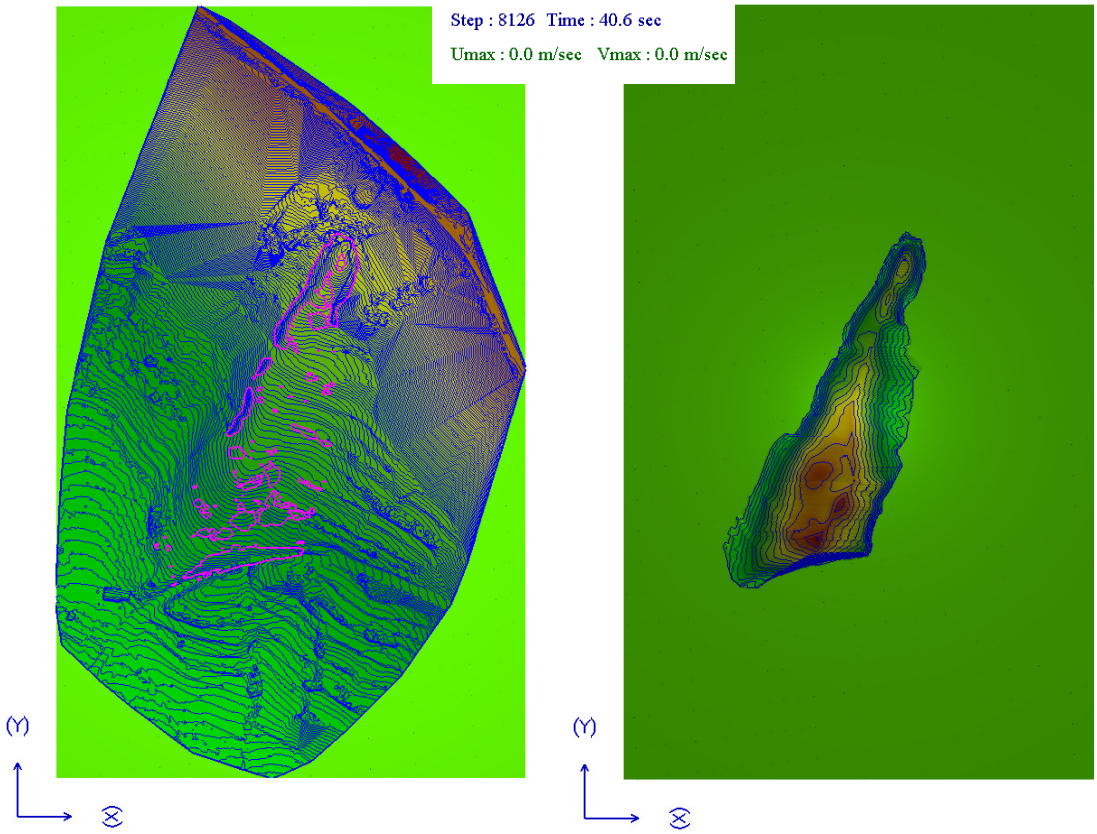
** vrijednosti dobivene ispitivanjem u uređaju za prstenasto smicanje*
*** vrijednosti dobivene ispitivanjem u uređaju za izravno smicanje*
**** prosječne vrijednosti podataka iz prethodnih istraživanja na sličnim flišnim lokacijama*
***** okvirne preporučene vrijednosti parametara za slučaj kada nisu dostupni svi podaci s područja istraživanja*

Rezultati provedenih numeričkih simulacija računalnim programom LS-Rapid za I (FR), III (MW) i V(CW) stupanj trošnosti flišne stijenske mase prikazani su redom na Slikama 5.10 - 5.12. Slika lijevo prikazuje površinu terena nakon prestanka klizanja gdje ružičasta linija predstavlja površinu rasprostiranja klizne mase. Slika desno prikazuje debljinu kliznog tijela nakon prestanka klizanja pri vrijednosti koeficijenta pornog pritiska r_u=0,6.

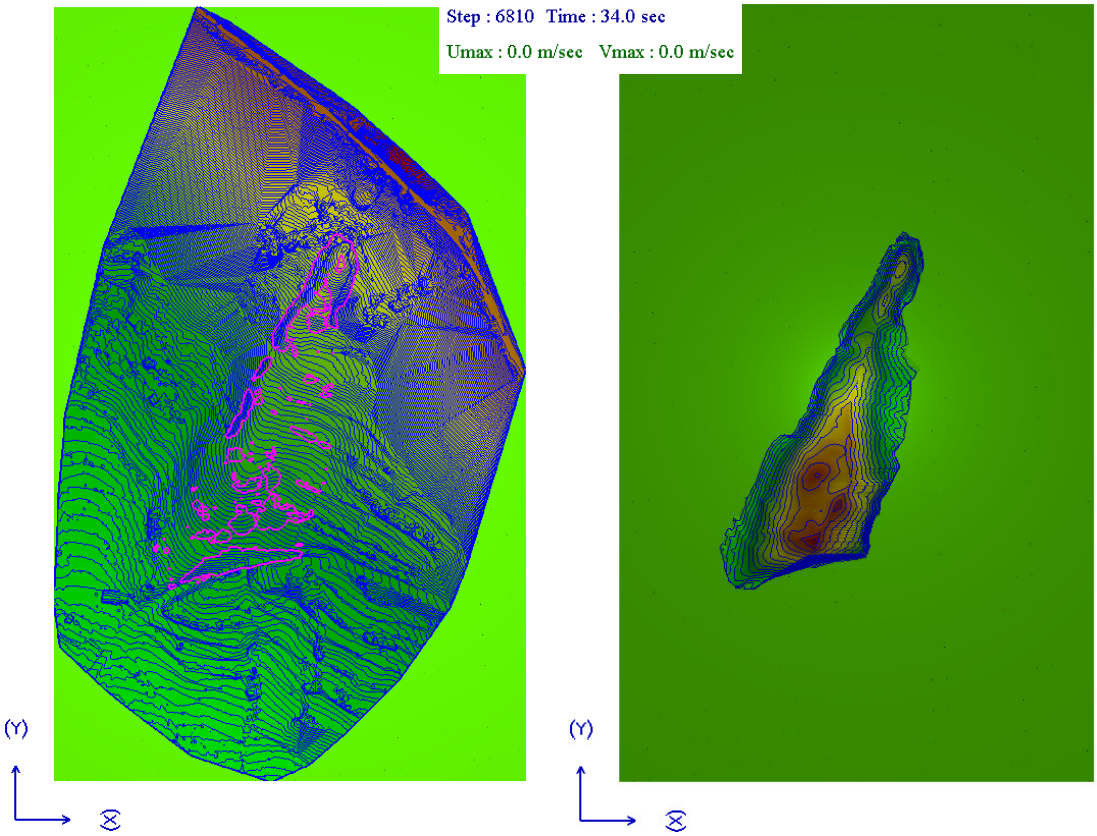
Numerička simulacija je prekinuta kada su sve točke u modelu dosegnule brzinu jednaku nuli, odnosno kada je pokrenuta klizna masa zauzela novi stabilan položaj. Iz rezultata numeričkih simulacija vidljive su neznatne razlike u pokretanju klizne mase s promjenom stupnja trošnosti flišne stijenske mase ispod površine terena. Površina obuhvaćena klizanjem je veća za padinu izgrađenu u potpuno trošnoj V (CW) flišnoj stijenskoj masi u odnosu na padinu izgrađenu u flišnoj stijenskoj masu II (MW) stupnja trošnosti, odnosno I (FR) stupnja trošnosti.



Slika 5.10 *Rezultati 3D numeričkog modela klizišta Krbavčići II u Istri u flišnoj stijenskoj I (FR) stupnja trošnosti, pri r_u=0,6, nakon prestanku kretanja klizne mase*



Slika 5.11 *Rezultati 3D numeričkog modela klizišta Krbavčići II u Istri u flišnoj stijenskoj III (MW) stupnja trošnosti, pri r_u=0,6, nakon prestanku kretanja klizne mase*

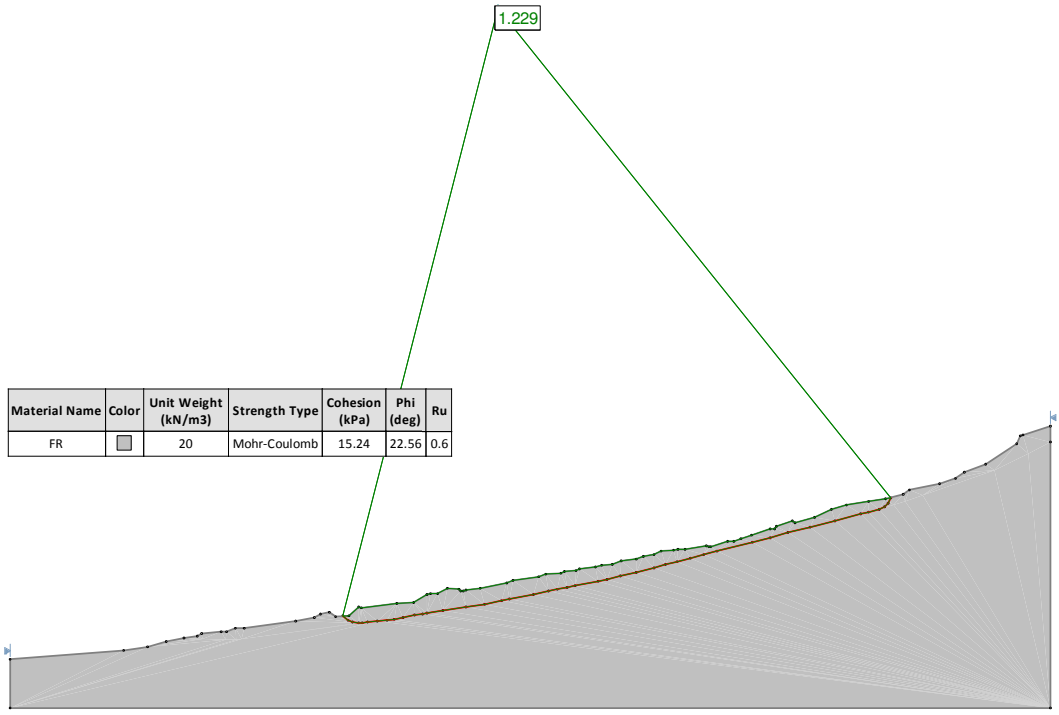


Slika 5.12 *Rezultati 3D numeričkog modela klizišta Krbavčići II u Istri u flišnoj stijenskoj V (CW) stupnja trošnosti, pri r_u=0,6, nakon prestanku kretanja klizne mase*

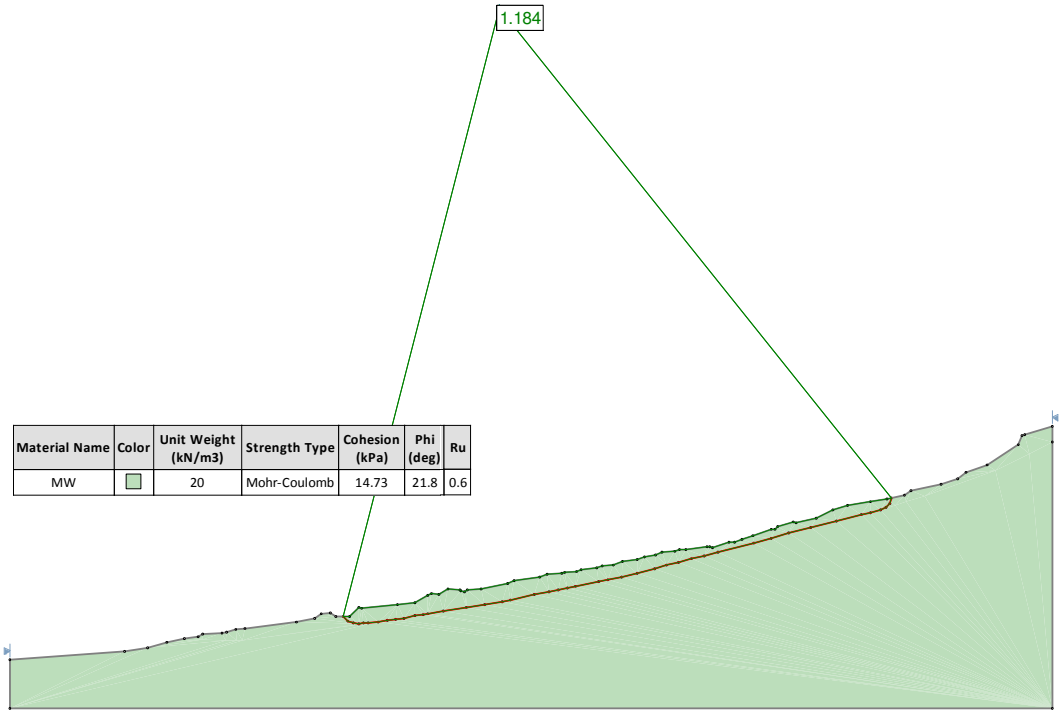
Provedene su i dvodimenzionalne analize stabilnosti za središnji dio klizišta Krbavčići II (Slika 5.5) ovisno o stupnju trošnosti flišne stijenske mase. Analize su provedene programom Rocscience Slide, verzija 6,032, Bishopovom metodom analize granične ravnoteže. Vrijednosti parametara tla korišteni u 2D analizama su jednaki vrijednostima rezidualnih parametara čvrstoće dobivene ispitivanjem u uređaju za izravno smicanje nakon drugog ciklusa smicanja, a pretpostavljen je homogen materijal ispod površine terena, sukladno provedenim 3D numeričkim simulacijama. Analize su provedene za potpuno definiranu kliznu plohu i koeficijent pornog pritiska r_u=0,6.

Dobiveni faktori sigurnosti ovisno o stupnju trošnosti flišne stijenske mase prikazani su na Slici 5.13. Faktor sigurnosti se smanjuje s porastom trošnosti flišne stijenske mase. Padina izgrađena u fišnoj stijenskoj masi I (FR) stupnja trošnosti ima vrijednost faktora sigurnosti 1,229. Faktor sigurnosti se smanjuje na vrijednost 1,184 za padinu izgrađenu u flišnoj stijenskoj masi III (MW) stupnja trošnosti, odnosno na vrijednost 1,115 za V (CW) stupanj trošnosti flišne stijenske mase. Faktor sigurnosti za padinu

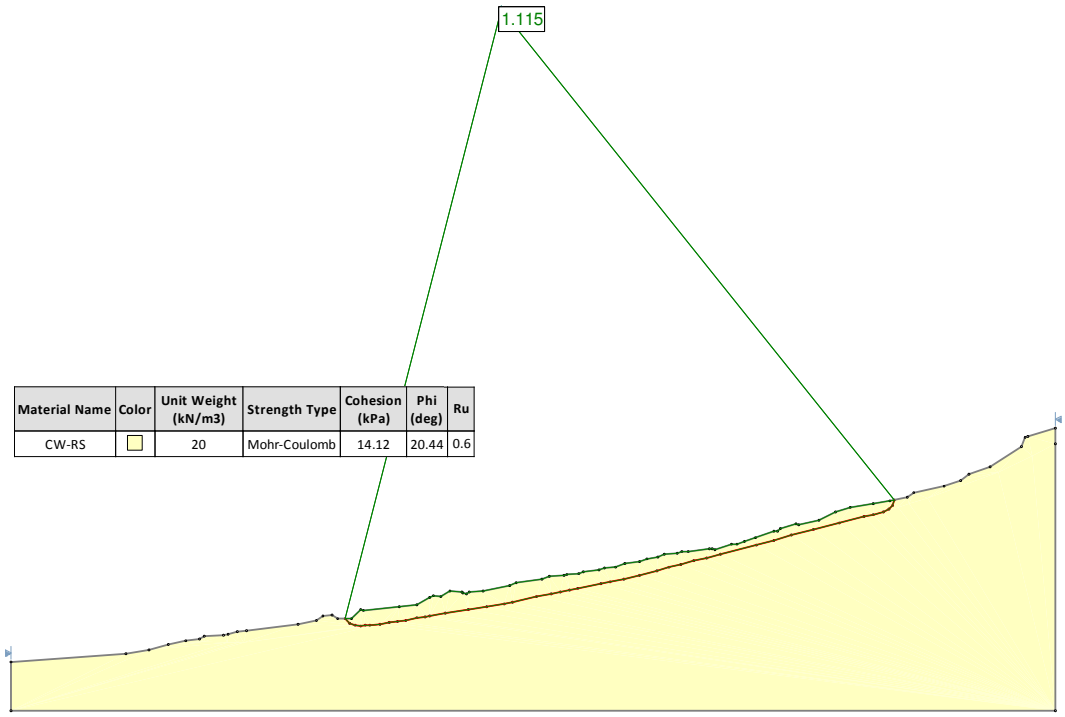
izgrađenu u najtrošnijoj flišnoj stijenskoj masi ima vrijednost 1,115 što je blizu granice stabilnosti klizišta. Rezultati 2D analiza se poklapaju s rezultatima 3D numeričkih simulacija jer je vidljiva samo neznatna razlika u distribuciji klizne mase i faktora sigurnosti u padini izgrađenoj u flišnoj stijenskoj masi različitih stupnjeva trošnosti. Prema analizama se može zaključiti da se stabilnost klizišta Krbavčići II neznatno smanjuje s povećanjem stupnja trošnosti flišne stijenske mase.



a)



b)



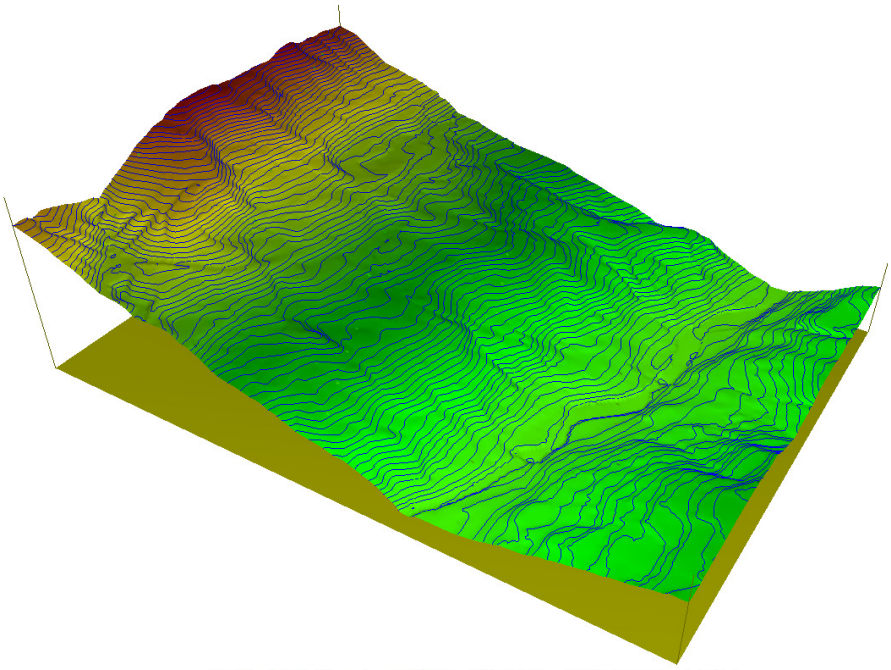
c)

Slika 5.13 *Rezultati 2D analiza stabilnosti klizišta Krbavčići II u Istri pri r_u=0,6 u materijalima: a) I (FR), b) III(MW), c) V(CW) stupnja trošnosti flišne stijenske mase*

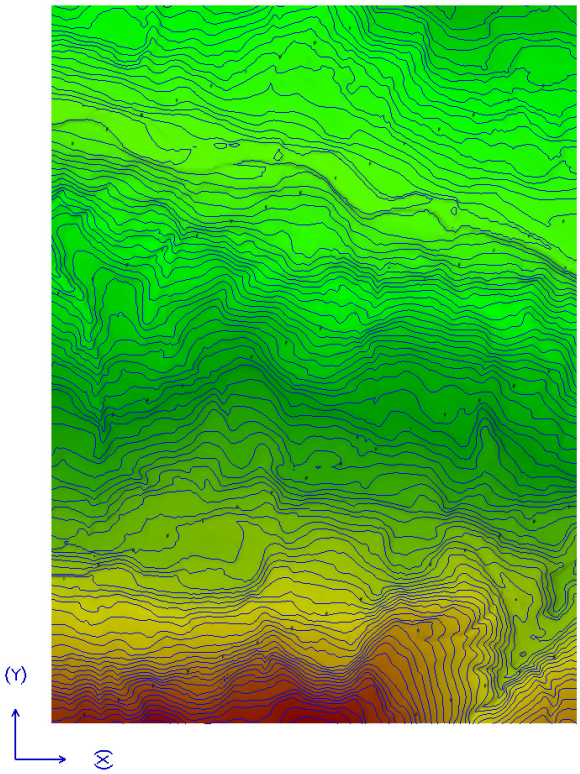
Iz provedenih 2D analiza stabilnosti i 3D numeričkih simulacija na klizištu Krbavčići II vidljivo je da se s porastom razine podzemne vode na površinu terena neće dogoditi značajnije pokretanje kliznog tijela bez obzira na trošenje flišne stijenske mase na padini. Reaktivacija u sjevernoj Istri moguća je u uvjetima nakon ekstremnih oborinskih događaja i posljedičnog podizanja razine podzemne vode u padinama izgrađenim u trošnoj flišnoj stijenskoj masi ili kod formiranih klizišta gdje je na postojećim kliznim plohama došlo do daljnjeg trošenja stijenske mase. Ipak za potpuno trošnu stijesku masu (CW), faktor sigurnosti je neznatno viši od 1,0 (1,11) što s obzirom na točnost modela i pouzdanost u geotehničkim analizama ukazuje na dovođenje klizišta u stanju mogućeg reaktiviranja.

5.2.2. *Rezultati modeliranja klizišta Valići u dolini Rječine*

Klizište Valići u dolini Rječine opisano je u prethodnom poglavlju. Područje numeričkog modela za simulaciju iznosi 3.655 m (x smjer) i 498 m (y smjer) s veličinom mreže 2 x 2 m (Slika 5.14a i Slika 5.14b).



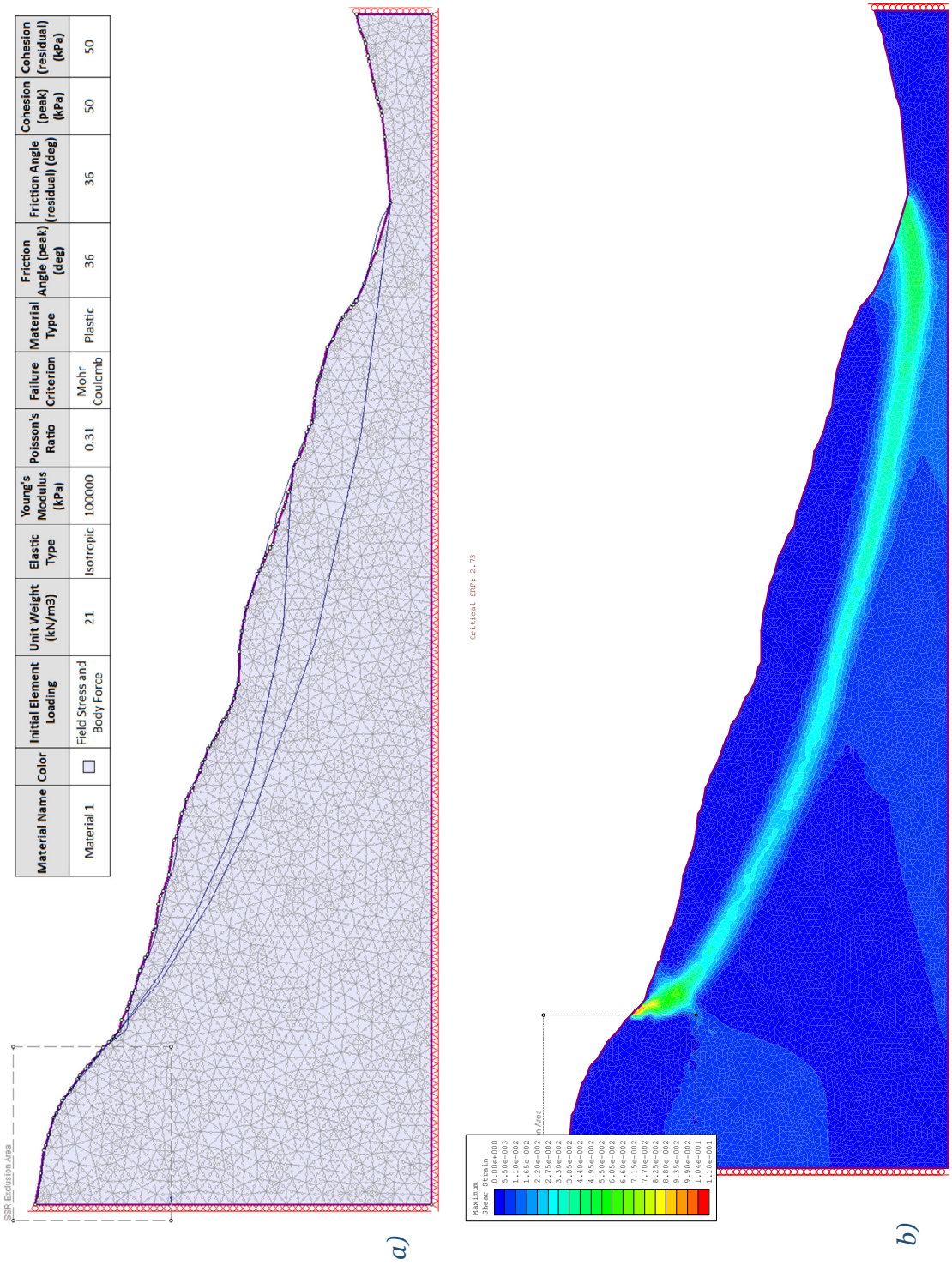
a)



b)

Slika 5.14 *Digitalni model terena za područje klizišta Valići u dolini Rječine u programu LS-Rapid: a) 3D prikaz, b) 2D prikaz, sa slojnicama na razmaku 2 m*

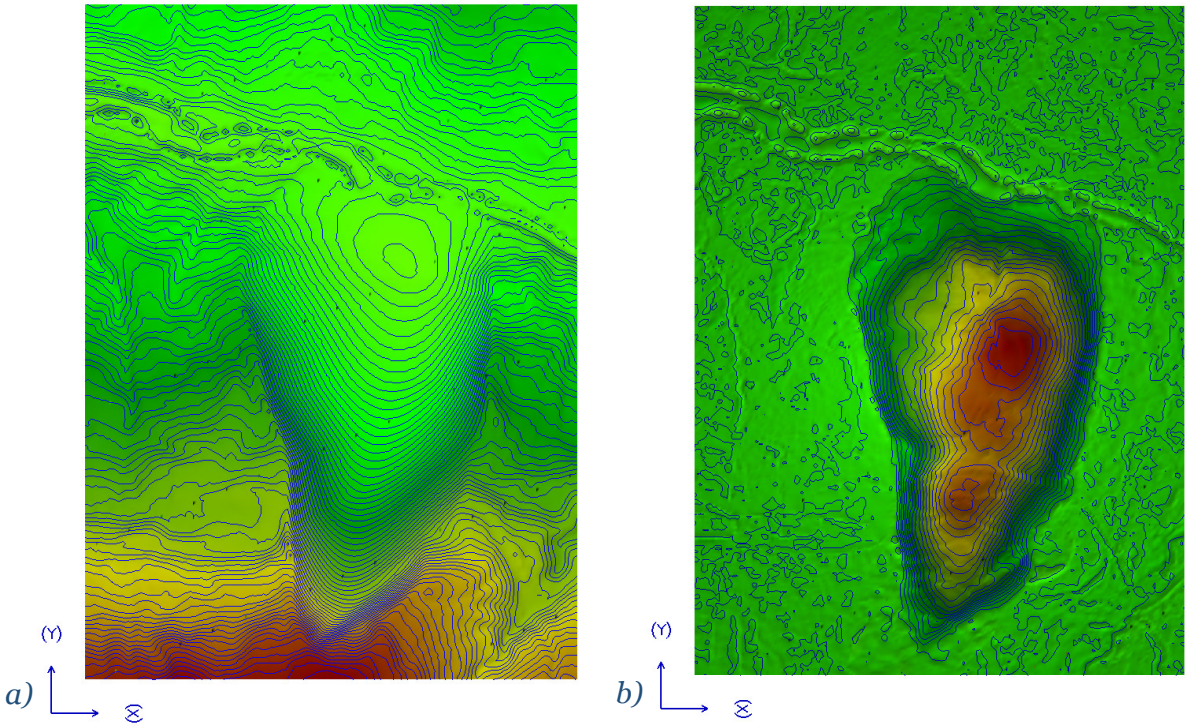
Budući da nisu provedeni istražni radovi kojima bi se utvrdio inženjerskogeološki profil terena ispod površine, dubina klizne plohe određena je na temelju povratnih analiza metodom redukcije čvrstoće (SRM, eng. *Strength Reduction Method*) u programu Rocscience Phase². Homogena mreža se sastoji od 3.514 trokutnih konačnih elemenata i 7.289 čvorova, šest po svakom konačnom elementu (Slika 5.15a). Nakon 11 iteracija, za faktor redukcije čvrstoće jednak 2,73, dobiven je položaj klizne plohe na mjestu maksimalnih posmičnih naprezanja. Dobivena maksimalna dubina klizne plohe iznosi oko 40 m (Slika 5.15b i Slika 5.16).



Material Name	Color	Initial Element Loading	Unit Weight (kN/m3)	Elastic Type	Young's Modulus (kPa)	Poisson's Ratio	Failure Criterion	Material Type	Friction Angle (peak) (deg)	Friction Angle (residual) (deg)	Cohesion (peak) (kPa)	Cohesion (residual) (kPa)
Material 1		Field Stress and Body Force	21	Isotropic	100000	0.31	Mohr Coulomb	Plastic	36	36	50	50

Slika 5.15 *Model u Rocscience Phase²: a) model s mrežom konačnih elemenata u homogenom materijalu, b) položaj klizne plohe dobivene metodom redukcije čvrstoće (Arbanas et al. 2015)*

Digitalni model površine klizne plohe dobiven je na osnovi rezultata metode redukcije čvrstoće i prikazan je na Slici 5.16.



Slika 5.16 *Klizna ploha za područje istraživanja klizišta Valići u dolini Rječine u programu LS-Rapid: a) digitalni model površine klizne plohe, b) debljina kliznog tijela*

Vrijednosti parametara korištenih u ovom numeričkom modelu prikazane su u Tablici 5.3. Te su vrijednosti dobivene na osnovu vrijednosti podataka dobivenih laboratorijskim ispitivanjem u uređaju za prstenasto smicanje prikazanih u Tablici 4.14 i na Slici 4.34 i Slici 4.38. Odabrana je zapreminska težina materijala tla γ_t=20 kN/m^3, koeficijent mirnog zemljanog pritiska k=0,50, koeficijent razvoja pornog pritiska B_{ss}=0,5 - 0,8, posmična deformacija pri slomu DL=4 mm, posmična deformacija na kraju redukcije posmične čvrstoće DU=100 mm te koeficijent pornog pritiska r_u=0 do 0,60. Porast pornog pritiska, preko koeficijenta pornog pritiska, r_u zadan je kao pokretač klizanja koji se povećava se s vrijednosti 0 na vrijednost 0,60 u vremenu od 10 sekundi, nakon čega vrijednost ostaje konstantna. To je zadano vrijeme proračuna proporcionalno razdoblju od jednog mjeseca. Porast pornog pritiska zadan je kao pokretač klizanja dok seizmičke sile nisu uključene u analizu. Numerička simulacija je prekinuta kada sve točke u modelu dostignu brzinu jednaku nuli, odnosno kada klizište zauzme novi stabilni položaj.

Tablica 5.3 *Vrijednosti parametara za numerički model klizišta Valići u dolini Rječine*

Parametar	Vrijednost parametra
Zapremninska težina tla (γ_t)	20 kN/m³
Mirni zemljani pritisak ($k=\sigma_h/\sigma_v$)	0,5**
Posmična deformacija na početku redukcije čvrstoće (DL)	4 mm*
Posmična deformacija na kraju redukcije čvrstoće (DU)	100 mm*
Koeficijent razvoja pornog pritiska (B_{ss})	0,5 – 0,80****
Koeficijent pornog pritiska (r_u)	0 – 0,60***

** vrijednosti dobivene ispitivanjem u uređaju za prstenasto smicanje*
*** vrijednosti dobivene ispitivanjem u uređaju za izravno smicanje*
**** prosječne vrijednosti podataka iz prethodnih istraživanja na sličnim flišnim lokacijama*
***** okvirne preporučene vrijednosti parametara za slučaj kada nisu dostupni svi podaci s područja istraživanja*

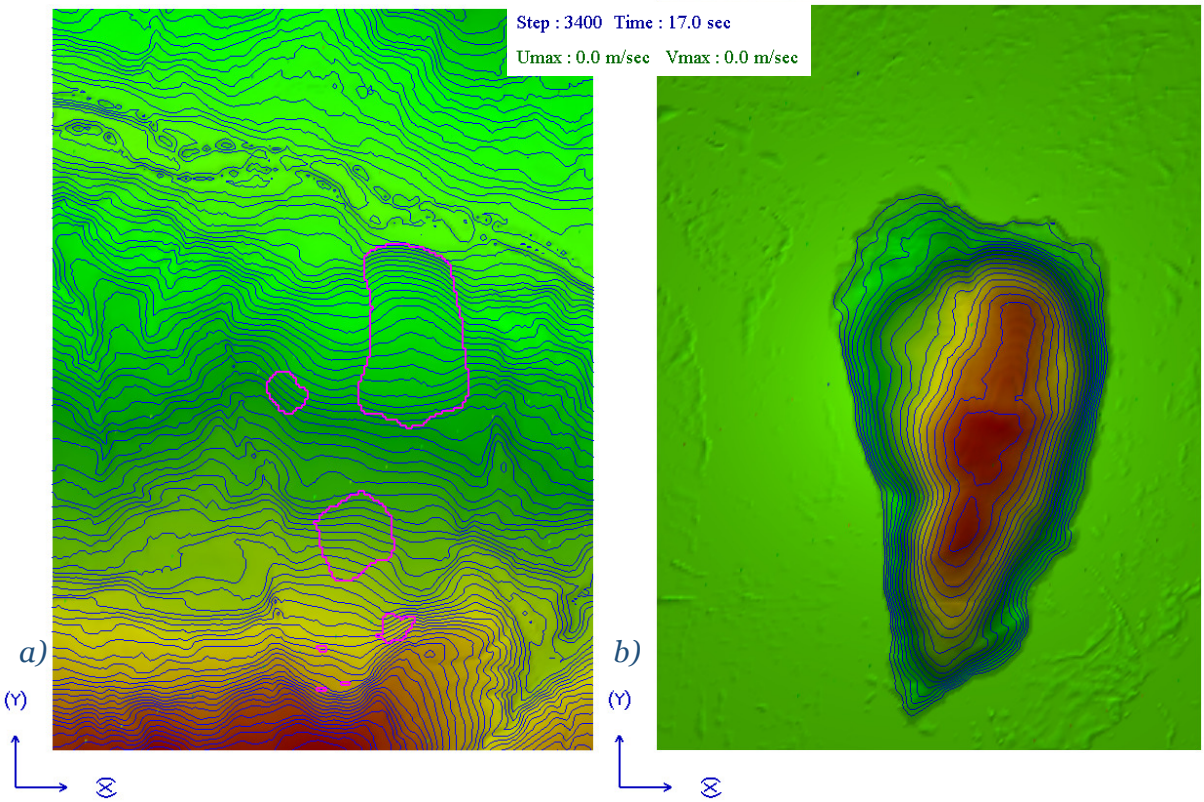
Ostali parametari tla potrebni za modeliranje (kohezija unutar klizne mase (c_i), vršna (c_p) i mobilizirana (c_m), kohezija na kliznoj plohi, kut trenja unutar klizne mase ($\tan\varphi_i$), vršni kut trenja ($\tan\varphi_p$) i mobilizirani kut trenja na kliznoj plohi ($\tan\varphi_p$), posmični otpor na kliznoj plohi u stanju dinamičke ravnoteže (τ_{ss})) ovise o stupnju trošnosti flišne stijenske podloge i njihove vrijednosti su prikazane u Tablici 5.4.

Tablica 5.4 *Vrijednosti parametara za model klizišta Valići u dolini Rječine u flišnoj stijenskoj masi različitih stupnjeva trošnosti*

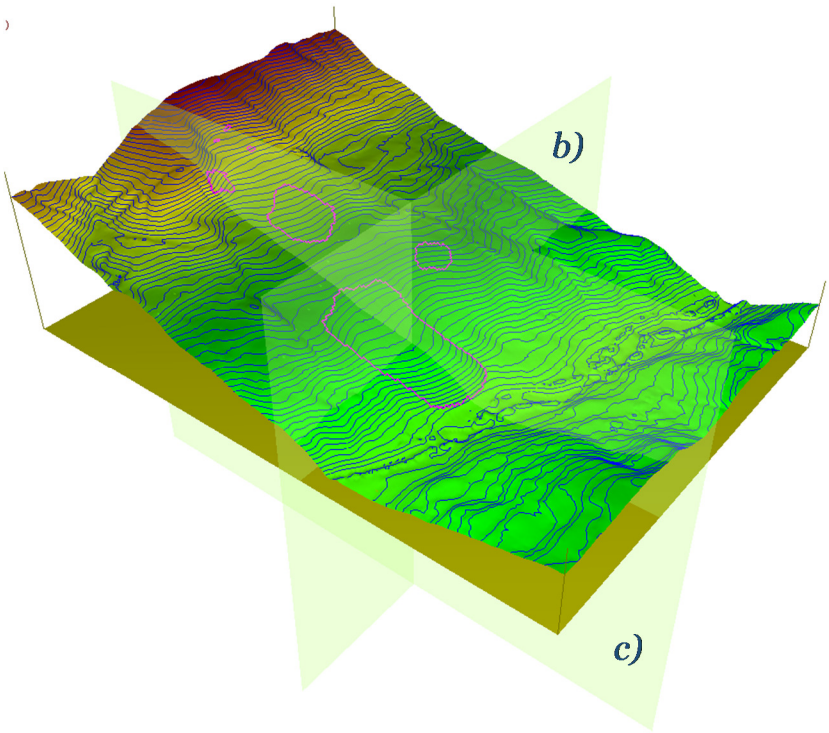
Parametar	Vrijednosti parametara ovisno o stupnju trošnosti flišne stijenske mase	
	II/I (SW/FR) stupanj trošnosti	IV/VV (HW/CW) stupanj trošnosti
Kut trenja na kliznoj plohi tijekom kretanja ($\tan\varphi_m$)**	0,53	0,60
Vršni kut trenja na kliznoj plohi ($\tan\varphi_p$)***	0,60	0,68
Kut trenja unutar klizne mase ($\tan\varphi_i$)***	0,56	0,63
Posmični otpor na kliznoj plohi u stanju dinamičke ravnoteže (τ_{ss})*	55 kPa	55 kPa
Kohezija na kliznoj plohi tijekom kretanja (c_m)*	32 kPa	11 kPa
Vršna kohezija na kliznoj plohi (c_p)*	32 kPa	11 kPa
Kohezija unutar klizne mase (c_i)****	0 kPa	0 kPa

** vrijednosti dobivene ispitivanjem u uređaju za prstenasto smicanje*
*** vrijednosti dobivene ispitivanjem u uređaju za izravno smicanje*
**** prosječne vrijednosti podataka iz prethodnih istraživanja na sličnim flišnim lokacijama*
***** okvirne preporučene vrijednosti parametara za slučaj kada nisu dostupni svi podaci s područja istraživanja*

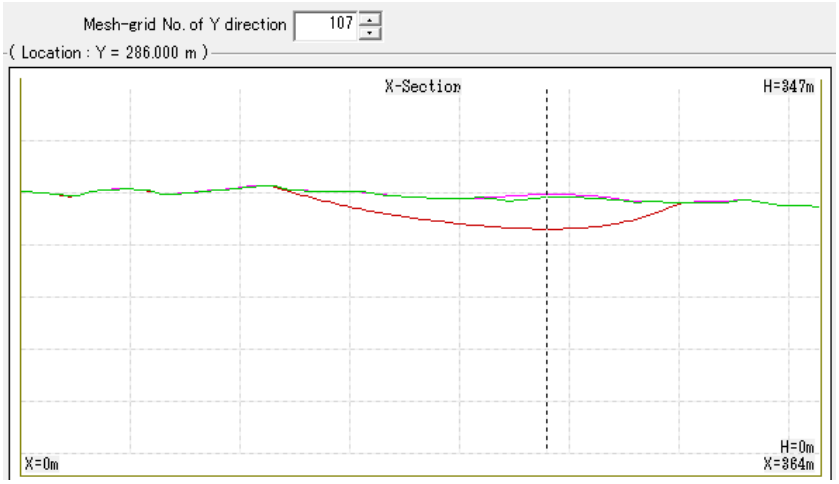
Distribucija klizne mase i debljina kliznog tijela nakon prestanka klizanja prikazane su na Slici 5.17 za II/I (SW/FR) stupanj trošnosti te na Slici 5.19 na IV/V (HW/CW) stupanj trošnosti flišne stijenske mase. Na Slici 5.18 i Slici 5.20 prikazani su poprečni i uzdužni presjek kroz umirenu kliznu masu redom za II/I (SW/FR) i IV/V (HW/CW) stupanj trošnosti flišne stijenske mase. Zelena linija predstavlja originalnu površinu terena prije klizanja, crvena linija položaj klizne plohe te ružičasta linija površinu klizne mase kad je klizanje zaustavljeno. Iz prikazanih rezultata vidljiva je veća površina obuhvaćena klizanjem za padinu izgrađenu u potpuno trošnoj IV/V (HW/CW) stijenskoj masi u odnosu na padinu izgrađenu u stijenskoj masu II/I (SW/FR) stupnja trošnosti. U poprečnom presjeku kroz padinu (Slika 5.18 c i Slika 5.20 c) vidljivo je da je klizište izgrađeno u trošnijoj flišnoj stijenskoj masi zatrpalo veći dio korita nego u svježoj stijenskoj masi.



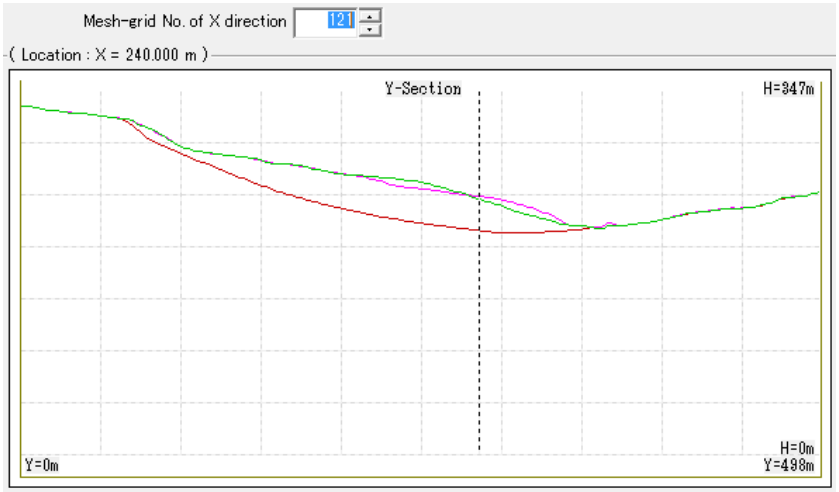
Slika 5.17 *Rezultati 3D numeričkog modela klizišta Valići u dolini Rječine u flišnoj stijenskoj masi II/I (SW/FR) stupnja trošnosti: a) model površine terena sa slojnicama na razmaku od 2 m, b) debljina kliznog tijela na kraju klizanja, pri* r_u*=0,6*



a)

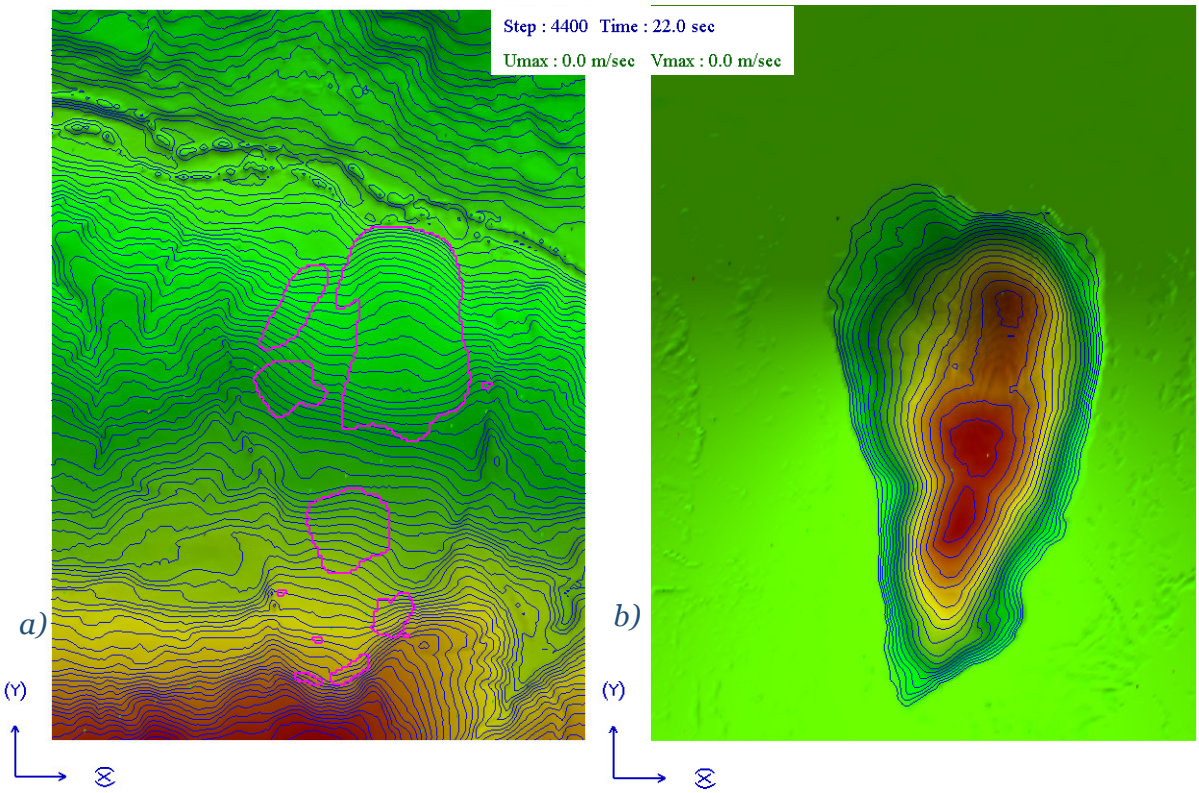


b)

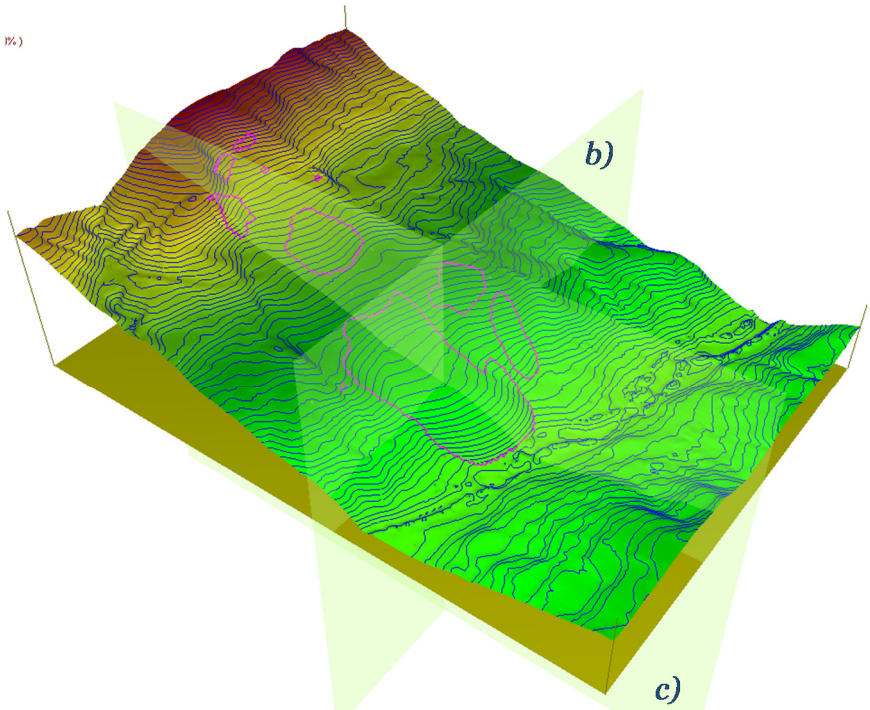


c)

Slika 5.18 *Rezultati numeričkog modela klizišta Valići u dolini Rječine u flišnoj stijenskoj masi II/I (SW/FR) stupnja trošnosti: a) 3D model površine terena klizne mase i položaj uzdužnog i poprečnog presjeka, b) uzdužni i c) poprečni presjek kroz kliznu masu na kraju klizanja, pri* r_u*=0,6*



Slika 5.19 *Rezultati 3D numeričkog modela klizišta Valići u dolini Rječine u flišnoj stijenskoj masi IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti: a) model površine terena sa slojnicama na razmaku od 2 m, b)debljina kliznog tijela na kraju klizanja, pri* r_u*=06*

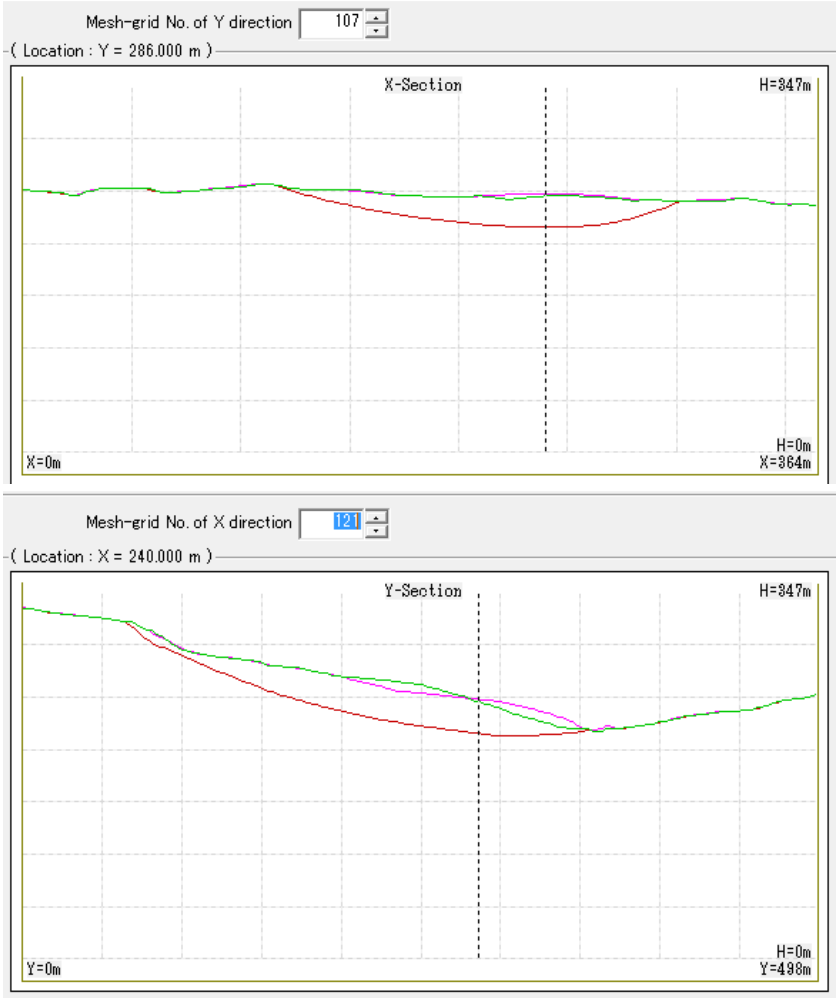


a)

Slika 5.20 *Rezultati numeričkog modela klizišta Valići u dolini Rječine u flišnoj stijenskoj masi IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti: a) 3D model površine terena klizne mase na kraju klizanja, pri* r_u*=0,6 i položaj uzdužnog i poprečnog presjeka*

b)

c)



Slika 5.21 *Rezultati numeričkog modela klizišta Valići u dolini Rječine u flišnoj stijenskoj masi IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti: b) uzdužni i c) poprečni presjek kroz kliznu masu na kraju klizanja, pri* r_u*=0,6*

Za razliku od klizišta u sjevernoj Istri, flišne padine u dolini Rječine pokazuju nestabilnost pri porastu razine podzemne vode pri različitim stupnjevima trošnosti flišne stijenske mase. Pri porastu razine podzemne vode do površine terena dolazi do reaktiviranja klizišta i zatrpavanja korita Rječine. Klizanje u padini izgrađenoj u trošnoj flišnoj stijenskoj masi obuhvaća veću količinu pokrenutog materijala nego u padini izgrađenoj od svježe do slabo trošne flišne stijenske mase, i ukazuje da će proces trošenja stijenske mase imati značajan utjecaj na veličinu klizne mase, dosegnute duljine klizanja i geometriju kliznog tijela nakon stabilizacije.

6. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

Klizišta i procesi erozije u flišnoj stijenskoj masi su učestale pojave na području sjeverne Istre, doline Rječine i Vinodolske doline. Navedeni procesi pospješeni su fizičkim i kemijskim trošenjem sitnozrnastih, nekompetentnih litoloških članova flišne stijenske mase. Klizanjem dolazi do usitnjavanja materijala na kliznoj plohi, odnosno, do pada posmične čvrstoće s njene vršne na rezidualnu vrijednost, koja je mjerodavna za reaktiviranje klizišta. Na tako usitnjenim materijalima različitih stupnjeva trošnosti provedena su laboratorijska ispitivanja rezidualne posmične čvrstoće i mineraloških značajki. Na intaktnim uzorcima flišne stijenske mase ispitan je utjecaj trošenja na jednoosnu tlačnu čvrstoću i postojanost. Provedene su numeričke analize stabilnosti i simulacije reaktiviranja umirenih klizišta pod utjecajem trošenja sitnozrnastih litoloških članova fliša, a ulazni parametri za analize bili su rezidualni parametri čvrstoće materijala različite trošnosti ustanovljeni laboratorijskim ispitivanjima sitnozrnastih litoloških članova fliša.

Iako je obim provedenih ispitivanja značajan, statistički gledano uzorkovan je relativno mali broj uzoraka. Uzorkovanje nekompetentnih članova flišne stijenske mase je vrlo zahtjevno zbog problema utjecaja atmosferilija i vode za isplaku pri bušenju na trošenje meke stijene tijekom uzorkovanja. U laboratorijskim ispitivanjima korišteni su poremećeni uzorci koji su naknadno obrađeni i usitnjeni do stupnja koji odgovara inženjerskom tlu, a što odgovara stanju materijala na kliznoj plohi kao posljedica prirodnog usitnjavanja materijala.

Na temelju laboratorijskog ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće na intaktnim uzorcima PLT metodom i *in situ* ispitivanja Schmidtovim čekićem sitnozrnastih litoloških članova fliša, zaključeno je da trošenje ima značajan utjecaj na jednoosnu tlačnu čvrstoću. Na osnovu ovih ispitivanja izrađena je klasifikacija s opisom, karakteristikama i jednoosnom tlačnom čvrstoćom sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti.

Laboratorijski su ispitane fizičko mehaničke značajke sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti. Uočen je značajan porast granice tečenja, indeksa plastičnosti i aktivnosti gline, odnosno, manja stabilnost i veći potencijal bubrenja

sitnozrnastih litoloških članova fliša s porastom stupnja trošnosti na uzorcima iz cijelog područja istraživanja.

Utjecaj trošenja na rezidualnu posmičnu čvrstoću laboratorijski usitnjenih uzoraka sitnozrnasth litoloških članova fliša je ispitan uređajem za prstenasto smicanje i uređajem za izravno smicanje. Uređajem za prstenasto smicanje po prvi put su provedena ispitivanja uzoraka u uvjetima porasta pornog pritiska čime se simulira porast razine podzemne vode. Ispitivanja u uređaju za izravno smicanje provedena su u jednom i/ili dva ciklusa na pojedinim uzorcima, a neznatan pad rezidualne posmične čvrstoće uočen je nakon drugog ciklusa. Ustanovljeno je da je potrebno provesti ili jedan ciklus ili maksimalnih devet ciklusa ispitivanja kako bi se uočio eventualni pad posmične čvrstoće s porastom deformacije. Dobiveni rezultati ispitivanja ukazuju na pad rezidualne kohezije i porast rezidualnog kuta trenja s porastom stupnja trošnosti uzorka. Svi uzorci sitnozrnasth litoloških članova flišne stijenske mase pokazuju znatan pad rezidualne posmične čvrstoće s povećanjem stupnja trošnosti uzoraka. U radu su naglašene prednosti ispitivanja rezidualne posmične čvrstoće uređajem za prstenasto smicanje u odnosu na ispitivanja uređajem za izravno smicanje.

Na osnovi rezultata ispitivanja utvrđeno je da je za ispitivanje postojanosti sitnozrnastih litoloških članova fliša potrebno više od dva standardom predviđena ciklusa sušenja i vlaženja kako bi se utvrdilo dugotrajno ponašanje trošenja. Uočena su dobra poklapanja rezultata dvaju ispitivanja postojanosti uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša: oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja te dinamičkim uređajem za ispitivanje postojanosti. Ispitivanje indeksa postojanosti prema predloženom standardu rezultira višom postojanosti uzoraka flišne stijenske mase u odnosu na ispitivanja u kojima se promatra i način raspadanja uzorka, odnosno granulometrijski sastav raspadnutog uzorka. Iz indeksa raspadanja, modificiranog indeksa raspadanja i broja ciklusa potrebnih za postizanje polovične degradacije uzorka flišne stijenske mase utvrđeno je da su uzorci svježih sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase značajno postojaniji od trošnijih uzoraka.

Laboratorijskim ispitivanjima istražen je utjecaj trošenja na mineraloške značajke i kapacitet kationske zamjene na uzorcima sitnozrnastih litoloških članova fliša. Uočeno je da su filosilikati najzastupljeniji minerali, a klorit i illitični materijal čine glavni udio

minerala glina u svim uzorcima različitih stupnjeva trošnosti na cijelom području istraživanja. Dokazano je da se tijekom procesa trošenja mijenja udio pojedinih minerala i kapacitet kationske zamjene te posljedično i rezidualna posmična čvrstoća sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase, ovisna o mineralnom sastavu uzoraka.

Provedene su dvodimenzionalne analize stabilnosti i trodimenzionalne simulacije mogućeg reaktiviranja umirenih klizišta Krbavčići II u Istri i Valići u dolini Rječine za različite stupnjeve trošnosti sitnozrnastih litoloških članova fliša na kliznoj plohi uslijed porasta razine podzemne vode. Dokazana je mogućnost reaktiviranja umirenih klizišta kao posljedica utjecaja procesa trošenja flišne stijenske mase na kliznoj plohi. Za klizišta s kliznom plohom u trošnijoj flišnoj stijenskoj masi faktor sigurnosti biti će niži, a površina i volumen pokrenute klizne mase veći.

Iz dobivenih rezultata jasan je **znanstveni doprinos** ovog doktorskog rada:

- Dokazana je promjena mineralnog sastava sitnozrnastih litoloških članova fliša tijekom procesa trošenja.
- Dokazane su niže vrijednosti rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša s višim stupnjem trošnosti.
- Pokazano je da standardna ispitivanja postojanosti ne daju odgovarajuće rezultate za uzorke iz flišne stijenske mase te je potreban veći broj ciklusa sušenja i vlaženja tijekom ispitivanja postojanosti.
- Predložen je postupak ispitivanja postojanosti s 10 ciklusa sušenja i vlaženja kao mjerodavan za ispitivanje uzoraka iz flišne stijenske mase.
- Numeričkim simulacijama dokazan je značajan utjecaj procesa trošenja materijala na kliznoj plohi na mogućnosti reaktiviranja i dugotrajnu stabilnost umirenih klizišta.

Na osnovu provedenih ispitivanja predložene su **smjernice za daljnja istraživanja**:

- Predloženim metodama povesti istraživanja na većem broju uzoraka koji moraju biti konzistentni, odnosno uzorkovani na istom profilu trošenja.

- Provesti detaljnije laboratorijsko ispitivanje posmične čvrstoće na istim uzorcima na kojima se ispituje postojanost i mineralni sastav.
- Proširiti istraživanja predloženim metodama i na drugim vrstama mekih stijena podložnim trošenju.
- Analizirati mogućnost reaktiviranja većeg broja umirenih klizišta u statičkim (porast razine podzemne vode) i dinamičkim uvjetima (potresno opterećenje) za različite stupnjeve trošnosti materijala na kliznoj plohi.
- Analizirati ponašanje reaktiviranih klizišta u flišnoj stijenskoj masi s obzirom na stanje trošnosti materijala pri kojoj je nastupila reaktivacija.

LITERATURA

Albataineh, N. (2006) *Slope Stability Analysis using 2D and 3D Methods*. Master Thesis, The University of Akron, Akron, Ohio.

Aljinović, D., Jurak, V., Mileusnić, M., Slovenec, D., Presečki, F. (2010) The origin and composition of flysch deposits as an attribute to the excessive erosion of the Slani Potok valley („Salty Creek "), Croatia. *Geologia Croatica*, *63*(3), pp. 313–322.

Arbanas, Ž. (1982) *Stabilnost padina u flišu*. Diplomski rad, Fakultet graditeljskih znanosti Sveučilišta u Rijeci.

Arbanas, Ž., Benac, Č., Jardas, B. (1999) Small Landslides on the Flysch of Istria. In *Proceedings of 3rd conference of Slovenian geotechnical society*, Ljubljana, Sloveina. pp. 81–88.

Arbanas, Ž., Benac, Č., Jurak, V. (2006) Causes of debris flow formation in flysch area of North Istria, Croatia. In E. DE Lorenzini G, Brebbia CA (Ed.), *Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows*. WIT Transaction on Ecology and the Environment. pp. 283–292.

Arbanas, Ž., Dugonjić, S., Benac, Č. (2013) Causes of Small Scale Landslides in Flysch Deposits of Istria, Croatia. In C. Margottini, P. Canuti, & K. Sassa (Eds.), *Landslide Science and Practice, Volume 1: Landslide Inventory and Susceptibility and Hazard Zoning*, Rome, Italy: Springer Berlin Heidelberg. pp. 221–226.

Arbanas, Ž., Grošić, M., Dugonjić, S. (2008) Behaviour of the reinforced cuts in flysch rock mass. In Gm. E. Ellis, Y. Hai-Sui & A. D. and N. Thom (Eds.), *Proc. of 1st Int. Conf. On Transportaion Geotechnics*. Nottigham, UK: Taylor and Francis Group, Balkema, London UK. pp. 283–291.

Arbanas, Ž., Mihalić Arbanas, S., Dugonjić Jovančević, S., Vivoda, M. (2010) Brus landslide, translational block sliding in flysch rock mass. In J. Zhao, V. Labiouse, J.-P. Dudt, & J.-F. Mathier (Eds.), *Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2010)*, Laussane, Switzerland. pp. 635–638.

Arbanas, Ž., Mihalić Arbanas, S., Vivoda, M., Peranić, J., Dugonjić Jovančević, S., Jagodnik, V. (2014) Identification, monitoring and simulation of landslides in the Rječina River Valley, Croatia. In *Proceedings of SATREP Workshop on Landslides,* Hanoi, Vietnam. pp. 200–213.

Arbanas, Ž., Vivoda, M., Mihalić Arbanas, S., Peranić, J., Sečanj, M., Bernat, S., Krkač, M. (2015) Analysis of a reservoir water level impact on landslide reactivation. In *Knjiga sažetaka 2nd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region*, Beograd, Srbija. pp. 15–20.

ASTM. (2004) *Standard test method for slake durability of shales and similar weak rocks (D4644-87). American Society for testing and Materials*. Philadelphia.

ASTM. (2010) *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (D4318-10e1).*

ASTM. (2011) *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions (D3080/D3080M-11).*

ASTM. (2014) *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (D854-14).*

Attewell, P. B., Farmer, I. W. (1976) *Principles of engineering geology*. Chapman and Hall.

Aydin, A. (2015) ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version. In R. Ulusay (Ed.), *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014 SE - 2* (pp. 25–33). Springer International Publishing.

Baligh, M. M., Azzouz, A. S. (1975) End effects on the stability of cohesive soils. *Journal of the Geotehnical Engineering Division*, *101*(GT11), pp. 1105–1117.

Baud, J. P., Gambin, M. (2011) No Title. In *Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,* Athens: Mill Press. pp. 25–330.

Benac, Č. (1994) *Inženjerskogeološke osobitosti obalnog pojasa i podmorja Riječkog zaljeva*. Dissertation, University of Zagreb.

Benac, Č. (2016) *Rječnik pojmova u općoj i primijenjenoj geologiji*. M. Juračić, R. Buljan, D. Pollak (Eds.). Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet u Rijeci.

Benac, Č., Arbanas, Ž., Jurak, V., Oštrić, M., Ožanić, N. (2005) Complex landslide in the Rječina valley (Croatia): origin and sliding mechanism. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *64*(4), pp. 361–371.

Benac, Č., Dugonjić, S., Arbanas, Ž., Oštrić, M., Jurak, V. (2009) The Origin Of Instability Phenomena Along The Karst-Flysch Contacts. In I. Vrkljan (Ed.), *Proceedings of ISRM International Symposium Rock Engineering in Difficut Ground Conditions: Soft Rock and Karst*, Cavtat, Croatia: CRC Press, Boca Raton-London-New York- Leiden. pp. 757–761.

Benac, Č., Mihalić, S., Vivoda, M. (2010) Geological and geomorphological conditions in the area of Rječina river and Dubračina river catchments (Primorsko-Goranska County, Croatia). In *Abstracts book of 1st Japanese-Croatian project workshop "International Experience"*. Dubrovnik, Croatia. p. 39.

Benac, Č., Oštrić, M., Dugonjić Jovančević, S. (2014) Geotehnical properties in relation to grain-size and mineral composition: The Grohovo landslide case study (Croatia). *Geologia Croatica*, *67*(2), pp. 127–136.

Bergant, S., Tišljar, J., Šparica, M. (2003) Eocen carbonates and flysch deposits of the Pazin basin. In *22nd IAS meeting of sedimentology.Field trip guidebook*. Opatija, Croatia.

Bernat, S., Đomlija, P., Mihalić Arbanas, S. (2014) Slope movements and erosion phenomena in the Dubračina River basin: A geomorphological approach. In *Proceedings of 1st Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region "Landslide and Flood Hazard Assessment"*. pp. 79–84.

Bhattarai, P., Marui, H., Tiwari, B., Watanabe, N., Tuladhar, G., Aoyama, K. (2006) Influence of Weathering on Physical and Mechanical Properties of Mudstone. *Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides*, pp. 467–479.

Bishop, A. W. (1955) The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Géotechnique*, *5*(1), pp. 7–17.

Bishop, A. W., Green, G. E., Garga, V. K., Andresen, A., Brown, J. D. (1971) A New Ring Shear Apparatus and Its Application to the Measurement of Residual Strength. *Géotechnique*, *21*(4), pp. 273–328.

Blašković, I. (1999) Tectonics of Part of the Vinodol Valley Within the Model of the Continental Crust Subduction. *Geologia Croatica*, *52*(2), pp. 153–189.

Boakye, K. (2008) *Larhe in situ direct shear tests on rock piles at the Questa mine, New Mexico*. MS Thesis, Soccoro, New Mexico.

Bradley, W. F. (1945) Molecular Associations between Montmorillonite and Some Polyfunctional Organic Liquids1. *Journal of the American Chemical Society*, *67*(6), pp. 975–981.

Brindley, G. W., Brown, G. (1980) *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray Identification*. G. W. B. Brindley G. (Ed.). Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.

Bromhead, E. N. (1979) A simple ring-shear apparatus. *Ground Engineering*, *12*(5), pp. 40–44.

Brown, E.T. (1981) *Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods*. Published for the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics by Pergamon Press.

Brown, G. (1961) *The X-ray Identification and Crystal Structures of Clay Minerals*. Mineralogical Society.

BSI. (1981) Code of Practice for site investigations, BS 5930. In *British Standards Institution*. London. p. 147.

BSI. (1990) Methods of test for soils for civil engineering purposes – Classification tests, BS 1377-2. In *British Standards Institution*.

Cano, M., Tomas, R. (2016) Proposal of a New Parameter for the Weathering Characterization of Carbonate Flysch-Like Rock Masses: The Potential Degradation Index (PDI). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, pp. 1–18.

Cano, M., Tomás, R. (2015) An approach for characterising the weathering behaviour of Flysch slopes applied to the carbonatic Flysch of Alicante (Spain). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *74*(2), pp. 443–463.

Cardoso, R., Alonso, E. E. (2009) Degradation of compacted marls: A microstructural investifation. *Soils and Foundations*, *49*(3), pp. 315–327.

Chandler, R. J. (1969) The effects of weathering on the shear strength properties of Keupler marl. *Geotehnique*, *19*(3), pp. 321–334.

Chang, M. (2002) A 3D slope stability analysis method assuming parallel lines of intersection and differential straining of block contact. *Canadian Geotehnical Journal*, *39*(4), pp. 799–811.

Chen, J., Blume, H. P., Beyer, L. (2000) Weathering of rocks induced by lichen colonization — a review. *Catena*, (39/2), pp. 121–146.

Chen, R. H., Chameau, J. L. (1983) Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes. *Geotechnique*, *32*(1), pp. 31–40.

Chigira, M. (1990) A mechanism of chemical weathering of mudstone in a mountainous area. *Engineering Geology*, *29*(2), pp. 119–138.

Chigira, M., Oyama, T. (2000) Mechanism and effect of chemical weathering of sedimentary rocks. *Engineering Geology*, *55*(1-2), pp. 3–14.

Clerici, A. (1992) Engineering Geological Characterization of Weak Rocks: Classification, Sampling and Testing. In J. A. Hudson (Ed.), *ISRM Symposium Eurock'92, Rock Characterization*. Chester UK. pp. 179–182.

Cruden, D. M. (1991) Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, *43*, pp. 27–29.

Cruden, D. M., Varnes, D. J. (1996) Landslide Type and Processes. Landslides: Investigation and Mitigation. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Special report 247*, pp. 36–75.

Deere, D. V., Miller, R. P. (1966) *Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock*. University of Illinois, U.S. Department of Commerce National, Technical Information service.

Dixon, J. C. (2006) Weathering. In *Encyclopedia of Geomorphology*. Goudie, A. S. Taylor & Francis e-Library.

Dobereiner, L. (1984) *Engineering geology of weak sandstones*. Diertacija, University of London, United Kingdom.

Dobereiner, L., Freitas, M. H. De. (1986) Geotechnical properties of weak sandstones. *Géotechnique*, *36*(1), pp. 79–94.

Dugonjić Jovančević, S. (2013) *Procjena hazarda pojave klizanja u flišu*. Disertatcija, Sveučilište u Rijeci.

Dugonjić Jovančević, S., Arbanas, Ž. (2012) Recent landslides on the Istrian Peninsula, Croatia. *Natural Hazards*, *62*(3), pp. 1323–1338.

Dümmler, H., Schröder, D. (1965) No TitleZur qualitatieren und quantitativen röntgenographische Bestimmung von dreischascht-tonmineralen in Böden. *Z. Pflanzewernähr, Düng. Bodenkunde*, (109), pp. 35–47.

Eberhardt, E., Thuro, K., Luginbuehl, M. (2005) Slope instability mechanisms in dipping interbedded conglomerates and weathered marls—the 1999 Rufi landslide, Switzerland. *Engineering Geology*, *77*(1-2), pp. 35–56.

El Amrani Pazza, N., Lamas, F., Irigaray, C., Chacon, J., Oteo, C. (2000) The residual shear strength of Neogene marly soils in the Granada and Guadix basins, southeastern Spain. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *58*, pp. 99–105.

Erguler, Z. A., Shakoor, A. (2009) Quantification of Fragment Size Distribution of Clay-Bearing Rocks after Slake Durability Testing. *Environmental & Engineering Geoscience*, *15*, pp. 81–89.

Fookes, P. G., Gourley, C. S., Ohikere, C. (1988) Rock weathering in engineering time. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, *21*, pp. 33–57.

Fookes, P. G., Horswill, P. (1970) Discussion on engineering grade zones. In *Proceedings of the In Situ Investigations in Soils and Rocks,* London. pp. 53–57.

Franklin, J., Dusseault, M. B. (1989) *Rock Engineering*. McGraw-Hill Ryerson.

Franklin, J. A., Chandra, R. (1972) The slake-durability test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, *9*, pp. 325–341.

Frydman, S., Talesnick, M., Geffen, S., Shvarzman, A. (2007) Landslides and residual strength in marl profiles in Israel. *Engineering Geology*, *89*(1–2), pp. 36–46.

Galván, V. R. (1999) *Simulation of the geotechnical properties of arenaceous soft rocks by means of artificial materials*. PhD Thesis, Universidade de São Paulo (in Portugese).

Gamble, J. C. (1971) *Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks*. Ph.D Thesis. University of Illinois.

Garga, V. K., Sendano, J. I. (2002) Steady state strength of sands in a constant volume ringshear apparatus. *Geotechnical Testing Journal*, *25*(4), pp. 414–421.

Geological Society of London. (1995) The Preparation of Maps and Plans in Terms of Engineering Geology. *Q.J. Engineering Geology*, *28* (Report by the Geological Society Engineering Group Working Party Report),pp. 207–242.

Grim, R. E. (1953) *Clay mineralogy*. McGraw-Hill.

Grošić, M. (2014) *Time-dependent deformation od flysch rock mass*. Disertacija, Sveučilište u Rijeci.

Gulam, V. (2012) *The Erosion of Flysch Badlands in the Central Istria*. Dissertation, University of Zagreb (in Croatian).

Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Sović, I. (2011) *Karte potresnih područja Republike Hrvatske za povratna razdoblja od Tp= 95 i 475 godina*. Geofizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

Hoek, E. (1999) Support for Very Weak Rock Associated with Faults and Shear zones. In *Distinguished lecture for the opening of the International Symposium on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining*, Kalgoorlie, Australia. pp. 14–19.

Hovland, H. J. (1977) Three-dimensional slope stability analysis method. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *103*(9), pp. 971–986.

Hrvoslev, M. J. (1939) Torsion shear tests and their place in the determination of the shearing resistance of soils. In *Proc Am Soc Test Mater*, 39, pp. 999–1022.

Hungr, O. (1987) An extension of Bishop's Simplified Method of slope stability analysis to three dimensions. *Geotechnique, 37*(1), pp. 113–117.

Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014) The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, *11*(2), pp. 167–194.

Hungr, O., Morgenstern, N. R. (1984) High velocity ring shear tests on sand. *Géotechnique*, *34*(3), pp. 415–421.

Hungr, O., Salgado, F. M., Byrne, P. M. (1989) Evaluation of a three-dimensional method of slope stability analysis. *Canadian Geotehnical Journal*, *26*(4), pp. 679–686.

Husnjak, S., Bogunović, M., Vidaček, Ž., Racz, Z., Sraka, M., Bensa, A. (2001) Istraživanje rizika od erozije tla vodom u Hrvatskoj. *Hrvatske Vode*, *34*(9), pp. 31–46.

Hutchinson, J. N. (1988) General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In C. Bonnard (Ed.), *Proceedings of 5th International Symposium on Landslides*, Rotterdam: Balkema. pp. 3–35.

IAEG. (1981) Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. *Bulletin of International Association of Engineering Geology*, (24), pp. 253–274.

IAEG. (1990) Suggested nomenclature for landslides. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Geologie de l'Ingenieur*, *41*(1), pp. 13–16.

ISRM, Commission on Standardization of Laboratory and Field Test (1979) Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties. In R. Ulusay & J. A. Hudson (Eds.), *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring:1974-2006*, pp. 141–156.

ISRM, Commision on Testing Methods. (1981) *Rock Characterization, Testing and Monitoring: ISRM Suggested Methods*. E. T. Brown (Ed.). Oxford: Pergamon Press.

ISRM, Commision on Testing Methods. (1985) Suggested Methods for Determining Point Load Strength. In R. Ulusay & J. A. Hudson (Eds.), *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring:1974-2006*.

Johnston, I. W. (1993) Soft Rock Engineering. *Comprehensive Rock Engineering*, *1*, pp. 367–393.

Johnston, I. W., Novello, E. A. (1994) Soil mechanics, rock mechanics and soft rock technology. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, *107*(1), pp. 3–9.

Jurak, V. (1980) *Personal notes (Unpublished material).*

Jurak, V., Slovenec, D., Mileusnić, M. (2005) Excessive Flysch Erosion - Slani Potok. In *Excursion Guide book of the 3rd Croatian Geological Congress*, Opatija, Croatia. pp. 51–55.

Kanji, M. A. (2014) Critical issues in soft rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *6*(3), pp. 186–195.

Klein, S. (2001) An Approach to the Classification of Weak Rock for Tunnel Project. In *RETC Proceedings*.

Knill, J. L., Jones, K. S. (1965) The Recording and Interpretation of Geological Conditions in the Foundations of the Roseires, Kariba, and Latiyan Dams. *Géotechnique*, *15*(1), pp. 94–124.

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*(4), pp. 296–312.

Lam, L., Frendlund, D. G. (1993) A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis. *Canadian Geotehnical Journal*, *30*(6), pp. 905–919.

Lama, R. D., Vutukuri, V. S. (1978) Handbook on mechanical properties of rocks. In *Trans Tech Publications*. Clausthal, Germany. p. 1650.

Lehchinsky, D., Baker, R., Silver, M. L. (1985) Three-dimensional analysis of slope stability. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomehanics*, *9*(3), pp. 199–223.

Li, A. J. (2009) *Two and Three Dimensional Stability Analyses for Soil and Rock Slopes*. PhD Thesis, The University of Western Australia, Perth, Australia.

Marinčić, S. (1981) Eocene Flysch of Adriatic zone. *Geološki Vjesnik*, *34*, pp. 27–38.

Marinos, P., Hoek, E. (2001) Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *60*(2), pp. 85–92.

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. In *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe*, 104, pp. 405–413.

Mesri, G., Shahien, M. (2003) Residual Shear Strength Mobilized in First-Time Slope Failures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *1*(12), pp. 12–31.

Mihljević, D., Prelogović, E. (1992) Structural - geomorphological characteristic of the mountain ranges Učka & Ćićarija. In A. Bognar (Ed.), *Proceedings of the International symposium Geomorphology and sea and The meeting of the geomorphological commission of the Carpatho-Balkan countries,* Mali Lošinj, Croatia. pp. 13–24.

Mileusnić, M. (2007) *Podrijetlo, uvjeti nastanka i sastav glinovitih naslaga taloženih tijekom aptsko-albske emerzije u Istri*. Disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Mileusnić, M., Slovenec, D., Jurak, V. (2004) Thenardite-efflorescence indicating cause of the excessive flysch erosion, Slani potok, Croatia. *ACTA Mineralogica-Petrographica Abstract Series*, p. 75.

Miller, R. P. (1965) *Engineering classification and index properties for intact rock*. Dissertation, University of Illinois.

Miščević, P. (2004) *Uvod u inženjersku mehaniku stijena*. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu.

Miščević, P., Števanić, D., Štambuk-Cvitanović, N. (2009) Slope instability mechanisms in dipping conglomerates over weathered marls: Bol landslide, Croatia. *Environmental Geology*, *56*, pp. 1417–1426.

Miščević, P., Vlastelica, G. (2011) Durability Characterization of Marls from the Region of Dalmatia, Croatia. *Geotechnical and Geological Engineering*, *29*(5), pp. 771–781.

Moore, D. M., Reynolds, R. C. (1997) *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals* (Second edi). Oxford: Oxford University.

Morgenstern, N. R., Price, V. E. (1965) The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Géotechnique*, *15*(1), pp. 79–93.

Morisawa, M. (1968) *Streams; their dynamics and morphology*. McGraw-Hill.

Nakamura, S., Gibo, S., Egashira, K., Kimura, S. (2010) Platy layer silicate minerals for controlling residual strength in landslide soils of different origins and geology. *Geology*, *38*(8), pp. 743–746.

Neilson, J. L. (1970) Notes on weathering of the Silurian rocks of the Melbourne district. *Journal of the Institution of Engineers*, (42), pp. 9–12.

Nemčok, A., Pašek, J., Rybář, J. (1972) Classification of landslides and other mass movements. *Rock Mechanics*, *4*(2), pp. 71–78.

Nickmann, M., Spaun, G., Thuro, K. (2006) Engineering geological classification of weak rocks. In *Proceedings of the 10th International IAEG Congress,* Notingham: IAEG London. p. 492.

Oštrić, M., Sassa, K., Ljutić, K., Vivoda, M., He, B., Takara, K. (2014) Manual of transportable ring shear apparatus, ICL- 1. In *Proceedings of 1st Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region "Landslide and Flood Hazard Assessment"* , Zagreb, Croatia. pp. 1–4.

Pinho, A., Rodrigues-Carvalho, J., Gomes, C., Duarte, I. (2006) Overview of the evaluation of the state of rock weathering by visual inspection, IAEG 2006 Engineering Geology for Tomorrow's Cities, The Geological Society of London, p. 260.

Pinyol, N. P., Vaunat, J., Alonso, E. E. (2007) A constitutive model for soft clayey rocks that includes weathering effects. In *Stiff Sedimentary Clays*, pp. 193–207.

Polšak, A., Šikić, D. (1973) *Osnovna geološka karta SFRJ, tumač za list Rovinj*. Institut za geološka istraživanja – Zagreb.

Pope, G., Dorn, R. I., Dixon, J. C. (1995) A new conceptual model for understanding geographical variations in weathering. *Annals of the Association of American Geographers*, 85, pp. 38–64.

Rahardjo, H., Aung, K., Leong, E., Rezaur, R. . (2004) Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering. *Engineering Geology*, *73*(1-2), pp. 157–169.

Reiβmüller, M. (1997) *Geotechnische Eigenschaften verwitterter Kfssener Mergel*. Diploma Thesis, Technical University of Mqnich, Munich.

Rijekaprojekt (1979) Inženjerskogeološki izvještaj za klizište Krbavčići I i Krbavčići II kod Buzeta.

Rocha, M. (1975) Some problems related to the rock mechanics of low strength natural materials. In *Proceedings of the 5th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Buenos Aires. pp. 489–514.

Ruxton, B. P., Berry, L. (1957) Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong. *Bulletin of Geological Society of America*, 68, pp. 1263–1292.

Sancio, R. T., Brown, I. (1980) A classification of weathered foliated rocks for use in slope stability problems. In *Proceedings of the 3rd Australia – New Zealand Conference on Geomechanics,* Wellington, 2, pp. 2.81–2.86.

Sassa, K. (1984) The mechanism starting liquefied landslides and debris flows. In *Proceedings of 4th International Symposium on Landslides,* Toronto. pp. 349–354.

Sassa, K. (1988) Geotechnical model for the motion of landslides. In *Proceedings of 5th International Symposium on Landslides,* Balkema, Rotterdam. pp. 37–56.

Sassa, K., Dang, K., He, B., Takara, K., Inoue, K., Nagai, O. (2014) A new high-stress undrained ring-shear apparatus and its application to the 1792 Unzen–Mayuyama megaslide in Japan. *Landslides*, *11*(5), pp. 827–842.

Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, G., Ishikawa, N. (2004) Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics. *Landslides*, *1*(1), pp. 7–19.

Sassa, K., Nagai, O., Solidum, R., Yamazaki, Y., Ohta, H. (2010) An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide. *Landslides*, *7*, pp. 219–236.

Savage, S. B., Sayed, M. (1984) Stresses developed in dry cohesionless granular materials sheared in an annular shear cell. *Journal of Fluid Mechanics*, 142, pp. 391–430.

Selby, M. J. (1993) *Hillslope Materials and Processes*. Oxford University Press.

Shaqour, M. F., Jarrar, G., Hencher, S., Kuisi, M. (2008) Geotehnical and mineralogical characteristics of marl deposits in Jordan. *Environmental Geology*, *55*, pp. 1777–1783.

Skempton, A. . W., Hutchinson, J. N. (1969) Stability of natural slopes and embankment foundations. In *Proceedings of 7th Interantional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,* Mexico City. pp. 291–340.

Skempton, A. W. (1964) Long-Term Stability of Clay Slopes. *Géotechnique*, *14*(2), pp. 77–102.

Skempton, A. W. (1985) Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Géotechnique*, *35*(1), pp. 3–18.

Spencer, E. (1967) A Method of analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces. *Géotechnique*, *17*(1), pp. 11–26.

Studer, B. (1827) Remarques géognostiques sur quelques parties de la chaîne septentrionale des Alpes. *Annales Des Sciences Naturelles Paris*, *11*, pp. 1–47.

Terzaghi, K., Peck, R. (1967) *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons, Ltd.

Thorez, J. (1975) *Phyllosilicates and clay minerals – a laboratory handbook for their X-ray diffraction analysis*. G. Lelotte (Ed.). Liege.

Tika, T. M. (1989) *The effect of rate of shear on the residual strength of soil*. PhD Thesis, University of London (Imperial College of Science and Technology).

Tišljar, J. (2004) *Sedimentologija klastičnih i silicijskih taložina*. Institut za geološka istraživanja.

Toy, T. J., Foster, G. R., Renard, K. G. (2002) *Soil erosion processes, prediction, measurement, and control*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Tributh, H. (1989) Notwendigkeit und Vorteil der Aufbereitung von Boden- und Lagerstättentonen. In G. Tributh, H. i Lagaly (Ed.), *Identifizierung und Charakterisierung von Tonmineralen,* Giessen. pp. 29–33.

Tsiambaos, G. (1991) Correlation of mineralogy and index properties with residual strength of Iraklion marls. *Engineering Geology*, *30*, pp. 357–369.

Ugai, K. (1985) Three-dimensional stability analysis of vertical cohesive slopes. *Soils and Foundations*, *25*, pp. 41–48.

Ündül, O., Tuğrul, A. (2012) The Influence of Weathering on the Engineering Properties of Dunites. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *45*, pp. 225–239.

Utili, S. (2004) *Evolution of natural slopes subject to weathering: an analytical and numerical study*. Dissertation, Politecnico di Milano.

Vargas, M. (1953) Some engineering properties of residual clay soils occurring in southern Brazil. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,* Zurich, 1, pp. 259–268.

Varnes, D. J. (1958) Landslide types and processes. *Highway Research Board Special Report*, (29), pp. 20–47.

Varnes, D. J. (1975) Slope movements in the Western United States. *Mass Wasting*, pp. 1–17.

Varnes, D. J. (1978) Slope movement types and processes. *Special Report 176: Landslides: Analysis and Control*, pp. 11–33.

Varnes, D. J., IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements. (1984) Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. In P. UNESCO Press (Ed.), p. 63.

Velić, I., Tišljar, J., Matičec, D., Vlahović, I. (1995) Opći prikaz geološke građe Istre. In *Vodič ekskurzije 1.hrvatskog geološkog kongresa*. pp. 5–30.

Velić, I., Vlahović, I. (2009) *Geologic map of Republic of Croatia 1:300.000*. Croatian Geological Survey, Zagreb.

Vithana, S. B., Nakamura, S., Gibo, S., Yoshinaga, A., Kimura, S. (2012) Correlation of large displacement drained shear strength of landslide soils measured by direct shear and ring shear devices. *Landslides*, *9*(3), pp. 305–314.

Vivoda, M., Benac, Č., Žic, E., Đomlija, P., Dugonjić Jovančević, S. (2012). Geohazards in the Rječina valley in the past and present. *Croatian Waters: Journal for the Water Economy*, *20*(81), pp. 105–116.

Vivoda, M., Dugonjić Jovančević, S., Arbanas, Ž. (2014) Landslide Occurrence Prediction in the Rječina River Valley as a Base for an Early Warning System. In *Proceedings of 1st Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region "Landslide and Flood Hazard Assessment"*, pp. 85–90.

Vlastelica, G. (2015) *The Influence of Weathering on Durability of Cuts in Soft Rock Mass*. Dissertation, University of Split.

Walder, J. S., & Hallet, B. (1986) The Physical Basis of Frost Weathering: Toward a More Fundamental and Unified Perspective. *Arctic and Alpine Research*, *18*(1), pp. 27–32.

Ward, W. H., Burland, J. B.,Gallois, R. W. (1968). Geotechnical Assessment of a Site at Mundford, Norfolk, for a large Proton Accelerator. *Géotechnique*, *18*(4), pp. 399–431.

Whitting, L. D. (1965). X-ray diffraction techniques for mineral identification and mineralogical lidentification. In C. A. Black (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Madison, Wisconsin: Amer. Soc. Agron. pp. 671–698.

Wilson, M. J. (1987) *A handbook of determinative methods in clay mineralogy*. V. Blackie (Ed.). Glasgow and London.

Xing, Z. (1988) Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view. *Journal of Geotehnical Engineering*, *114*(6), pp. 658–671.

Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M. (2008). *Klimatski atlas Hrvatske 1961– 1990., 1971–2000*. Državni hidrometeorološki Zavod (Ed.). Zagreb.

Žufić, E. (2011) *Investigation of geotehnical properties of flysch rock mass in Istria area*. MS Thesis, University of Zagreb.

POPISI

POPIS SLIKA

Slika 1.1 *Shema istraživanja doktorskog rada 5*
Slika 2.1 *Geološka karta područja istraživanja (modificirano prema Velić & Vlahović 2009) 9*
Slika 2.2 *Poprečni geološki presjeci: a) Sjeverne Istre, b) Vinodolske doline i c) doline Rječine (modificirano prema Arbanas et al. 2006; Blašković 1999; Benac et al. 2010)..... 10*
Slika 2.3 *Snimke iz zraka kontakta vapnenaca i fliša u: a) sjevernoj Istri (fotografirao: A. Medica, 2015), b) dolini Rječine (fotografirao: Ž. Arbanas, 2012), c) Vinodolskoj dolini (fotografirao: D. Kalajžić, 2015) 11*
Slika 2.4 *Sukcesivna izmjena lapora, siltita i pješčenjaka u sjevernoj Istri na lokaciji: a) Brus, b) Krbavčići 12*
Slika 2.5 *Karta srednjih godišnjih količina oborina za područje istraživanja (Zaninović et al. 2008) 13*
Slika 2.6 *Godišnje količine oborina izmjerene na mjernim postajama Kozala, Marčelji i Hreljin (dolina Rječine), Abrami, Vodice, Lupoglav, Pazin, Lanišće, Momjan, Botonega, Cerovlje, Gologorica, Grdinići i Hum (srednja i sjeveroistočna Istra) te Novi Vinodolski, Crikvenica i Bribir (Vinodolska dolina), za razdoblje od 1961. do 2014. godine (prema podacima DHMZ-a) 15*
Slika 2.7 *Godišnje količine oborina na području istraživanja za razdoblje od 1961. do 2014. godine (prema podacima DHMZ-a) 16*
Slika 2.8 *Srednje mjesečne količine oborina izmjerene na mjernim postajama Kozala, Marčelji i Hreljin (dolina Rječine), Abrami, Vodice, Lupoglav, Pazin, Lanišće, Momjan, Botonega, Cerovlje, Gologorica, Grdinići i Hum (srednja i sjeveroistočna Istra) te Novi Vinodolski, Crikvenica i Bribir (Vinodolska dolina), za razdoblje od 1961. do 2014. godine (prema podacima DHMZ-a) 16*
Slika 2.9 *Srednje mjesečne količine oborina na području istraživanja za razdoblje od 1961. do 2014. godine (prema podacima DHMZ-a) 17*
Slika 2.10 *Godišnji hod minimalne, srednje i maksimalne temperature s mjernih postaja: a) Abrami i b) Botonega na području sjeverne i sjeveroistočne Istre, c) Kozala na području doline Rječine i d) Crikvenica na području Vinodolske doline, za mjerno razdoblje do 2014. godine (prema podacima DHMZ-a) 18*
Slika 2.11 *Karta horizontalnih vršnih ubrzanja temeljnog tla, a_{gR} (temeljno tlo tipa A) s vjerojatnosti premašaja 10 % u 10 godina za poredbeno povratno razdoblje T_{NCR}=95 god (Herak et al. 2011) 21*

Slika 3.1 *Rasprostranjenost flišnih facijesa (Marinčić 1981)* 23
Slika 3.2 *Shematski geološki stup profila Kotli u središnjoj Istri (prema Bergant et al. 2003; Tišljar 2004)* 24
Slika 3.3 *Shematski prikaz procesa transformacije unutar geoloških materijala (prema Dobereiner & Freitas 1986)* 28
Slika 3.4 *Klasifikacija stijena prema jednoosnoj tlačnoj čvrstoći, UCS (modificirano prema Galván 1999)* 29
Slika 3.5 *Dijagram sistematizacije egzogenih procesa (Gulam 2012)* 31
Slika 3.6 *Pogled na promjene uslijed trošenja flišne stijenske mase unutar kliznog tijela i na bočnom ožiljku u: a) kolovozu 2005. godine, b) siječnju 2013. godine* 32
Slika 3.7 *Shema glavnih procesa trošenja u muljnjacima (prema Chigira 1990)* 35
Slika 3.8 *Shematski prikaz profila trošnosti na području klizišta Rufi (Eberhardt et al. 2005)* 38
Slika 3.9 *Ovisnost između primarnih faktora koji utječu na eroziju (prema Morisawa 1968)* 39
Slika 3.10 *Klase erodibilnosti tla na području Republike Hrvatske (Husnjak et al. 2001)* 40
Slika 3.11 *Erozija flišnih naslaga: a) ogolina Brus u Istri, b) prekomjerna erozija u području sliva Slani Potok u Vindolskoj dolini* 41
Slika 3.12 *Klizišta i odroni na području istraživanja: a) translacijsko klizište Brus, b) tok zemljanog materijala Krbavčići, c) odron Marinci u sjeveroistočnoj Istri, d) klizište Grohovo, e) odron na Grohovskoj cesti, f) reaktivirano klizište iznad akumulacije Valići u dolini Rječine, g) klizište Draga u Draškoj dolini, h) klizište kraj Pomorske škole u Bakru u Bakarskom zaljevu, i) staro umireno klizište u Vinodolskoj dolini* 43
Slika 4.1 *Profil trošnosti na izdanku flišne stijenske mase u: a) Istri (Dugonjić Jovančević 2013), b) Vinodolskoj dolini* 48
Slika 4.2 *Određivanje stupnjeva trošnosti na osnovi: a) promjene boje i b) jednoosne tlačne čvrstoće dobivene iz pokusa Schmidtovim čekićem* 49
Slika 4.3 *Korelacijski dijagram odskoka Schmidtovog čekića i jednoosne tlačne čvrstoće (Deere & Miller 1966)* 50
Slika 4.4 *Karta s označenim lokacijama uzorkovanja sitnozrnastih litoloških članova fliša* 51
Slika 4.5 *Uzorkovanje sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti u Istri: a) na izdanku flišne stijenske mase blizu sela Cunj, b) na pokosu izgrađenom u flišnoj stijenskoj masu blizu sela Sovinjak* 52
Slika 4.6 *Uzorkovanje istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša različitih stupnjeva trošnosti s dna akumulacije Valići u dolini Rječine* 52

Slika 4.7 *Uzorkovanje sitnozrnastih litoloških članova fliša: a) I (FR) stupnja trošnosti iz jezgre bušotine i b) II (SW), c) III/IV (MW/HW), d) IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti na izdancima flišne stijenske mase u dolini Rječine* 53
Slika 4.8 *Uzorkovanje sitnozrnastih litoloških članova: a) II/I (SW/FR), b) IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti na izdanku flišne stijenske mase u Vinodolskoj dolini* 53
Slika 4.9 *Usitnjavanje uzoraka metodom Los Angeles* 55
Slika 4.10 *Priprema neporemećenih uzoraka: a) bušenje cilindričnih uzoraka iz nepravilnih intaktnih blokova flišne stijenske mase, b) raspadanje cilindričnog uzorka neposredno nakon bušenja* 56
Slika 4.11 *Određivanje fizičko mehaničkih značajki uzoraka: a) suho prosijavanje, b) areometriranje za određivanje granulometrijskog sastava i c) Casagrandeova zdjelica za određivanje granice tečenja* 58
Slika 4.12 *Uređaj za prstenasto smicanje ICL-1* 59
Slika 4.13 *Dijelovi uređaja za prstenasto smicanje, ICL-1: a) sustav za pripremu uzorka (a1) ćelija za deaeriranje vode, a2) ćelija za deaeriranje uzorka i vakuumska crpka), b) sustav za kontrolu i upravljanje, c) jedinica za ispitivanje uzorka, d) skica jedinice za ispitivanje uzorka* 60
Slika 4.14 *Uređaj za izravno smicanje, model 27-WF2160 (Controls)* 62
Slika 4.15 *Uređaj za ispitivanje čvrstoće u točki PLT metodom* 63
Slika 4.16 *Uređaj za određivanje postojanosti stijene (eng. Slake Durability Test, SDT)* .. 64
Slika 4.17 *Presjek uređaja za određivanje postojanosti stijene (prema ASTM 2004)* 65
Slika 4.18 *Grafičko određivanje $I_{s(50)}$ iz seta rezultata (D_e, P) pri ispitivanju PLT sitnozrnastih litoloških članova fliša I (FR) stupnja trošnosti iz Istre* 75
Slika 4.19 *Grafičko određivanje $I_{s(50)}$ iz seta rezultata (D_e, P) pri ispitivanju PLT sitnozrnastih litoloških članova fliša III (MW) stupnja trošnosti iz Istre* 76
Slika 4.20 *Granulometrijska krivulja sitnozrnastih litoloških članova fliša I (FR), III (MW) i V (CW) stupnja trošnosti uzorkovanih na izdanku flišne stijenske mase u Istri* 79
Slika 4.21 *Granloumetrijska krivulja istaloženih naslaga podrijetlom iz flišne stijenske mase II/I (SW/FR) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti uzorkovanih na dnu akumulacije Valići u doline Rječine* 79
Slika 4.22 *Granuloumetrijska krivulja sitnozrnastih litoloških članova fliša I (FR), II (SW), III/IV (MW/HW) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti uzorkovanih na izdancima flišne stijenske mase u dolini Rječine* 80
Slika 4.23 *Granuloumetrijska krivulja sitnozrnastih litoloških članova fliša II/I (SW/FR) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti uzorkovanih na izdanku flišne stijenske mase u Vinodolskoj dolini* 80

Slika 4.24 *Dijagram plastičnosti sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti s područja istraživanja 81*
Slika 4.25 *Dijagram promjene posmičnog naprezanja, normalnog naprezanja, brzine smicanja i pornog pritiska u vremenu pri ispitivanju propuštanja vode (eng. water leakage test)..... 83*
Slika 4.26 *Dijagram posmično naprezanje - posmična deformacija pri ispitivanju trenja brtve pri ukupnom normalnom naprezanju od 200, 400 i 800 kPa 84*
Slika 4.27 *a) Dijagram promjene posmičnog naprezanja, ukupnog normalnog naprezanja, pornog pritiska i posmične deformacije u vremenu na uzorku sitnozrnastog litološkog člana fliša I(FR) stupnja trošnosti s flišnog izdanka u Istri tijekom ispitivanja u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu pornih pritisaka, pri inicijalnom naprezanju (375, 137) kPa, b) Isječak prethodnog dijagrama od početka smicanja do kraja ispitivanja..... 85*
Slika 4.28 *a) Dijagram promjene posmičnog naprezanja, ukupnog normalnog naprezanja, pornog pritiska i posmične deformacije u vremenu na uzorku sitnozrnastog litološkog člana fliša III (MW) stupnja trošnosti s flišnog izdanka u Istri tijekom ispitivanja u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu pornih pritisaka, pri inicijalnom naprezanju (280, 100) kPa, b) Isječak prethodnog dijagrama od početka smicanja do kraja ispitivanja..... 86*
Slika 4.29 *a) Dijagram promjene posmičnog naprezanja, ukupnog normalnog naprezanja, pornog pritiska i posmične deformacije u vremenu na uzorku sitnozrnastog litološkog člana fliša V (CW) stupnja trošnosti s flišnog izdanka u Istri tijekom ispitivanja u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu pornih pritisaka, pri inicijalnom naprezanju (190, 70) kPa, b) isječak prethodnog dijagrama od početka smicanja do kraja ispitivanja 87*
Slika 4.30 *Efektivni (ESP) i ukupni (TSP) tragovi naprezanja uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša I (FR), III (MW) i V (CW) stupnjeva trošnosti s flišnog izdanka u Istri pri ispitivanju u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu pornih pritisaka..... 87*
Slika 4.31 *Pravci čvrstoće uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša I (FR), III (MW) i V (CW) stupnjeva trošnosti s flišnog izdanka u Istri dobivenih ispitivanjem u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu pornih pritisaka 88*
Slika 4.32 *Dijagram posmično naprezanje - posmična deformacija (logaritamsko mjerilo) za uzorke istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša: a) II/I (SW/FR), b) IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti s dna akumulacije Valići u doline Rječine ispitivanjem u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu brzine smicanja..... 89*
Slika 4.33 *Tragovi ukupnih i efektivnih naprezanja pri ispitivanju u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu brzine smicanja na uzorcima istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša: a) II/I (SW/FR) i b) IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti s dna akumulacije Valići u dolini Rječine..... 90*

Slika 4.34 *Rezidualni pravci čvrstoće istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša II/I (SW/FR) i IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti uzorkovanih na dnu akumulacije Valići u doline Rječine pri ispitivanju u uređaju za prstenasto smicanje uz kontrolu brzine smicanja 91*
Slika 4.35 *Dijagram odnosa posmično naprezanje - posmična deformacija uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša: a) I (FR), b) III (MW) i c) V (CW) stupnjeva trošnosti s flišnog izdanka u Istri, za dva ciklusa ispitivanja u uređaju za izravno smicanje..... 93*
Slika 4.36 *Pravci rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na flišnom izdanku u Istri: a) nakon prvog ciklusa smicanja, b) nakon drugog ciklusa smicanja u uređaju za izravno smicanje..... 94*
Slika 4.37 *Dijagram odnosa posmično naprezanje - posmična deformacija uzoraka istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša različitih stupnjeva trošnosti s dna akumulacije Valići u doline Rječine pri ispitivanju u uređaju za izravno smicanje 95*
Slika 4.38 *Pravci rezidualne posmične čvrstoće istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na dnu akumulacije Valići u doline Rječine pri ispitivanju u uređaju za izravno smicanje..... 95*
Slika 4.39 *Dijagram odnosa posmično naprezanje - posmična deformacija uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša: a) I (FR), b) II (SW), c) III/IV (MW/HW) i d) IV/V (HW/CW) stupnjeva trošnosti iz bušotine i izdanaka flišne stijenske mase u dolini Rječine pri ispitivanju u uređaju za izravno smicanje..... 96*
Slika 4.40 *Pravci rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih u bušotini i na izdancima flišne stijenske mase u dolini Rječine pri ispitivanju u uređaju za izravno smicanje..... 97*
Slika 4.41 *Dijagram odnosa posmično naprezanje - posmična deformacija uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša: a) II/I (SW/FR) i b) IV/V (HW/CW) stupanj trošnosti s flišnog izdanka Vinodolskoj dolini, za dva ciklusa ispitivanja u uređaju za izravno smicanje 98*
Slika 4.42 *Pravci rezidualne posmične čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na izdancima flišne stijenske mase u Vinodolskoj dolini: a) nakon prvog ciklusa smicanja, b) nakon drugog ciklusa smicanja u uređaju za izravno smicanje..... 99*
Slika 4.43 *Ploha smicanja u uređaju za: a) prstenasto smicanje, b) izravno smicanje 101*
Slika 4.44 *Fotografije uvećanja elektronskim mikroskopom uzorka trošne flišne stijenske mase: a) u izvornom stanju, b) nakon laboratorijskog usitnjavanja, s mrežom na razmaku od 0,1 mm..... 102*
Slika 4.45 *Fotografije uvećanja uzorka trošne flišne stijenske mase elektronskim mikroskopom s mrežom na različitom razmaku: a), b) na gornjoj kontaktnoj plohi između uzorka i poroznog metala; c), d) na plohi smicanja u uređaju za izravno smicanje 102*

Slika 4.46 *Uzorak flišne stijenske mase: a) I (FR), b) II (SW), c) III (MW) i d) V (CW) stupnja trošnosti iz Istre u početnom stanju (lijevo) i nakon deset ciklusa sušenja i vlaženja (desno)* 104
Slika 4.47 *Granuloumetrijska krivulja kroz deset ciklusa sušenja i vlaženja za uzorak flišne stijenske mase: a) I (FR), b) II (SW), c) III (MW) i d) V (CW) stupnja trošnosti iz Istre*..... 105
Slika 4.48 *Granulometrijska krivulja nakon drugog, petog i desetog ciklusa sušenja i vlaženja za uzorak flišne stijenske mase: a) I (FR), b) II (SW), c) III (MW) i d) V (CW) stupnja trošnosti iz Istre* 105
Slika 4.49 *Dijagram indeksa postojanosti, I_d i broja ciklusa sušenja vlaženja, Nr za uzorak flišne stijenske mase I (FR) i II (SW) stupnja trošnosti iz Istre dobivenih oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja (DWT)* 106
Slika 4.50 *Odnos između broja ponavljanja ciklusa sušenja i vlaženja, Nr, i: a) indeksa raspadanja, D_R, b) modificiranog indeksa raspadanja, D_{RP}, dobivenih oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja (DWT)*.....107
Slika 4.51 *Uzorak flišne stijenske mase u početnom stanu (lijevo), nakon drugog ciklusa (sredina) i nakon petog ciklusa (desno) ispitivanja postojanosti (SDT): a) I (FR) stupnja trošnosti (3), b) III (MW) stupnja trošnosti (4), c) I (FR) stupnja trošnosti (1), d) III (MW) stupnja trošnosti (2)* 108
Slika 4.52 *Primjer trošenja uzorka flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti (1) tijekom ispitivanja postojanosti (SDT), Id_2=88,31 %*..... 109
Slika 4.53 *Odlomci različitih veličina preostali u bubnju nakon petog ciklusa ispitivanja postojanosti (SDT) na uzorku flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti (1)*..... 109
Slika 4.54 *Granuloumetrijska krivulja zadržane mase uzorka na situ kroz pet ciklusa ispitivanja postojanosti (SDT) za uzorak: a) (3), b) (4), c) (1), d) (2)*.....110
Slika 4.55 *Granuloumetrijska krivulja prolaska mase uzorka na situ kroz pet ciklusa ispitivanja postojanosti (SDT) za uzorak: a) (3), b) (4), c) (1), d) (2)*..... 111
Slika 4.56 *Odnos između indeksa postojanosti, I_d, i broja ponavljanja ciklusa, Nr, dobivenih ispitivanjem postojanosti dinamičkim uređajem (SDT) i oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja (DWT) te od strane drugih autora* 113
Slika 4.57 *Odnos između broja ponavljanja ciklusa, Nr i: a) indeksa raspadanja, D_R, b) modificiranog indeksa raspadanja, D_{RP}, dobivenih ispitivanjem postojanosti dinamičkim uređajem (SDT)* 114
Slika 4.58 *Korelacijske krivulje između broja ponavljanja ciklusa, Nr, i modificiranog indeksa raspadanja, D_{RP}, dobivenih ispitivanjem postojanosti dinamičkim uređajem (SDT) i oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja (DWT)* 115
Slika 4.59 *Dio difrakcijskih slika neorijentiranih uzoraka flišne stijenske mase: a) I (FR), b) III (MW), c) V (CW) stupnja trošnosti i d) rezidualnog tla (RS) iz Istre*.....116

Slika 4.60 *a) Mineralni sastav i b) minerali glina u uzorcima flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz Istre* 117
Slika 4.61 *Difrakcijska slika neorijentirane frakcije čestica < 2 μm uzorka flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti iz Istre* 118
Slika 4.62 *Difrakcijska slika neorijentirane frakcije čestica < 2 μm uzorka flišne stijenske mase III (MW) stupnja trošnosti iz Istre* 119
Slika 4.63 *Difrakcijska slika neorijentirane frakcije čestica < 2 μm uzorka flišne stijenske mase V (CW) stupnja trošnosti iz Istre* 119
Slika 4.64 *Difrakcijska slika neorijentirane frakcije čestica < 2 μm uzorka rezidualnog tla iz Istre* 120
Slika 4.65 *Difrakcijske slike neorijentiranih frakcija čestica < 2 μm uzorka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz Istre u području niskih kuteva °2θ (područje razlikovanja pojedinih minerala glina)* 120
Slika 4.66 *Difrakcijske slike neorijentiranih frakcija čestica < 2 μm uzoraka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz Istre u području visokih kuteva °2θ, tj. oko 60°2θ (područje za određivanje karaktera oktaedrijske mreže filosilikata pomoću 060 refleksa minerala glina)* 121
Slika 4.67 *Difrakcijske slike orijentirane frakcije < 2 μm uzorka flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti iz Istre nakon pojedinih tretmana* 122
Slika 4.68 *Difrakcijske slike orijentirane frakcije < 2 μm uzorka flišne stijenske mase III (MW) stupnja trošnosti iz Istre nakon pojedinih tretmana* 123
Slika 4.69 *Difrakcijske slike orijentirane frakcije < 2 μm uzorka flišne stijenske mase V (CW) stupnja trošnosti iz Istre nakon pojedinih tretmana* 124
Slika 4.70 *Difrakcijske slike orijentirane frakcije < 2 μm uzorka rezidualnog tla iz Istre nakon pojedinih tretmana* 125
Slika 4.71 *Difrakcijska slika originalnog uzorka flišne stijenske mase I (FR) stupnja trošnosti iz doline Rječine* 126
Slika 4.72 *Difrakcijska slika originalnog uzorka flišne stijenske mase II (SW) stupnja trošnosti iz doline Rječine* 126
Slika 4.73 *Difrakcijska slika originalnog uzorka flišne stijenske mase III/IV (MW/HW) stupnja trošnosti iz doline Rječine* 127
Slika 4.74 *Difrakcijska slika originalnog uzorka flišne stijenske mase V (CW) stupnja trošnosti iz doline Rječine* 127
Slika 4.75 *Dio difrakcijskih slika neorijentiranih uzoraka flišne stijenske mase: a) I (FR), b) II (SW), c) III/IV (MW/HW), d) V (CW) stupnja trošnosti iz doline Rječine* 128

Slika 4.76 *Difrakcijske slike orijentirane frakcije < 2 μm uzoraka flišne stijenske mase: a) I (FR), b) II (SW), c) III/IV (MW/HW), d) V (CW) stupnja trošnosti iz doline Rječine nakon pojedinih tretmana* 129
Slika 4.77 *a) Mineralni sastav i b) minerali glina u uzorcima flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz doline Rječine* 130
Slika 4.78 *Difrakcijske slike neorijentiranih frakcija čestica < 2 μm uzorka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz doline Rječine u području niskih kuteva °2θ (područje razlikovanja pojedinih minerala glina)* 131
Slika 4.79 *Mineralni sastav uzoraka flišne stijenske mase s: a) klizišta Krbavčići u sjevernoj Istri (Arbanas et al. 2006), b) klizišta Grohovo u dolini Rječine (Benac et al. 2014), c) sliva Mala Dubračina u Vinodolskoj dolini (Jurak 1980), d) sliva Slani Potok u Vindolskoj dolini (Jurak et al. 2005)* 132
Slika 5.1 *Osnovni princip programskog paketa LS-Rapid: a) vertikalni stupac unutar klizne mase; b) djelovanje sila na vertikalni stupac (prema Sassa et al. 2010)* 137
Slika 5.2 *Prividni koeficijent trenja (f_a), posmični otpor u stanju dinamičke ravnoteže (t_{ss}) i koeficijent trenja tijekom kretanja (f_m) (prema Sassa et al. 2010)* 138
Slika 5.3 *Model redukcije posmične čvrstoće s povećanjem posmične deformacije (prema Sassa et al. 2010)* 138
Slika 5.4 *Ortofoto karta klizišta Krbavčići II snimljena 2016. godine kombinacijom fotosnimanja iz zraka i terestričkog laserskog skeniranja, s naznačenom granicom klizišta i pozicijama bušotinama izvedenih 1979. godine* 141
Slika 5.5 *Inženjerskogeološki profil terena kroz tijelo klizišta Krbavčići II (prema Rijekaprojekt 1979)* 142
Slika 5.6 *Geodetski snimak područja klizišta Valići i isušenog korita rijeke Rječine* 143
Slika 5.7 *Inženjerskogeološki profil terena kroz tijelo klizišta Valići u dolini Rječine (Arbanas et al. 2015)* 144
Slika 5.8 *Digitalni model terena za područje istraživanja klizišta Krbavčići II u Istri u programu LS-Rapid: a) 3D prikaz, b) 2D prikaz, sa slojnicama na razmaku 1 m* 145
Slika 5.9 *Klizna ploha za područje istraživanja klizišta Krbavčići II u Istri u programu LS-Rapid: a) digitalni model površine klizne plohe, b) debljina kliznog tijela* 146
Slika 5.10 *Rezultati 3D numeričkog modela klizišta Krbavčići II u Istri u flišnoj stijenskoj I (FR) stupnja trošnosti, pri r_u=0,6, nakon prestanku kretanja klizne mase* 149
Slika 5.11 *Rezultati 3D numeričkog modela klizišta Krbavčići II u Istri u flišnoj stijenskoj III (MW) stupnja trošnosti, pri r_u=0,6, nakon prestanku kretanja klizne mase* 149
Slika 5.12 *Rezultati 3D numeričkog modela klizišta Krbavčići II u Istri u flišnoj stijenskoj V (CW) stupnja trošnosti, pri r_u=0,6, nakon prestanku kretanja klizne mase* 150

Slika 5.13 *Rezultati 2D analiza stabilnosti klizišta Krbavčići II u Istri pri r_u=0,6 u materijalima: a) I (FR), b) III(MW), c) V(CW) stupnja trošnosti flišne stijenske mase.....152*
Slika 5.14 *Digitalni model terena za područje klizišta Valići u dolini Rječine u programu LS-Rapid: a) 3D prikaz, b) 2D prikaz, sa slojnicama na razmaku 2 m 153*
Slika 5.15 *Model u Rocscience Phase²: a) model s mrežom konačnih elemenata u homogenom materijalu, b) položaj klizne plohe dobivene metodom redukcije čvrstoće (Arbanas et al. 2015) 154*
Slika 5.16 *Klizna ploha za područje istraživanja klizišta Valići u dolini Rječine u programu LS-Rapid: a) digitalni model površine klizne plohe, b) debljina kliznog tijela.....155*
Slika 5.17 *Rezultati 3D numeričkog modela klizišta Valići u dolini Rječine u flišnoj stijenskoj masi II/I (SW/FR) stupnja trošnosti: a) model površine terena sa slojnicama na razmaku od 2 m, b) debljina kliznog tijela na kraju klizanja, pri r_u=0,6 .....157*
Slika 5.18 *Rezultati numeričkog modela klizišta Valići u dolini Rječine u flišnoj stijenskoj masi II/I (SW/FR) stupnja trošnosti: a) 3D model površine terena klizne mase i položaj uzdužnog i poprečnog presjeka, b) uzdužni i c) poprečni presjek kroz kliznu masu na kraju klizanja, pri r_u=0,6 ..... 158*
Slika 5.19 *Rezultati 3D numeričkog modela klizišta Valići u dolini Rječine u flišnoj stijenskoj masi IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti: a) model površine terena sa slojnicama na razmaku od 2 m, b)debljina kliznog tijela na kraju klizanja, pri r_u=06 .....159*
Slika 5.20 *Rezultati numeričkog modela klizišta Valići u dolini Rječine u flišnoj stijenskoj masi IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti: a) 3D model površine terena klizne mase na kraju klizanja, pri r_u=0,6 i položaj uzdužnog i poprečnog presjeka.....159*
Slika 5.20 *Rezultati numeričkog modela klizišta Valići u dolini Rječine u flišnoj stijenskoj masi IV/V (HW/CW) stupnja trošnosti: b) uzdužni i c) poprečni presjek kroz kliznu masu na kraju klizanja, pri r_u=0,6..... 160*

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 *Popis mjernih stanica, vrijednosti srednjih godišnjih količina oborina (eng. Mean Annual Precipitation, MAP) i mjernih razdoblja (prema podacima DHMZ-a)*.....14
Tablica 2.2 *Podaci o srednjim mjesečnim količinama oborina (mm) za mjerne postaje na području istraživanja za razdoblje od 1961. do 2014. godine (prema podacima DHMZ-a)*..17
Tablica 2.3 *Popis mjernih stanica sa srednjim godišnjim temperaturama (eng. Mean Annual Temperature, MAT) prema podacima DHMZ-a* 18
Tablica 3.1 *Sitnozrnasti klastični sedimenti (peliti) (Tišljar 2004)*..... 25
Tablica 3.2 *Vrste mekih stijena (Kanji 2014)* 27
Tablica 3.3 *Stupnjevi trošnosti stijenske mase (Brown 1981)* 37
Tablica 4.1 *Terenska procjena jednoosne tlačne čvrstoće intaktne stijene (Marinos & Hoek 2001)* 44
Tablica 4.2 *Popis uzoraka sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase na području istraživanja* 54
Tablica 4.3 *Klasifikacija postojanosti intaktne stijene (Gamble 1971; Erguler & Shakoor 2009)*..... 66
Tablica 4.4 *CEC za različite minerale glina (Grim 1953)* 68
Tablica 4.5 *Kriteriji identifikacije minerala glina prema veličini međumrežnog razmaka refleksa 001 (u angstremima = Å) (Mileusnić 2007)*.....71
Tablica 4.6 *Terenska (in situ) odskočna vrijednost Schmidtovog čekića sitnozrnastih litoloških članova flišne stijenske mase iz Istre različitih stupnjeva trošnosti* 74
Tablica 4.7 *Čvrstoća sitnozrnastih litoloških članova fliša I (FR) stupnja trošnosti iz Istre dobivena ispitivanjem PLT*..... 75
Tablica 4.8 *Čvrstoća sitnozrnastih litoloških članova fliša III (MW) stupnja trošnosti iz Istre dobivena ispitivanjem PLT* 76
Tablica 4.9 *Opisi, karakteristike i raspon jednoosne tlačne čvrstoće za sitnozrnaste litološke članove fliša različitih stupnjeva trošnosti iz Istre* 77
Tablica 4.10 *Geotehničke značajke uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na izdanku flišne stijenske mase u Istri* 81
Tablica 4.11 *Geotehničke značajke uzoraka istaloženih naslaga podrijetlom iz fliša različitih stupnjeva trošnosti s dna akumulacije Valići u doline Rječine* 82
Tablica 4.12 *Geotehničke značajke uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na izdancima flišne stijenske mase u dolini Rječine*..... 82
Tablica 4.13 *Geotehničke značajke uzoraka sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na izdanku flišne stijenske mase u Vinodolskoj dolini*..... 82

Tablica 4.14 *Rezidualni parametri čvrstoće sitnozrnastih litoloških članova fliša različitih stupnjeva trošnosti uzorkovanih na području istraživanja* *100*
Tablica 4.15 *Uvjeti ispitivanja postojanosti laboratorijskim oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja (eng. Drying Wetting Test, DWT)* *104*
Tablica 4.16 *Rezultati ispitivanja postojanosti laboratorijskim oponašanjem trošenja procesima sušenja i vlaženja (DWT)* *106*
Tablica 4.17 *Rezultati ispitivanja postojanosti dinamičkim uređajem za ispitivanje postojanosti (SDT)* *111*
Tablica 4.18 *Odnos modificiranog indeksa postojanosti, D_{RP}, s brojem ciklusa potrebnih da se postigne 50% maksimalnog mogućeg raspadanja uzorka* *114*
Tablica 4.19 *Udio minerala u uzorcima flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz Istre* *117*
Tablica 4.20 *Kapacitet kationske zamjene uzoraka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz Istre* *118*
Tablica 4.21 *Udio minerala u uzorcima flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz doline Rječine* *130*
Tablica 4.22 *Kapacitet kationske zamjene uzoraka flišne stijenske mase različitih stupnjeva trošnosti iz doline Rječine* *131*
Tablica 5.1 *Vrijednosti parametara za numerički model klizišta Krbavčići II u Istri* *147*
Tablica 5.2 *Vrijednosti parametara za model klizišta Krbavčići II u flišnoj stijenskoj masi različitih stupnjeva trošnosti* *148*
Tablica 5.3 *Vrijednosti parametara za numerički model klizišta Valići u dolini Rječine* *156*
Tablica 5.4 *Vrijednosti parametara za model klizišta Valići u dolini Rječine u flišnoj stijenskoj masi različitih stupnjeva trošnosti* *156*

ŽIVOTOPIS AUTORA

Martina Vivoda Prodan rođena je 05. veljače 1984. godine u Kopru, Slovenija. Osnovnu školu završila je u Roču, a nakon toga Opću gimnaziju u Pazinu. Građevinski fakultet u Rijeci upisuje 2002. godine. Tijekom studija održava demonstrature iz kolegija Građevinska statika i Hidromehanika. Diplomu inženjera građevinarstva stječe u travnju 2007. godine obranom diplomskog rada „Sanacija klizišta uz Pomorsku školu u Bakru„ izrađenog pod mentorstvom prof.dr.sc. Željka Arbanasa U lipnju 2007. godine zapošljava se u Institutu građevinarstva Hrvatske u Poslovnom centru Rijeka u Geotehničkom odjelu te radi kao suradnik na geotehničkim projektima. 2009. godine sudjeluje u dvotjednoj LARAM školi u Salernu, Italija i iste godine upisuje poslijediplomski doktorski studij na Građevinskom fakultetu u Rijeci. 2010. godine održava vježbe iz Dinamike tla kao vanjski suradnik na spomenutoj ustanovi gdje se u listopadu iste godine zapošljava kao znanstveni novak u sklopu japansko-hrvatskog projekta „Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia“. 2012. godine boravi dva mjeseca na Sveučilištu u Kyotu, Japan gdje sudjeluje u usavršavanju na novom uređaju za prstenasto smicanje pod mentorstvom prof.dr.sc. Kyoji Sasse. Održava nastavu na Katedri za geotehniku iz kolegija Mehanika tla i stijena, Geotehničko inženjerstvo, Geotehničke konstrukcije, Stabilnost kosina, Teorijska mehanika tla, Ispitivanje i opažanje u geotehnici. Član je hrvatsko-slovenskog bilateralnog projekta „Laboratorijska ispitivanja i numeričko modeliranje ponašanja klizišta u flišu Hrvatske i Slovenije“ i projekta Sveučilišta u Rijeci "Razvoj sustava monitoringa klizišta i ranog upozoravanja za potrebe umanjenja hazarda od klizanja tla" i IPL-184 projekta „Study of landslides in flysch deposits of North Istria, Croatia: sliding mechanisms, geotechnical properties, landslide modeling and landslide susceptibility“. Od 2007. godine član je Hrvatskog geotehničkog društva. Aktivno je sudjelovala na brojnim domaćim i međunarodnim znanstvenim skupovima:

- 17. European Young Geotehnical Engineers' Conference EYGEC, Zagreb, Hrvatska, 20. - 22. srpnja 2006.
- 5. savjetovanje Slovenskog geotehničkog društva, Nova Gorica, Slovenija, 12. - 14. lipnja 2008. (rad)
- LARAM Workshop, Ravello, Italija, 10. -11. rujna 2008.

- 4. Internatonal Young Geotehnical Engineers Conference IYGEC, Alexandrija, Egipat, 02. – 06. listopada 2009. (rad i prezentacija)
- 17. International Conference on Soil Mechanics and Geotehnical Engineering, Alexandrija, Egipat, 05. – 09. listopada 2009.
- Geobrugg SLOPE Workshop 2010, Zagreb, Hrvatska, 19. - 20. siječnja 2010.
- 1. radionica hrvatsko-japanskog bilateralnog projekta Risk Identification and Land Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods, "International Experience", Dubrovnik, Hrvatska, 22. -24. studenog 2010. (rad)
- Dani podzemne gradnje 2011, Zagreb, Hrvatska, 6. – 7. srpnja 2011.
- 2. World Landslide Forum, Rim, Italija, 03. -09. listopad 2011. (rad i poster)
- 2. radionica hrvatsko-japanskog bilateralnog projekta Risk Identification and Land Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods, "Monitoring and analyses for disaster mitigation of landslides, debris flow and floods", Rijeka, Hrvatska, 15. -16. studenog 2011. (radovi i prezentacija)
- 3. radionica hrvatsko-japanskog bilateralnog projekta Risk Identification and Land Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods i Prvi regionalni simpozij o klizištima u Jadransko-Balkanskoj regiji „Landslide and Flood Hazard Assessment", Zagreb, Hrvatska, 07.-09. ožujka 2013. (radovi, prezentacija i poster)
- 6. konferencija Hrvatskog geotehničkog društva "Sanacija, tehničko praćenje i održavanje u geotehnici", Zadar, 17. – 19. listopada 2013. (rad i poster)
- 4. radionica hrvatsko-japanskog bilateralnog projekta Risk Identification and Land Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods, Split, Hrvatska, 12. -14. prosinca 2013. (radovi i prezentacija)
- European Rock Mechanics Symposium Eurock, Eurock 2014 "Rock mechanics and Rock Engineering: Structures on and in rock masses", Vigo, Španjolska, 27.-29. svibnja 2014. (rad i poster)
- 2. skup mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti „Zajednički temelji", Rijeka, Hrvatska, 24. – 26. rujna 2014. (sažetak i prezentacija)
- 2. regionalni simpozij o klizištima u Jadransko-Balkanskoj regiji, Beograd, Srbija, 14. – 16. svibnja 2015. (radovi i poster)
- 16. Šukljetovi dani, Ljubljana, Slovenija, 23. listopada 2015.

Dana 5. studenog 2015. godine održala je pozvano predavanje na Fakultetu za gradbeništvo in geodezijo Sveučilišta u Ljubljani s naslovom „Preliminary investigations and numerical analysis of a landslide reactivation in the Rječina River Valley, Croatia“.

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

Izvorni znanstveni rad u CC časopisima:

Vivoda Prodan M., Mileusnić M., Mihalić Arbanas S., Arbanas Ž. (2016) Influence of weathering processes on the shear strength of siltstones from a flysch rock mass along the northern Adriatic coast of Croatia, Bulletin of engineering geology and the environment, pp 1-17, doi: 10.1007/s10064-016-0881-7 (First on-line: 15. travnja 2016.)

Vivoda Prodan M., Arbanas Ž. (2016) Weathering influence on properties of siltstones from Istria, Croatia, Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2016, Article ID 3073202, 1-15, doi:10.1155/2016/3073202

Znanstveni radovi u drugim časopisima:

Vivoda, M., Šverko, I., Arbanas, Ž. (2014) Određivanje značajki prašinastih materijala iz naslaga fliša, Zbornik radova Sveučilišta u Rijeci, Knjiga XVII (2014), pp. 9-25

Vivoda, M., Benac, Č., Žic, E., Đomlija, P., Dugonjić Jovančević, S. (2012) Geohazard u dolini Rječine u prošlosti i sadašnjosti, Croatian waters: journal for the water economy, 20 (2012), 81, pp. 105-116

Benac Č., Dugonjić S., Vivoda M., Oštrić M., Arbanas, Ž. (2011) A complex landslide in the Rječina Valley: results of monitoring 1998-2010., Geologia Croatica: journal of the Croatian Geological Survey and the Croatian Geological Society, 64 (2011), 3, pp. 239-249, doi: 10.4154/GC.2011.20

Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom:

Arbanas, Ž., Vivoda, M., Kursar, P. (2014) Pit excavation for underground construction in an urban area near an old tunnel, Proceedings of Eurock 2014, Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses, Vigo, Spain, 27-29 May 2014, pp. 1105-1110

Arbanas, Ž., Dugonjić Jovančević, S.; Vivoda, M.; Mihalić Arbanas, S. (2014) Study of landslides in flysch deposits of North Istria, Croatia, 3rd World Landslide Forum: Landslide Science for a Safer Geoenvironment, Volume 1: The International Programme on Landslides (IPL), Beijing, China, 2-6 June 2014, pp. 89-94

Arbanas, Ž., Mihalić Arbanas, S., Vivoda, M., Martinović, K., Bernat, S. (2014) Landslide Knowledge Exchange Through the Regional Cooperation in the Adriatic-Balkan Region, 3rd World Landslide Forum: Landslide Science for a Safer Geoenvironment, Volume 1: The International Programme on Landslides (IPL), Beijing, China, 2-6 June 2014, pp. 199-208

Arbanas, Ž., Sassa, K., Nagai, O., Jagodnik, V., Vivoda, M., Dugonjić Jovančević, S., Peranić, J., Ljutić, K. (2014) A landslide monitoring and early warning system using integration of GPS, TPS and conventional geotechnical monitoring methods, 3rd World Landslide Forum: Landslide Science for a Safer Geoenvironment, Volume 2: Methods of Landslide Studies, Beijing, China, 2-6 June 2014, pp. 631-636

Benac, Č., Dugonjić Jovančević, S., Ružić, I., Vivoda, M.,; Peranić, J. (2014) Marine erosion and slope movements: SE coast of the Krk Island, 3rd World Landslide Forum: Landslide Science for a Safer Geoenvironment, Volume 3: Targeted Landslides, Beijing, China, 2-6 June 2014, pp. 563-567

Dugonjić Jovančević, S., Vivoda, M., Arbanas, Ž. (2014) Landslide susceptibility assessment on slopes in flysch deposits: A deterministic approach, Proceedings of XII IAEG Congress, Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2, Torino, Italy, 15-19 September 2014, pp. 1615-1618

Arbanas, Ž., Jagodnik, V., Ljutić, K.; Vivoda, M.; Dugonjić Jovančević, S., Peranić, J. (2014) Remote monitoring of a landslide using an integration of GPS, TPS and conventional geotechnical monitoring methods, Proceedings of 1st Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region "Landslide and Flood Hazard Assessment", Zagreb, Croatia, 6-9 March 2013, pp. 39-44

Benac, Č., Vivoda, M., Đomlija, P., Buljan, R., Navratil, D. (2014) The instability phenomena along the coasts of the Kvarner area (NE Adriatic Sea), Proceedings of 1st Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region "Landslide and Flood Hazard Assessment", Zagreb, Croatia, 6-9 March 2013, pp. 213-217

Ljutić, K., Jagodnik, V., Vivoda, M., Dugonjić Jovančević, S., Arbanas, Ž. (2014) The Grohovo Landslide Monitoring System - Experiences from 18 months period of monitoring system operating, Proceedings of 1st Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region "Landslide and Flood Hazard Assessment", Zagreb, Croatia, 6-9 March 2013, pp. 45-50

Oštrić, M., Sassa, K., Ljutić, K., Vivoda, M., He, B., Takara, K. (2014) Manual of transportable ring shear apparatus, ICL- 1, Proceedings of 1st Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region "Landslide and Flood Hazard Assessment", Zagreb, Croatia, 6-9 March 2013, pp. 1-4

Vivoda, M., Dugonjić Jovančević, S., Arbanas, Ž. (2014) Landslide Occurrence Prediction in the Rječina River Valley as a Base for an Early Warning System, Proceedings of 1st Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region "Landslide and Flood Hazard Assessment", Zagreb, Croatia, 6-9 March 2013, pp. 85-90

Žic, E., Vivoda, M., Benac, Č. (2014) Uzroci i posljedice regulacije toka Rječine, Proceedings of 5th International conference on industrial heritage thematically related to Rijeka and the industrial building heritage - architecture and civil engineering heritage, Rijeka, Croatia, 25-26 May 2014, pp. 771-797

Arbanas, Ž., Galijašević, V., Đomlija, P., Vivoda, M. (2013) Remedial Works on the Smrečje Landslide, Croatia, 2nd World landslide forum: Landslide Science and Practice, Rome, Italy, 3–9 October 2011, pp. 295-300

Arbanas Ž., Dugonjić S., Ljutić K., Vivoda M., Jagodnik V. (2012) Initial results of the Grohovo Landslide monitoring, Book of Proceedings of 2nd Japanese-Croatian Project Workshop, Monitoring and analyses for disaster mitigation of landslides, debris flow and floods, Rijeka, Croatia, 15-17 December 2011, pp. 33-36

Arbanas Ž., Jagodnik V., Ljutić K., Dugonjić S., Vivoda M. (2012) Establishment of the Grohovo Landslide monitoring system, Book of Proceedings of 2nd Japanese-Croatian Project Workshop, Monitoring and analyses for disaster mitigation of landslides, debris flow and floods, Rijeka, Croatia, 15-17 December 2011, pp. 29-32

Arbanas Ž., Vivoda M., Jagodnik V., Dugonjić S., Ljutić K. (2012) Consideration of early warning system on the Grohovo Landslide, Book of Proceedings of 2nd Japanese-Croatian Project Workshop, Monitoring and analyses for disaster mitigation of landslides, debris flow and floods Rijeka, Croatia, 15-17 December 2011, pp. 51-54

Vivoda M., Đomlija P., Podolzski L., Benac Č. (2011) The hazard of floods and mass movements in the Rječina Valley during last 160 years, Book of Proceedings of 2nd Japanese-Croatian Project Workshop, Monitoring and analyses for disaster mitigation of landslides, debris flow and floods, Rijeka, Croatia, 15-17 December 2011, pp. 114-117

Arbanas Ž., Dugonjić S., Vivoda M., Jagodnik V. (2011) Landslide affected with an open pit excavation in flysch deposit, Proceedings of the 15th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Athens, Greece, 12-15 September 2011, pp. 1319-1324

Arbanas Ž., Mihalić S., Grošić M., Dugonjić S., Vivoda M. (2010) Landslide Brus, translational block sliding in flysch rock mass, ISRM International Symposium EUROCK 2010: Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering, EPFL, Lausanne, Switzerland, 15-18 June 2010, pp. 635-638

Arbanas, Ž., Vivoda, M., Pavlić, V., Đomlija, P., Briški, G. (2009) Case history of open pit excavation for Sport Hall Zamet, Proceedings of EUROCK 2009, Cavtat, Croatia, 29-31 October 2009, pp. 751-756

Drugi radovi u zbornicima skupova s recenzijom:

Benac, Č., Ružić, I., Vivoda, M., Dugonjić Jovančević, S., Đomlija, P. (2013) Podložnost obalnih padina marinskoj eroziji i klizanju (jugozapadna obala otoka Krka), Proceedings od 6th conference of Croatian geotechnical Society, Zadar, Croatia, 17-19 October 2013, pp. 186-192

Dugonjić, S., Vivoda, M., Jagodnik, V. (2009) Landslide affected with an open pit excavation, Proceedings of 4th International Young Geotechnical Engineering Conference (4iYGEC), Alexandria, Egypt, 3-6 October 2009, pp. 143-146

Grošić, M., Arbanas, Ž., Vivoda, M. (2008) Izvedba građevnih jama u turisitčkom naselju „Novi resort“ u Novom Vinodolskom, Proceedings of 5th Conference of Slovenian geotechnics, 9th Šuklje day, 12-14 June 2008, Nova Gorica, Slovenia, pp. 201-212

Radovi u zbornicima skupova bez recenzije:

Zuljani D., Peranić J., Vivoda M. (2015) Parametric analysis of anchored bored pile wall as a part of landslide stabilization measures on the Grohovo road landslide, Croatia, Georeks IX-th conference proceedings: Geotechnical engineering design and practice, Sofia, Bugarska, 2015., pp. 45-50

Arbanas, Ž., Mihalić Arbanas, S., Vivoda, M., Peranić, J., Dugonjić Jovančević, S., Jagodnik, V. (2014) Identification, monitoring and simulation of landslides in the Rječina River Valley, Croatia, Proceedings of the SATREPS Workshop on Landslide Risk Assessment Technology, Hanoi, Vietnam, 29-30 July 2014, pp. 200-213

Sažeci u zbornicima skupova:

Arbanas, Ž., Vivoda, M., Mihalić Arbanas, S., Peranić, J., Sečanj, M., Bernat, S., Krkač, M. (2015) Analysis of a reservoir water level impact on landslide reactivation, Abstracts proceedings of 2nd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region, Belgrade, Republic of Serbia, 14-16 May 2015, pp. 15-17

Dugonjić Jovančević, S., Arbanas, Ž., Vivoda, M., Peranić, J., Đomlija, P. (2015) Landslide hazard and risk assessment in Istria, Croatia, Abstracts proceedings of 2nd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region, Belgrade, Republic of Serbia, 14-16 May 2015, pp. 81-82

Vivoda M. (2014) Nedrenirano ispitivanje uzoraka sa klizišta Grohovo u aparatu za prstenasto smicanje ICl-1, Zbornik sažetaka Drugi skup mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti: Zajednički temelji, Rijeka, 2014., pp. 62-63

Peranić, J., Dugonjić Jovančević, S., Jagodnik, V., Vivoda, M., Osamu, N., Sassa, K., Arbanas, Ž. (2013) Two years observation results of the Grohovo Landslide using integrated remote monitoring, Book of Abstracts of 4th Workshop of the Japanese-Croatian Project on Risk Identification and Land- Use Planing for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia, Split, Croatia, 12-14 December 2013, pp. 21-21

Ružić, I., Marović, I., Vivoda, M., Dugonjić Jovančević, S., Kalajžić, D., Benac, Č., Ožanić, N. (2013) Application of 'Structure-from-Motion' photogrammetry for erosion processes monitoring, Mošćenička Draga example, Book of Abstracts of 4th Workshop of the Japanese- Croatian Project on Risk Identification and Land- Use Planing for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia, Split, Croatia, 12-14 December 2013, pp. 49-50

Vivoda, M., Sassa, K., Arbanas, Ž., Dugonjić Jovančević, S., Jagodnik, V., Peranić, J. (2013) Shear strength properties of soil materials from the Grohovo Landslide, Book of Abstracts of 4th Workshop of the Japanese- Croatian Project on Risk Identification and Land- Use Planing for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia, Split, Croatia, 12-14 December 2013, pp. 22-22

Benac Č., Mihalić S., Vivoda M. (2010) Geological and geomorphological conditions in the area of Rječina river and Dubračina river cathcments (Primorsko-goranska county, Croatia), Abstract book of 1st Croatian-Japanese Project workshop, International experience, Dubrovnik, Croatia, 22-24 November 2010, pp. 39