

Inženjerskogeološko kartiranje stijenske mase na zasjeku Špičunak (Gorski kotar) primjenom daljinskih istraživanja

Lukačić, Hrvoje

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:745328>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-17**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij geološkog inženjerstva

**INŽENJERSKOGEOLOŠKO KARTIRANJE STIJENSKE MASE NA ZASJEKU
ŠPIČUNAK (GORSKI KOTAR) PRIMJENOM DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA**

Diplomski rad

Hrvoje Lukačić
GI-387

Zagreb, 2020.

**INŽENJERSKOGEOLOŠKO KARTIRANJE STIJENSKE MASE NA ZASJEU ŠPIČUNAK
(GORSKI KOTAR) PRIMJENOM DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA**

HRVOJE LUKAČIĆ

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U ovom diplomskom radu prikazana je metodologija inženjerskogeološkog kartiranja stijenske mase na zasjeku Špičunak primjenom daljinskih metoda istraživanja. Inženjerskogeološko kartiranje provedeno je na digitalnom 3D modelu stijenske mase dobivenim primjenom terestričkog laserskog skeniranja (TLS). Kartiranje je uključivalo primjenu manualne i polu-automatske metode prikupljanja podataka o orijentaciji, razmaku i postojanosti diskontinuiteta. Manualna identifikacija navedenih značajki diskontinuiteta provedena je u softveru *CloudCompare* dok je polu-automatska identifikacija provedena u softveru *Discontinuity Set Extractor (DSE)*. Na temelju provedenih analiza i prikupljenih podataka utvrđene su razlike u točnosti dviju metoda kartiranja te su dobiveni podaci primijenjeni za provedbu kinematičkih analiza stabilnosti i GSI kategorizaciju stijenske mase.

Ključne riječi: daljinska istraživanja, oblak točaka, terestričko lasersko skeniranje, diskontinuiteti, kinematička analiza stabilnosti, GSI

Završni rad sadrži: 75 stranice, 21 tablica, 37 slika i 44 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Martin Krkač, docent RGNF

Pomoć pri izradi: Marin Sečanj, mag.ing.geol., asistent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Martin Krkač, docent RGNF
Dr. sc. Snježana Mihalić Arbanas, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Željko Arbanas, redoviti profesor, GF UniRi

ENGINEERING GEOLOGICAL MAPPING OF ROCK MASS ON THE ŠPIČUNAK SLOPE (GORSKI
KOTAR) USING REMOTE SENSING TECHNIQUES

HRVOJE LUKAČIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb

Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Geology and Geological Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

This Master thesis presents the methodology of engineering geological mapping of rock mass on the Špičunak slope using remote sensing techniques. Engineering geological mapping was performed on a digital 3D model of rock mass obtained using terrestrial laser scanning (TLS). Mapping involved the application of a manual and semi-automatic mapping method to collect data on orientation, spacing, and discontinuity persistence. Manual identification of these discontinuity features was performed in *CloudCompare* while semi-automatic identification was performed in *Discontinuity Set Extractor (DSE)*. Based on the performed analyzes and collected data, differences in the accuracy of the two mapping methods were determined and the obtained data were applied for the implementation of graphic stability analyzes and categorization of rock mass using the GSI classification system.

Keywords: remote sensing, point cloud, terrestrial laser scanning, discontinuity, graphic stability analysis, GSI

Thesis contains: 75 pages, 21 tables, 37 figures, and 44 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Martin Krkač, Assistant Professor

Technical support: MEng Marin Sečanj, Assistant

Reviewers: PhD Martin Krkač, Assistant Professor
PhD Snježana Mihalić Arbanas, Full Professor
PhD Željko Arbanas, Full Professor

Defence date: July 10, 2020.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	III
POPIS PRILOGA	V
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA.....	VI
1. UVOD	1
2. TEORIJSKE OSNOVE.....	2
2.1. Intaktna stijena	2
2.2. Značajke diskontinuiteta	3
2.2.1. Orijentacija diskontinuiteta	4
2.2.2. Razmak diskontinuiteta.....	5
2.2.3. Postojanost diskontinuiteta.....	6
2.2.4. Hrapavost stjenki diskontinuiteta	7
2.2.5. Zijev i širina diskontinuiteta.....	11
2.2.6. Ispuna diskontinuiteta	12
2.2.7. Čvrstoća stjenki diskontinuiteta	12
2.2.8. Vlažnost i propusnost diskontinuiteta.....	13
2.2.9. Broj setova diskontinuiteta.....	13
2.2.10. Veličina bloka stijenske mase	15
2.3. Geološki indeks čvrstoće (GSI).....	19
2.4. Daljinske metode istraživanja i njihova primjena u inženjerskoj geologiji.....	23
2.5. Kinematička analiza stabilnosti.....	28
3. PRIRODNE ZNAČAJKE ISTRAŽIVANOG PRODUČJA	30
4. METODOLOGIJA	33
4.1. Terensko inženjerskogeološko kartiranje	33
4.2. Manualna identifikacija geometrijskih značajki diskontinuiteta sa 3D digitalnog modela.....	33
4.3. Polu-automatska identifikacija geometrijskih značajki diskontinuiteta sa 3D digitalnog modela	38
4.4. Klasifikacija stijenske mase i provedba kinematičkih analiza.....	42
5. REZULTATI INŽENJERSKOGEOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA	44
5.1. Inženjerskogeološka zona Z-1.....	45
5.2. Inženjerskogeološka zona Z-2.....	48
5.3. Inženjerskogeološka zona Z-3.....	51

5.4.	Inženjerskogeološka zona Z-4.....	54
5.5.	Inženjerskogeološka zona Z-5.....	57
5.6.	Inženjerskogeološka zona Z-6.....	60
5.7.	Inženjerskogeološka zona Z-7.....	63
6.	RASPRAVA.....	66
7.	ZAKLJUČAK.....	69
8.	LITERATURA	71

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Orijentacija diskontinuiteta (modificirano prema: ISRM, 1978).	5
Slika 2-2 Razmak diskontinuiteta (modificirano prema Wyllie i Mah, 2005).	6
Slika 2-3 Postojanost diskontinuiteta (modificirano prema: Kim et.al., 2007).	7
Slika 2-4 Definiranje hrapavosti diskontinuiteta (Pollak, 2007).	8
Slika 2-5 Profil hrapavosti (ISRM, 1978).	9
Slika 2-5 Karakteristični profili hrapavosti (Barton i Choubey, 1977).	10
Slika 2-6 Zijev i širina diskontinuiteta (Pollak, 2007).	11
Slika 2-8 Stijenska masa sa različitim brojem familija diskontinuiteta (Pollak, 2007).	14
Slika 2-9. Kvantitativni GSI klasifikacijski sustav (Sonmez i Ulusay, 1999).	22
Slika 2-10 Terestrički laserski skener (TLS).	25
Slika 2-11 Shematski prikaz tri vrste skenera prema načinu snimanja (Miler, 2007).	25
Slika 2-12 Shematski prikaz pulsnog, faznog i triangulacijskog načina mjerenja udaljenosti (Miler, 2007).	26
Slika 2-13 Glavni mehanizmi sloma stijenske mase: a) planarni slom, b) klinasti slom, c) prevrtanje (modificirano prema Wyllie i Mah, 2005.).	28
Slika 3-1 Geografski položaj istraživanog zasjeka (crvena boja) prikazan na ortofoto karti (preuzeto s www.maps.google.com).	30
Slika 3-2 Isječak iz Osnovne geološke karte SFRJ, M 1:100.000 – list Delnice (istraživani pokos prikazan je žutom linijom) (modificirano prema Savić i Dozet 1983).	31
Slika 4-1 Snimanje stijenskog pokusa metodom terestričkog laserskog skeniranja (Đikić, 2016.).	34
Slika 4-2 Određivanje orijentacije diskontinuiteta u programu <i>CloudCompare</i> ; a) odabir reprezentativnog područja mjerenja; b) mjerenje orijentacije diskontinuiteta alatom <i>Compass</i>	35
Slika 4-3 Određivanje razmaka diskontinuiteta: a) pozicija profila linearnog uzorkovanja; b) izmjereni razmaci diskontinuiteta.	37
Slika 4-4 Određivanje postojanosti diskontinuiteta u programu <i>CloudCompare</i>	37
Slika 4-5 Polu-automatsko identifikacija setova diskontinuiteta u softveru <i>DSE</i> : a) test koplanarnosti; b) statistička analiza; c) stereografska projekcija polova normala diskontinuiteta; d) uređivanje <i>cluster</i> a; e) prikaz identificiranih setova diskontinuiteta (Riquelme et al., 2014.).	40

Slika 4-6 Polu-automatsko određivanje razmaka diskontinuiteta u softveru <i>DSE</i> : a) <i>Full persistent</i> razmaci, b) <i>Non persistent</i> razmaci (modificirano prema Riquelme et al., 2015).	41
Slika 4-7 Polu-automatsko određivanje postojanosti diskontinuiteta u softveru <i>DSE</i> : a) položaj plohe diskontinuiteta na 3D modelu, b) izdvojena ploha diskontinuiteta sa naznačenim smjerovima određivanja postojanosti (modificirano prema Riquelme et al., 2018).	42
Slika 5-1. 3D model stijenskog zasjeka Spičunak podijeljen na inženjerskogeološke zone.	44
Slika 5-2 Inženjerskogeološka zona Z-1 - pogled na 3D model.	45
Slika 5-3 Inženjerskogeološka zona Z-1 - pogled na zonu.	46
Slika 5-4 Inženjerskogeološka zona Z-2 -pogled na 3D model.	48
Slika 5-5 Inženjerskogeološka zona Z-2 - pogled na zonu.	49
Slika 5-6 Inženjerskogeološka zona Z-3 - pogled na 3D model.	51
Slika 5-7 Inženjerskogeološka zona Z-3 - pogled na zonu.	52
Slika 5-8 Inženjerskogeološka zona Z-4 - pogled na 3D model.	54
Slika 5-9 Inženjerskogeološka zona Z-4 - pogled na zonu.	55
Slika 5-10 Inženjerskogeološka zona Z-5 - pogled na 3D model.....	57
Slika 5-11 Inženjerskogeološka zona Z-5 - pogled na zonu.	58
Slika 5-12 Inženjerskogeološka zona Z-6 - pogled na 3D model.....	60
Slika 5-13 Inženjerskogeološka zona Z-6 - pogled na zonu.	61
Slika 5-15 Inženjerskogeološka zona Z-7 - pogled na zonu.	64

POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Procjena jednoosne čvrstoće pokusima na terenu (ISRM, 1978).	3
Tablica 2-2 Opis razmaka diskontinuiteta (ISRM, 1978).	6
Tablica 2-3 Opis postojanosti diskontinuiteta (ISRM, 1978).....	7
Tablica 2-4 Opis hrapavosti stijenki diskontinuiteta (Bieniaski, 1974).....	10
Tablica 2-5 Opis zijeva diskontinuiteta (ISRM, 1978).	11
Tablica 2-6 Ocjena stupnja procjeđivanja vode (ISRM, 1978).	13
Tablica 2-7 Broj grupa diskontinuiteta (ISRM, 1978).	14
Tablica 2-8 Klasifikacija volumena bloka stijenske mase (Palmstrom, 1995).	16
Tablica 2-9 Klasifikacija volumetrijskog broja pukotina (Palmstrom, 1982).....	16
Tablica 2-10 Klasifikacija veličine bloka u ovisnosti o volumetrijskom broju pukotina (ISRM, 1978).....	17
Tablica 2-11 Opis stijenske mase na temelju veličine i oblika bloka (ISRM, 1978).	17
Tablica 2-12 Klasifikacija faktora oblika bloka (Palmstrom, 1995).	18
Tablica 2-13 Opis strukture i oblika bloka stijenske mase (Palmstrom, 2005, ISRM, 1978).	19
Tablica 4-1 Kalibracijski parametri za polu-automatsku identifikaciju diskontinuiteta koristeći <i>DSE</i>	38
Tablica 5-1 Opis značajki diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z-1. Stereografska projekcija uključuje setove diskontinuiteta identificirane manualnom metodom koristeći <i>CloudCompare</i> (crvena linija) te polu-automatski koristeći softver <i>Discontinuity Set Extractor</i> (zeleni linija).	47
Tablica 5-2 Opis značajki diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z-2. Stereografska projekcija uključuje setove diskontinuiteta identificirane manualnom metodom koristeći <i>CloudCompare</i> (crvena linija) te polu-automatski koristeći softver <i>Discontinuity Set Extractor</i> (zeleni linija).	50
Tablica 5-3 Opis značajki diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z-3. Stereografska projekcija uključuje setove diskontinuiteta identificirane manualnom metodom koristeći <i>CloudCompare</i> (crvena linija) te polu-automatski koristeći softver <i>Discontinuity Set Extractor</i> (zeleni linija).	53
Tablica 5-4 Opis značajki diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z-4. Stereografska projekcija uključuje setove diskontinuiteta identificirane manualnom metodom koristeći <i>CloudCompare</i> (crvena linija) te polu-automatski koristeći softver <i>Discontinuity Set Extractor</i> (zeleni linija).	56

Tablica 5-5 Opis značajki diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z-5. Stereografska projekcija uključuje setove diskontinuiteta identificirane manualnom metodom koristeći <i>CloudCompare</i> (crvena linija) te polu-automatski koristeći softver <i>Discontinuity Set Extractor</i> (zeleni linija).	59
Tablica 5-6 Opis značajki diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z-6. Stereografska projekcija uključuje setove diskontinuiteta identificirane manualnom metodom koristeći <i>CloudCompare</i> (crvena linija) te polu-automatski koristeći softver <i>Discontinuity Set Extractor</i> (zeleni linija).	62
Tablica 5-7 Opis značajki diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z-7. Stereografska projekcija uključuje setove diskontinuiteta identificirane manualnom metodom koristeći <i>CloudCompare</i> (crvena linija) te polu-automatski koristeći softver <i>Discontinuity Set Extractor</i> (zeleni linija).	65

POPIS PRILOGA

Prilog 1. Kinematička analiza stabilnosti (*CloudCompare*) – Inženjerskogeološka zona Z-1

Prilog 2. Kinematička analiza stabilnosti (*DSE*) – Inženjerskogeološka zona Z-1

Prilog 3. Kinematička analiza stabilnosti (*CloudCompare*) – Inženjerskogeološka zona Z-2

Prilog 4. Kinematička analiza stabilnosti (*DSE*) – Inženjerskogeološka zona Z-2

Prilog 5. Kinematička analiza stabilnosti (*CloudCompare*) – Inženjerskogeološka zona Z-3

Prilog 6. Kinematička analiza stabilnosti (*DSE*) – Inženjerskogeološka zona Z-3

Prilog 7. Kinematička analiza stabilnosti (*CloudCompare*) – Inženjerskogeološka zona Z-4

Prilog 8. Kinematička analiza stabilnosti (*DSE*) – Inženjerskogeološka zona Z-4

Prilog 9. Kinematička analiza stabilnosti (*CloudCompare*) – Inženjerskogeološka zona Z-5

Prilog 10. Kinematička analiza stabilnosti (*DSE*) – Inženjerskogeološka zona Z-5

Prilog 11. Kinematička analiza stabilnosti (*CloudCompare*) – Inženjerskogeološka zona Z-6

Prilog 12. Kinematička analiza stabilnosti (*DSE*) – Inženjerskogeološka zona Z-6

Prilog 13. Kinematička analiza stabilnosti (*CloudCompare*) – Inženjerskogeološka zona Z-7

Prilog 14. Kinematička analiza stabilnosti (*DSE*) – Inženjerskogeološka zona Z-7

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA

OZNAKA	VELIČINA	JEDINICA
σ_c	Jednoosna tlačna čvrstoća	MPa
F	Sila	kN
A_0	Površina poprečnog presjeka	m ²
JRC	Indeks hrapavosti pukotina	
S	Razmak diskontinuiteta	m
I_b	Indeks veličine bloka	
V_b	Volumen bloka	m ³
γ	Kut između diskontinuiteta	°
J_v	Volumetrijski broj pukotina	m ⁻³
β	Faktor oblika bloka	
SCR	Ocjena uvjeta površine diskontinuiteta	
SR	Ocjena strukture stijenske mase	
R_r	Ocjena hrapavosti diskontinuiteta	
R_w	Ocjena trošnosti diskontinuiteta	
R_f	Ocjena ispune diskontinuiteta	
α_s	Smjer pomaka stijenske mase	
α_t	Smjer pomaka blokova	
α_i	Pravac pružanja presječne dviju ravnina	
φ	Kut unutarnjeg trenja	°

1. UVOD

Uspješno provedeni zahvati u stijenskim masama uvelike ovise o kvaliteti istraživačkih radova te realnoj procjeni fizičko-mehaničkih svojstava stijenske mase. Fizičko-mehaničkih svojstava stijenske mase ovise od svojstvima intaktne stijene, ali i svojstvima diskontinuiteta. Iz tog razloga poznavanje geometrijskih značajki diskontinuiteta i definiranje reprezentativnih pukotinskih sustava je od iznimne važnosti za definiranje inženjerskogeološkog modela, te analizu mogućih tipova nestabilnosti.

Prilikom definiranja pukotinskih sustava potrebno je prikupiti veliki broj reprezentativnih podataka o orijentaciji, razmaku i postojanosti diskontinuiteta. Inženjerski geolozi navedene podatke najčešće prikupljaju ručno na terenu što rezultira kvalitativnom i subjektivnom, a ne kvantitativnom i objektivnom ocjenom strukture stijenske mase. Na terenu su često prepoznate samo dominantne strukture, prikupljanje podataka vremenski je ograničeno te vrlo često nije moguće prikupiti strukturne podatke na većim visinama. Razvojem i implementacijom daljinskih metoda istraživanja u inženjersku geologiju stvorili su se uvjeti za prikupljanje i analizu velikog broja strukturnih podataka, manualno i poluautomatski, čime je moguće definirati objektivni strukturni model stijenske mase.

Cilj ovog diplomskog rada je provedba daljinskog inženjerskogeološkog kartiranja stijenske mase na 3D digitalnom modelu dobivenim terestričkim laserskim skeniranjem. Korištene su metode manualnog i poluautomatskog kartiranja, pri čemu su prikupljeni prvenstveno podaci o orijentaciji, razmaku i postojanosti diskontinuiteta. Provedene analize podataka imaju za cilj utvrditi razlike u točnosti i preciznosti određivanja navedenih geometrijskih značajki diskontinuiteta te njihove primjene u klasifikaciji stijenske mase i kinematičkim analizama stabilnosti. Rezultati daljinskog istraživanja geometrijskih karakteristika diskontinuiteta primijenjeni su u GSI klasifikaciji stijenske mase.

Osnovna hipoteza ovog diplomskog rada je da se manualnim i polu-automatskim načinom prikupljanja strukturnih podataka na 3D digitalnom modelu dobivaju objektivnije i preciznije vrijednosti orijentacija, razmaka i postojanosti, a time i kategorizacije stijenske mase. Krajnji rezultat istraživanja su objektivni i reprezentativni ulazni parametri za provedu geotehničkih analiza stabilnosti stijenske mase.

2. TEORIJSKE OSNOVE

Stijenska masa (*engl. rock mass*) anizotropna je, heterogena, raspucala cjelina sačinjena od intaktne stijene (*engl. intact rock*) i strukturnih diskontinuiteta (*engl. discontinuity*). O njenoj složenosti govori činjenica da ne postoji jedinstvena metodologija kojim bi se u potpunosti moglo opisati i definirati njeno ponašanje u specifičnim uvjetima.

Da bi se u stijenskoj masi mogli izvoditi inženjerski zahvati potrebno je odrediti i kvantificirati njeno ponašanje u odgovarajućem mjerilu. Upravo je problem kvantifikacije ponašanja stijenske mase jedan od najvećih izazova moderne mehanike stijena, obzirom da mehanizam sloma uvelike ovisi o mjerilu promatranja. Za potpuno razumijevanje ponašanja stijenske mase potrebno je odrediti svojstva intaktnog stijenskog materijala, značajke diskontinuiteta, ali i parametre stijenske mase.

2.1. Intaktna stijena

Intaktna stijena je predstavlja materijal stijene, često veličine laboratorijskog uzorka, možeš staviti veličine laboratorijskog uzorka, koji ne sadrži strukturne diskontinuitete. Prilikom opisa intaktne stijene potrebno je opisati njena fizička i mehanička svojstva. Fizička svojstva uključuju opis: boje, mineralnog sastava, teksture, strukture, poroznosti, suhe gustoće, stupnja saturacije, te vlažnost. S druge strane mehanička svojstva kojima se opisuje intaktna stijena su: čvrstoća, deformabilnost, krutost, tvrdoća, trošnost, postojanost, plastičnost, te bubrenje (Singh and Goel, 2011). Svojstva intaktne stijene poput čvrstoće i deformabilnosti, ovise o mineralnom sastavu, genezi, strukturi, teksturi te naknadnim dijagenetskim procesima. Fizikalno-mehanička svojstva intaktne stijene zajedno sa svojstvima diskontinuiteta određuju inženjerskogeološke značajke i ponašanje stijenske mase.

Jednoosna tlačna čvrstoće intaktne stijene (σ_c) predstavlja tlačnu čvrstoću intaktnog stijenskog materijala kada se on nalazi u stanju jednoosnog naprezanja uz dozvoljeno bočno širenje (ISRM, 1979). Ispitivanje se provodi na uzorcima standardnih dimenzija: promjerom uzorka od 50 mm, te omjerom visine i promjera od 2,5 do 3:1. Vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće jednaka je maksimalno ostvarenom naprezanju u trenutku sloma i računa se prema izrazu:

$$\sigma_c = \frac{F}{A_0}, (\text{N/m}^2, \text{Pa}, \text{MPa}), \quad (2-1)$$

gdje je:

F – sila sloma uzorka (N),

A_0 – površina poprečnog presjeka uzorka (m^2).

Jednoosna tlačna čvrstoća najvažnije je mehaničko svojstvo intaktne stijene budući da se između ostalog koristi i kao ulazni parametar u određenim klasifikacijama stijenske mase, kao što je npr. geomehanička, odnosno RMR (*eng. Rock Mass Rating*) klasifikacija (Bieniawski, 1973). Određivanje jednoosne tlačne čvrstoće u laboratoriju i na terenu provodi se primjenom indeksa čvrstoće opterećenjem u točki (*engl. Point load test, PLT*). Prednost *PLT*-a je mogućnost provedbe ispitivanja kako na pravilnim tako i na nepravilnim uzorcima. Procjena čvrstoće intaktne stijene na terenu provodi se i upotrebnom *Schmidtovog* čekića te na temelju priručnih sredstava za terensku identifikaciju tlačne čvrstoće prema preporukama ISRM-a (ISRM, 1978).

Tablica 2-1 Procjena jednoosne čvrstoće pokusima na terenu (ISRM, 1978).

Grupa	Opis	Terenska identifikacija	Jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)
R0	Ekstremno slaba stijena	Urezivanje noktom	0,25 – 1
R1	Vrlo slaba stijena	Drobljenje uslijed jakog udarca geološkim čekićem, može se guliti džepnim nožićem	1,0 – 5,0
R2	Slaba stijena	Poteškoće prilikom guljenja džepnim nožićem, plitka urezivanja jakim udarcima geološkim čekićem	5,0 – 25
R3	Srednje čvrsta stijena	Uzorak se raspucava uslijed jednog jakog udarca geološkim čekićem	25 – 50
R4	Čvrsta stijena	Potreban više nego jedan udarac geološkog čekića da bi se uzorak raspuknuo	50 – 100
R5	Vrlo čvrsta stijena	Potrební mnogi udarci geološkog čekića da bi se uzorak raspuknuo	100 – 250
R6	Ekstremno čvrsta stijena	Uzorak je moguće otkinuti jedino pomoću geološkog čekića	>250

2.2. Značajke diskontinuiteta

Diskontinuiteti obuhvaćaju sve prekide i lomove u kontinuumu stijenske mase duž kojih je došlo do potpunog prekida međumolekularnih sila, te koji nema nikakvu ili ima vrlo malu vlačnu čvrstoću (ISRM, 1978, Priest, 1993). Najčešće je riječ o prslinama, pukotinama, slojnim plohama, folijaciji, litološkim kontaktima, te rasjedima. Nastaju djelovanjem

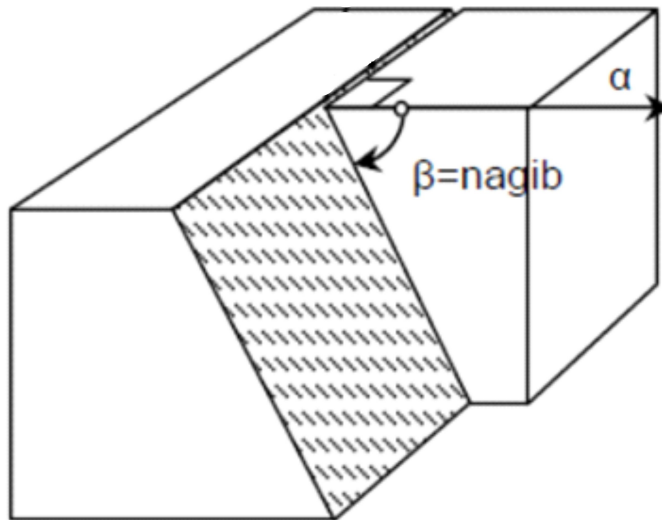
vlačnih naprezanje ili posmičnih naprezanja (Prince, 1966). Diskontinuiteti koji su međusobno paralelni, imaju ista svojstva i genezu predstavljaju set diskontinuiteta. Svi setovi diskontinuiteta koje se na plohi promatranja međusobno presijecaju čine pukotinski sustav (Hrženjak i Briševac, 2009).

Kako bi se svi strukturni elementi opisali na jedinstven kvalitativan i kvantitativan način prikupljanje i obrada podataka strukturnih značajki provodi se sukladno preporukama Međunarodnog društva za mehaniku stijena (*eng. International Society for Rock Mechanics, ISRM*) za kvantitativni opis diskontinuiteta u stijenskim masama. ISRM (1978) preporuča opis i procjenu sljedećih značajki diskontinuiteta:

- orijentacija diskontinuiteta
- razmak diskontinuiteta
- postojanost diskontinuiteta
- hrapavost stjenki diskontinuiteta
- zijev i širina diskontinuiteta
- ispunost diskontinuiteta
- čvrstoća stjenki diskontinuiteta
- vlažnost i propusnost
- broj setova diskontinuiteta
- veličina bloka
- oblik bloka

2.2.1. Orijentacija diskontinuiteta

Orijentacija diskontinuiteta predstavlja osnovni podatak pri kvantitativnom opisu diskontinuiteta. Riječ je o položaju diskontinuiteta u prostoru koji je definiran sa tri parametra: smjerom nagiba, pravcem pružanja i kutom nagiba. Pravac pružanja i smjer nagiba u međusobnoj su vezi pa je prilikom prikupljanja podataka dovoljno odrediti jednu od te dvije veličine. Smjer nagiba diskontinuiteta općenito se označava sa α , a kut nagiba sa β , a zajedno se pišu u obliku α/β (Slika 2-1).

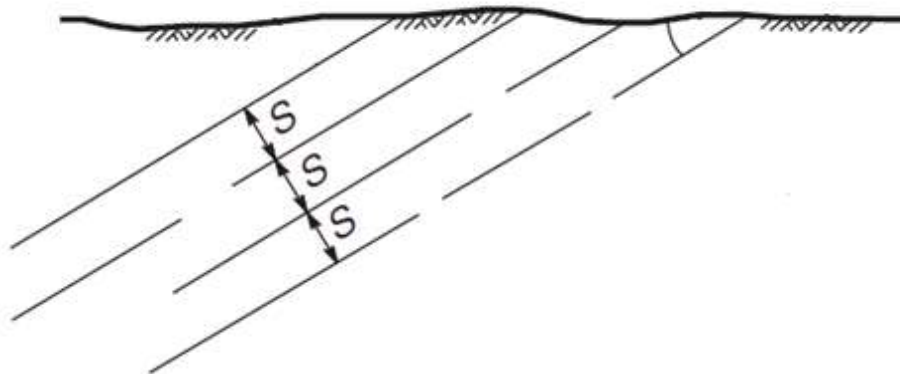


Slika 2-1 Orijentacija diskontinuiteta (modificirano prema: ISRM, 1978).

Rezultati mjerenja orijentacije diskontinuiteta najčešće se prikazuju na stereografskoj projekciji. Oni mogu biti prikazani kao tragovi ravnina ili kao probodišta normale diskontinuiteta i donje polovice kugle, tj. kao polovi. Bez obzira koji način prikaza se koristi diskontinuitet je potpuno prostorno određen.

2.2.2. Razmak diskontinuiteta

Razmak diskontinuiteta predstavlja okomitu udaljenost između susjednih diskontinuiteta koji pripadaju istom setu (Slika 2-2) (ISRM, 1978). Razmak diskontinuiteta određuje se za svaki set. Prema preporučenoj metodologiji Međunarodnog društva za mehaniku stijena razmak diskontinuiteta moguće je odrediti na više načina: direktnim mjerenjem na izdancima, mjerenjem iz jezgre bušotine ili snimanjem kanala bušotine, daljinskim metodama (fotogrametrija), te geofizičkim metodama (brzina širenja longitudinalnih elastičnih valova).



Slika 2-2 Razmak diskontinuiteta (modificirano prema Wyllie i Mah, 2005).

Razmak diskontinuiteta direktno određuje veličinu blokova intaktne stijene te kao takav ima utjecaj na sveopće stanje stijenske mase. Vrlo mali razmaci diskontinuiteta dovode do promjene mehanizma sloma stijenske mase, tj. prelaska iz translacijskog u kružni mehanizam sloma. Uz navedeno, mali razmak diskontinuiteta dovodi i do smanjenja kohezije stijenske mase (ISRM, 1978). Osim na čvrstoću stijenske mase razmak diskontinuiteta ima utjecaja i na hidrauličku vodljivost, pa tako vrijedi da je hidraulička vodljivost obrnuto proporcionalna razmaku diskontinuiteta (ISRM, 1978). Podjela diskontinuiteta s obzirom na razmak prikazana je u Tablici 2-2.

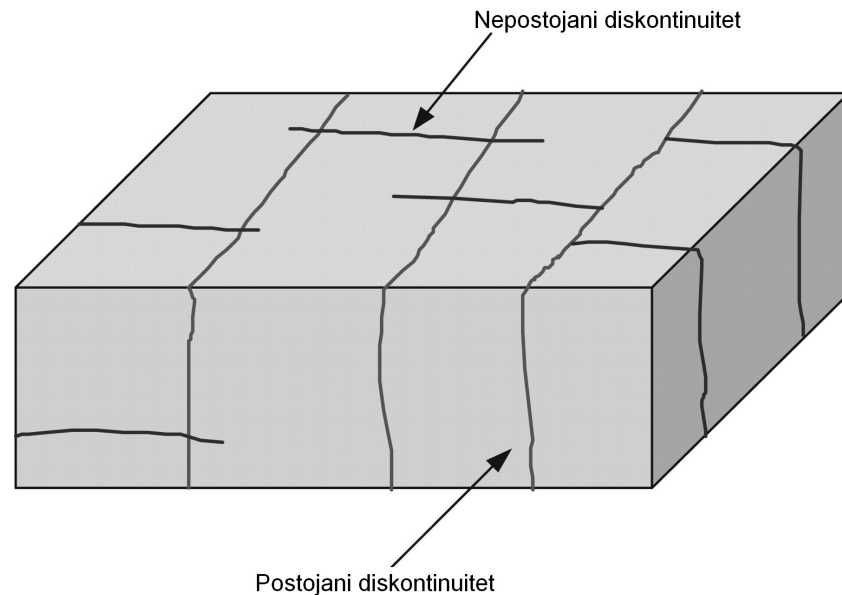
Tablica 2-2 Opis razmaka diskontinuiteta (ISRM, 1978).

Opis	Razmak (mm)
Ekstremno mali razmak	<20
Vrlo mali razmak	20-60
Mali razmak	60-200
Srednji razmak	200-600
Veliki razmak	600-2000
Vrlo veliki razmak	2000-6000
Ekstremno veliki razmak	>6000

2.2.3. Postojanost diskontinuiteta

Postojanost, kontinuiranost ili perzistencija predstavlja prostorno prostiranje diskontinuiteta kao ravnine (Slika 2-3) (ISRM, 1978). Postojanost može biti grubo procijenjena opažanjem traga diskontinuiteta na plohi promatranja (zasjek). Ukoliko se

diskontinuitet proteže preko cijele plohe promatranja (npr. zasjek) tada ima postojanost 100 %.



Slika 2-3 Postojanost diskontinuiteta (modificirano prema: Kim et.al., 2007).

Postojanost je parametar kojeg je vrlo teško kvantificirati, a ima veliki utjecaj na stabilnost stijenske mase, te na oblik i volumen potencijalno nestabilnih blokova. Podjela diskontinuiteta s obzirom na postojanost prikazana je u Tablici 2-3.

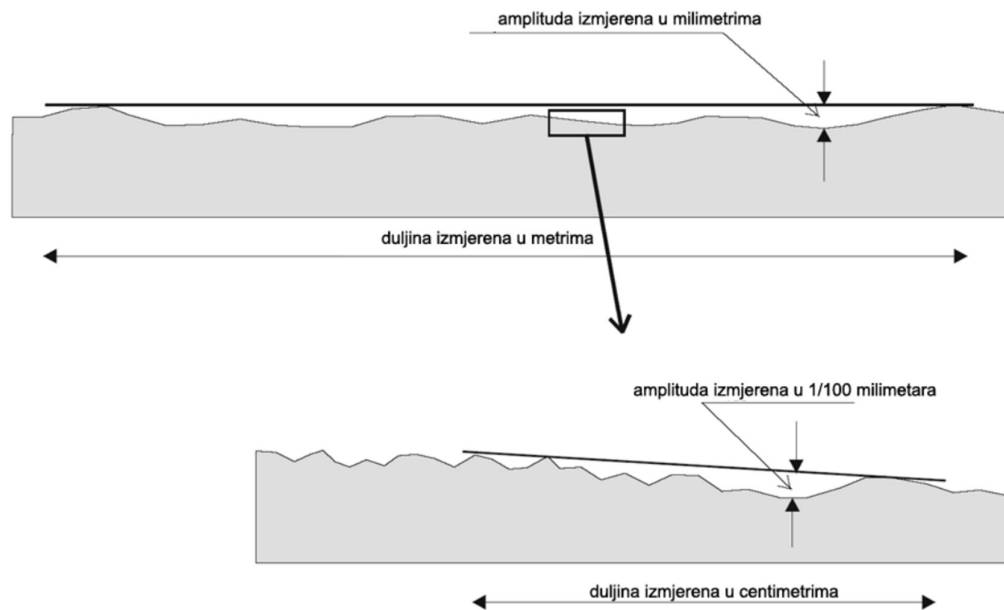
Tablica 2-3 Opis postojanosti diskontinuiteta (ISRM, 1978).

Opis	Postojanost (m)
Vrlo mala postojanost	<1
Mala postojanost	1-3
Srednja postojanost	3-10
Velika postojanost	10-20
Vrlo velika postojanost	>20

2.2.4. Hrapavost stjenki diskontinuiteta

Hrapavost stjenki diskontinuiteta predstavlja sve površinske neravnine u odnosu na srednju ravninu diskontinuiteta (ISRM, 1978). Hrapavost je jedan od parametara koji ima direktan utjecaj na posmičnu čvrstoću stijenske mase, osobito u slučaju izostanka ispune diskontinuiteta. Prema preporukama Međunarodnog društva za mehaniku stijena hrapavost

stjenki diskontinuiteta opisuje se preko dvije veličine, valovitosti i neravnine (ISRM, 1978). Valovitost predstavlja velika izbočenja na površini diskontinuiteta (decimetarsko i metarsko mjerilo), dok se neravnine odnose na mala izbočenja na površini diskontinuiteta (milimetarsko i centimetarsko mjerilo) (slika 2-4). Definiranje stupnja hrapavosti diskontinuiteta stoga ovisi i o mjerilu promatranja. Na otvorenim izdancima stijenske mase hrapavost se definira u metarskom i decimetarskom mjerilu, dok je definiranje hrapavosti na jezgri istražne bušotine ograničeno na centimetarsko i milimetarsko mjerilo. Osnovni cilj određivanja hrapavosti je procjena i izračun posmične čvrstoće i pomaka po diskontinuitetu koji mogu biti osobito precizni u slučaju kada ispuna diskontinuiteta izostaje (ISRM, 1978).



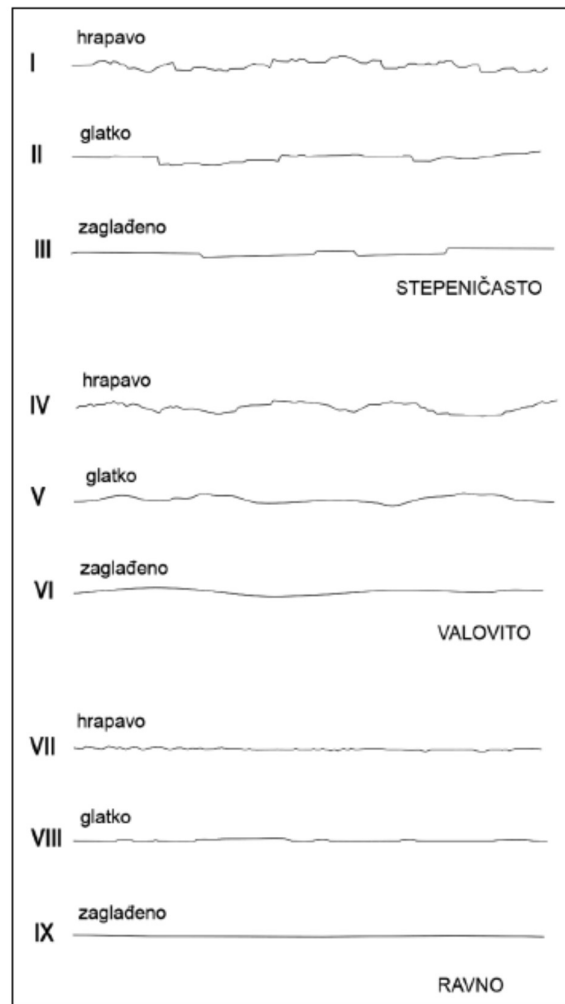
Slika 2-4 Definiranje hrapavosti diskontinuiteta (Pollak, 2007).

Ukoliko je smjer smicanja poznat, određivanje hrapavosti provodi se metodom linearnog profiliranja (ISRM, 1978). Profili hrapavosti definiraju se najčešće u smjeru nagiba diskontinuiteta ukoliko je riječ o planarnom slomu ili po profilima koji su paralelni presječnici dva diskontinuiteta kod klinastog sloma.

Karakteristični profili hrapavosti (duljine između 1 i 10 metara) prema preporukama ISRM-a dijele stjenke diskontinuiteta u devet kategorija (slika 2-5) (ISRM, 1978). Navedena kategorizacija diskontinuiteta temelji se na opisu diskontinuiteta u dva mjerila:

- Krupno mjerilo - nekoliko centimetara,
- Srednje mjerilo - nekoliko metara.

U srednjem mjerilu stjenke diskontinuiteta se dijele na stepeničaste, valovite i ravne, dok se u krupnom mjerilu dijele dodatno na hrapave, glatke i zaglađene. Prilikom primjene navedenih profila potrebno je naglasiti da se termin „zaglađeno“ koristi za opis onih diskontinuiteta gdje postoje jasni dokazi smičnog pomaka po diskontinuitetu.



Slika 2-5 Profil hrapavosti (ISRM, 1978).

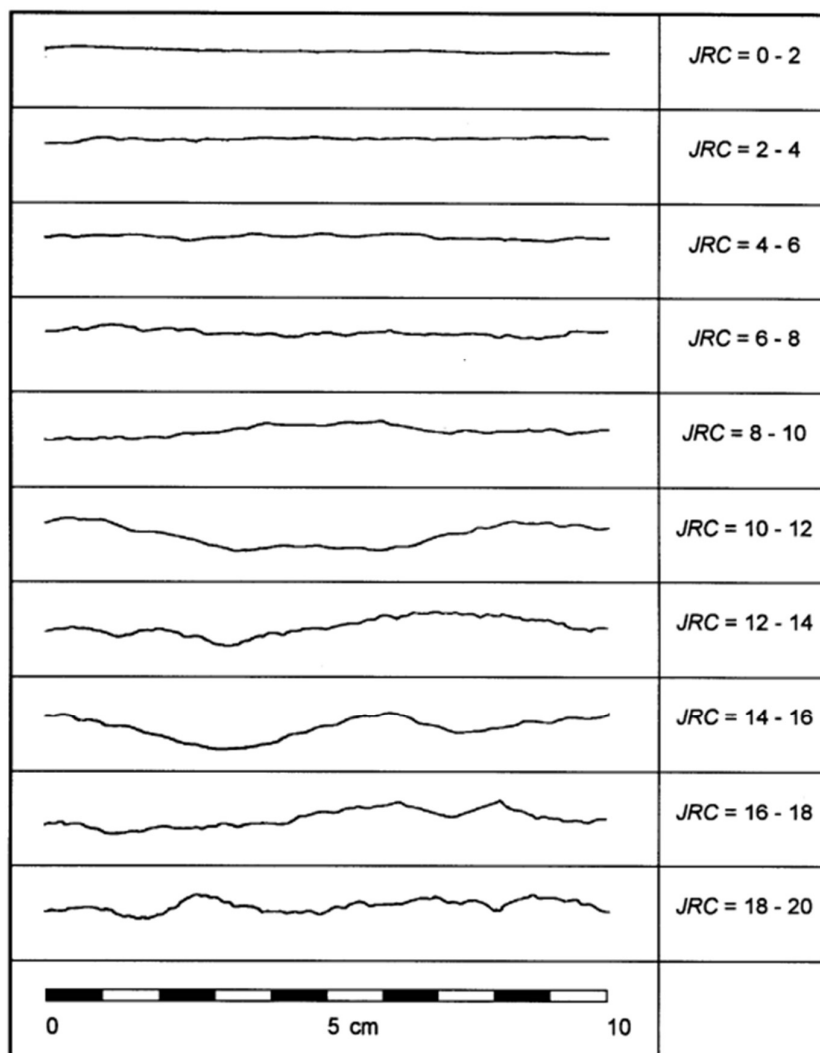
Osim navedenog profila hrapavosti, različiti klasifikacijski sustavi opisuju hrapavost stjenki diskontinuiteta na različite načine. Tako su za Q i RMR klasifikaciju razvijene upute za opis hrapavosti stjenki diskontinuiteta. RMR klasifikacija (Bieniawski, 1984) hrapavost dijeli u pet kategorija i opisuje ju u metarskom mjerilu (tablica 2-4). Istovjetna metodologija opisa hrapavosti primijenjena je i u GSI klasifikaciji.

Za potrebe određivanja indeksa hrapavosti Barton je razvio 10 karakterističnih profila hrapavosti na temelju laboratorijskih ispitivanja (Barton i Choubey, 1977). Svakom od 10

profila pridružena je vrijednost koeficijenta hrapavosti JRC (*engl. Joint Wall Roughness Coefficient*) koji postiže vrijednosti do 0 do 20. Karakteristični profili hrapavosti prikazani su na slici 2-5.

Tablica 2-4 Opis hrapavosti stijenci diskontinuiteta (Bieniaski, 1974).

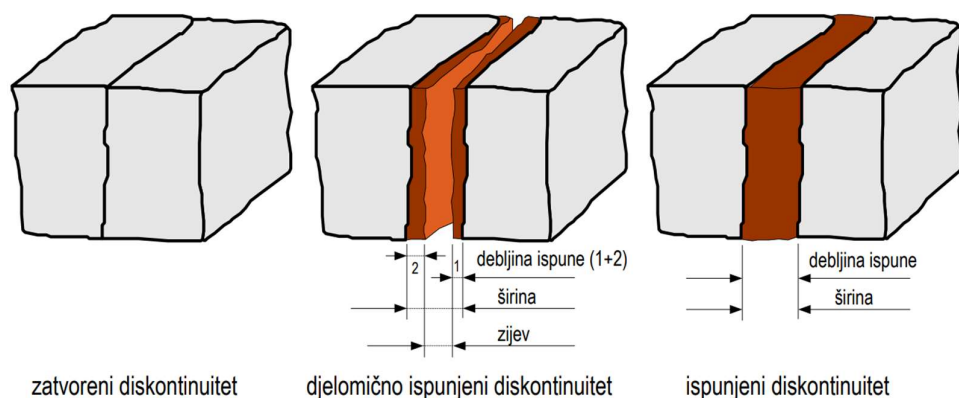
Hrapavost	Opis
Vrlo hrapavo	Na površini diskontinuiteta su prisutne gotovo okomite stepenice i bridovi
Hrapavo	Nekoliko bridova i blažih stepenica, neravnine su jasno izražene, a površina diskontinuiteta je na dodir vrlo hrapava
Neznatno hrapavo	Vidljive su i opipljive manje neravnine na površini diskontinuiteta
Glatko	Površina diskontinuiteta je na dodir glatka
Sklisko	Vidljivi su tragovi zaglađivanja plohe



Slika 2-5 Karakteristični profili hrapavosti (Barton i Choubey, 1977).

2.2.5. Zijev i širina diskontinuiteta

Zijev diskontinuiteta predstavlja okomitu udaljenost između stjenki otvorenog diskontinuiteta ukoliko je otvoreni dio diskontinuiteta ispunjen vodom ili zrakom (ISRM, 1978). Zijev stoga treba razlikovati od širine diskontinuiteta koja je definirana kao udaljenost susjednih stjenki diskontinuiteta, bez obzira sadrži li on ispunu ili ne (ISRM, 1978). Zijev i širina diskontinuiteta prikazani su na slici 2-6.



Slika 2-6 Zijev i širina diskontinuiteta (Pollak, 2007).

Zijev diskontinuiteta u dubljim dijelovima stijenske mase uglavnom je milimetarskih dimenzija ili su diskontinuiteti u potpunosti zatvoreni, dok je na površini terena općenito veći, kao posljedica rasterećenja stijenske mase. Zijev diskontinuiteta i pripadajući opisi definirani prema preporukama ISRM-a prikazani su u tablici 2-5.

Tablica 2-5 Opis zijeva diskontinuiteta (ISRM, 1978).

Zijev (mm)	Opis zijeva	Opis diskontinuiteta
< 0,1	Vrlo stisnut	Zatvoren
0,1 – 0,25	Stisnut	
0,25 – 0,5	Djelomično uzak	
0,5 – 2,5	Uzak	Poluzatvoren
2,5 – 10	Srednje širok	
>10	Širok	
10 – 100	Vrlo širok	Otvoren
100 – 1000	Ekstremno širok	
>1000	Kavernozni	

2.2.6. Ispuna diskontinuiteta

Ispuna diskontinuiteta je materijal koji se nalazi između susjednih stjenki diskontinuiteta te ispunjava prostor između njih (ISRM, 1978). Ispuna diskontinuiteta najčešće su materijali sekundarnog podrijetla koji se razlikuju od osnovne stijene, a riječ je o koherentnim (prah, glina) ili nekoherentnim tlima (šljunak i pijesak) te o čvrstoj mineralnoj ispuni..

Kvaliteta i vrste ispune diskontinuiteta ima značajan utjecaj na fizička i mehanička svojstva stijenske, posebno kada je riječ o čvrstoći, deformabilnosti i vodopropusnosti. U slučaju izostanka ispune posmična čvrstoća diskontinuiteta ovisi o čvrstoći i hrapavosti stjenki diskontinuiteta, dok su za ispunjene diskontinuitete fizičke i mehaničke značajke ispune od ključne važnosti za definiranje posmične čvrstoće. Fizičko-mehanička svojstva ispune ovisi o mnogo faktora od kojih su najvažniji:

- debljina ispune,
- mineralni sastav materijala ispune,
- veličina i vrsta čestica,
- stupanj prekonsolidacije,
- sadržaj vode i propusnost.

Svojstva ispune trebaju biti određena za svaki set diskontinuiteta posebno, pri čemu posebnu pažnju treba posvetiti određivanju debljine ispune. Prilikom određivanja debljine ispune potrebno je odrediti njenu najmanju, najveću i najučestaliju vrijednost. Čvrstoća ispune diskontinuiteta određuje se standardnim terenskim metodama procjene čvrstoće kao što su procjena prstima, šiljkom ili geološkim čekićem. Ukoliko je riječ o mekšoj ispuni čvrstoća se može odrediti džepnim penetrometrom, a kod krute ispune Schmidtovim čekićem. Stupanj prekonsolidacije (OCR) utječe na fizikalno-mehanička svojstva glinovitih ispuna.

2.2.7. Čvrstoća stjenki diskontinuiteta

Tlačna čvrstoća stjenki diskontinuiteta važan je parametar za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta te deformabilnosti osobito u slučaju izostanka ispune, tj. direktnog kontakta stjenki diskontinuiteta (ISRM, 1978). Uvjetovana je stanjem alteracije i trošnosti stjenki diskontinuiteta pa je stoga važno sa posebnom pažnjom utvrditi stupanj trošnosti diskontinuiteta (ISRM, 1978). Na terenu se čvrstoća stjenki diskontinuiteta određuje Schmidtovim čekićem ili pomoću priručnih sredstava za terensku identifikaciju tlačne čvrstoće.

2.2.8. Vlažnost i propusnost diskontinuiteta

Voda se u stijenskoj masi nalazi u porama ili u diskontinuitetima (ISRM, 1978). Poznavanje mehanizama kretanja i zadržavanja vode od velike je važnosti pri analizi stabilnosti stijenske mase. Kako je intaktna stijena dominantno male propusnosti glavnina toka vode događa se upravo po diskontinuitetima. Iz tog je razloga važno poznavati lokalne hidrogeološke uvijete i prepoznati koji pojedinačni diskontinuiteti ili setovi diskontinuiteta dominantno sudjeluju u procjeđivanju vode.

Prema ISRM (1978) količina procjeđivanja ovisi o otvorenosti (zijeju) diskontinuiteta, te o vrsti ispune, ukoliko je prisutna. Veći zijej omogućava veće procjeđivanje vode, dok glinovita ispuna djeluje kao barijera procjeđivanju. Procjeđivanje u ispunjenim i otvorenim diskontinuitetima može se procijeniti prema tablici 2-6 (ISRM, 1978).

Tablica 2-6 Ocjena stupnja procjeđivanja vode (ISRM, 1978).

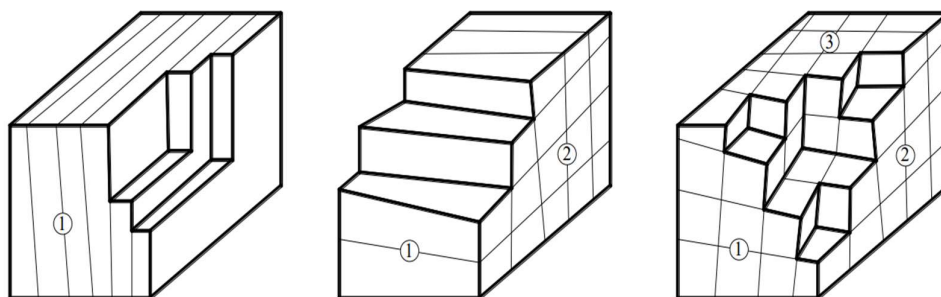
Ocjena propusnosti	Otvoreni diskontinuitet	Ispunjeni diskontinuitet
I	Diskontinuitet je vrlo uzak i suh, tok vode duž diskontinuiteta ne čini se vjerojatnim	Materijal ispune je prekonsolidiran i suh, značajan protok nije vjerojatan zbog niske propusnosti
II	Diskontinuitet je suh bez naznaka tečenja vode	Materijal ispune je vlažan, nema prisutne slobodne vode
III	Diskontinuitet je suh, ali postoje naznake tečenja vode, npr. hrđave mrlje	Materijal ispune je mokar, povremeno kapanje vode
IV	Diskontinuitet je vlažan, ali nije prisutna slobodna voda	Materijal ispune pokazuje znakove ispiranja, kontinuiran protok vode (l/min)
V	Diskontinuitet ukazuje na procjeđivanje, prisutne povremene kapljice vode, ali nema kontinuiranog protoka	Materijal ispune lokalno je ispran, značajan protok vode uzduž ispranih kanala (l/min, pritisak: slab, srednji, visok)
VI	Prisutan je kontinuirani protok vode (procijeniti u l/min i opisati pritisak)	Materijal ispune potpuno je ispran, veliki pritisci vode osobito pri prvom otvaranju (l/min)

2.2.9. Broj setova diskontinuiteta

Fizičko-mehanička svojstva i ponašanje stijenske mase u direktnoj je vezi sa brojem setova diskontinuiteta. Broj setova diskontinuiteta utječe na opću stabilnost i deformabilnost stijenske mase. Veliki broj setova diskontinuiteta na malom razmaku preduvjet je za nastanak kružne plohe sloma u stijenskoj masi, gdje orijentacija diskontinuiteta nema gotovo

nikakvu ulogu (ISRM, 1978). S druge strane, masivna stijenska masa bez izraženih setova smatra se stabilnom sa niskom mogućnosti sloma.

Broj setova diskontinuiteta određuje se terenskim opažanjem i mjerenjem velikog broja diskontinuiteta i njihovim grupiranjem ovisno o orijentaciji (slika 2-8). U konačnici, broj familija diskontinuiteta može se odrediti iz konturnih dijagrama.



Slika 2-8 Stijenska masa sa različitim brojem familija diskontinuiteta (Pollak, 2007).

Broj setova diskontinuiteta određuje se zasebno za svaku inženjerskogeološku zonu. Pritom treba razlikovati diskontinuitete koji pripadaju nekom od setova od pojedinačnih diskontinuiteta (ISRM, 1978). Diskontinuiteti koji pripadaju nekom od setova pokazuju određenu pravilnost u pojavljivanju, dok pojedinačni diskontinuiteti presijecaju stijensku masu bez pravilnosti pojavljivanja. Prema preporukama Međunarodnog društva za mehaniku stijena (1978) broj familija diskontinuiteta može se opisati prema tablici 2-7.

Tablica 2-7 Broj grupa diskontinuiteta (ISRM, 1978).

Ocjena na temelju broja diskontinuiteta	Opis
I	Masivna stijena, povremene slučajne pukotine
II	Jedna grupa diskontinuiteta
III	Jedna grupa diskontinuiteta sa slučajnim pukotinama
IV	Dvije grupe diskontinuiteta
V	Dvije grupe diskontinuiteta uz povremene slučajne pukotine
VI	Tri grupe diskontinuiteta
VII	Tri grupe diskontinuiteta uz povremene slučajne pukotine
VIII	Četiri ili više grupa diskontinuiteta
IX	Razlomljena stijena, nalik na tlo

2.2.10. Veličina bloka stijenske mase

Veličina blokova stijenske mase je važan je indikator njenog mehaničkog ponašanja u određenom stanju naprezanja. Dimenzije i oblik blokova određeni su razmakom diskontinuiteta, brojem setova i postojanošću diskontinuiteta (ISRM, 1978) te su vrlo važan parametar mnogih klasifikacijskih sustava (Bieniawski, 1973, Barton et al., 1974, Stille i Palmstrom, 2003, Cai et al., 2004, Kim et al., 2007, Elmo et al., 2014). Stijenska masa sačinjena od dominantno velikih blokova, u slučaju podzemnih iskopa, ima povoljna svojstva zbog međusobno uklještenja blokova što povećava stabilnost, dok postojanje malih blokova uvjetuje nastanak kružnog sloma stijenske mase, gdje orijentacija diskontinuiteta nema gotovo nikakvu ulogu (ISRM, 1978, Gottsbacher, 2017). Veličina i oblik bloka ima utjecaja i na rezultat iskopa u stijenskoj masi. Efikasnost miniranja u stijenskoj masi funkcija je in-situ distribucije veličine bloka (*engl. in situ block-size distribution*). Iz tog se razloga stijenska masa često klasificira upravo na temelju in-situ distribucije veličine bloka, kao što se tla klasificiraju na temelju granulometrijskog sastava.

Veličina bloka može se opisati prema prosječnoj veličini bloka stijenske mase (indeks veličine bloka I_b) ili prema ukupnom broju diskontinuiteta koji presijecaju volumen intaktne stijene (volumetrijski broj pukotina J_v) (ISRM, 1978).

Indeks veličine bloka (I_b) predstavlja prosjek dimenzija reprezentativnog bloka stijenske mase (ISRM, 1978). Indeks veličine bloka (I_b) može se procijeniti vizualnim odabirom nekoliko tipičnih veličina blokova te mjerenjem njihovih prosječnih dimenzija. Budući da vrijednosti indeksa veličine bloka (I_b) mogu varirati od nekoliko milimetara do nekoliko metara, točnost mjerenja od 10% smatra se dostatnom. U sedimentnim stijenama dva međusobno okomita seta diskontinuiteta zajedno sa plohom slojevitosti često tvore pravilne kubične, tetraedralne ili prizmatske blokove pa je I_b prema izrazu (ISRM, 1978):

$$I_b = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3} \quad (2-2)$$

gdje su S_1 , S_2 i S_3 – prosječne vrijednosti razmaka diskontinuiteta.

Na temelju poznavanja prosječnih vrijednosti razmaka međusobno paralelnih diskontinuiteta (S_1 , S_2 i S_3), te kutova koje međusobno zatvaraju moguće je odrediti volumen bloka prema izrazu (Palmstrom, 1995):

$$V_b = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{\sin\gamma_1 \cdot \sin\gamma_2 \cdot \sin\gamma_3} \quad (2-3)$$

gdje su S_1 , S_2 i S_3 – prosječne vrijednosti razmaka diskontinuiteta, a γ_1 , γ_2 , γ_3 – prostorni kutovi između diskontinuiteta pojedinog seta. Obzirom na proračunate vrijednosti volumen bloka stijenske mase može se klasificirati prema tablici 2-8. (Palmstrom, 1995)

Tablica 2-8 Klasifikacija volumena bloka stijenske mase (Palmstrom, 1995).

Opis	V_b
Vrlo mali	10-200 cm ³
Mali	0,2-10 dm ³
Umjereni	10-200 dm ³
Veliki	0,2-10 m ³
Vrlo veliki	>10 m ³

Volumetrijski broj pukotina (J_v) definiran je kao broj pukotina u jediničnom volumenu stijenske mase (m³), a služi za ocjenu razlomljenosti (degradacije) stijenske mase (Palmstrom, 1995.):

$$J_v = \sum \frac{1}{S_i} = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{1}{S_n} \quad (2-4)$$

gdje je S prosječna vrijednost razmaka diskontinuiteta pojedinog seta.

Postojanje pojedinačnih diskontinuiteta također treba uzeti u obzir prilikom određivanja volumetrijskog broja pukotina. Za tu je potrebnju Palmstrom (1982) izveo empirijsku formulu koja uključuje postojanje pojedinačnog diskontinuiteta:

$$J_v = \sum \frac{1}{S_i} + \frac{N_r}{5\sqrt{A}} \quad (2-5)$$

gdje je S prosječna vrijednost razmaka diskontinuiteta pojedinog seta, N_r broj nasumičnih diskontinuiteta i A površina uzorkovanja u m². Klasifikacija volumetrijskog broja pukotina prikazana je u tablici 2-9, a klasifikacija veličine bloka s obzirom na volumetrijski broj pukotina u tablici 2-10.

Tablica 2-9 Klasifikacija volumetrijskog broja pukotina (Palmstrom, 1982).

Opis	J_v
Ekstremno nizak	<0,3
Vrlo nizak	0,3-1
Nizak	1-3
Umjeren	3-10
Visok	10-30
Vrlo visok	30-100
Ekstremno visok	>100

Tablica 2-10 Klasifikacija veličine bloka u ovisnosti o volumetrijskom broju pukotina (ISRM, 1978).

Opis	J_v
Vrlo veliki blokovi	<1,0
Veliki blokovi	1-3
Srednji blokovi	3-10
Mali blokovi	10-30
Vrlo mali blokovi	>30
Razlomljena stijenska masa	>60

Veličina bloka stijenske mase usko je povezana i s njegovim oblikom. Prema obliku, stijenski blokovi mogu biti: kubični, romboedarski, tetraedarski te pločasti. Pravilni geometrijski oblici blokova su izuzetak budući da različite familije diskontinuiteta najčešće ne zatvaraju prave kutove. Kako bi se dobio generalni dojam o obliku i veličini bloka stijenska masa može biti opisana prema tablici 2-11.

Tablica 2-11 Opis stijenske mase na temelju veličine i oblika bloka (ISRM, 1978).

Stijenska masa	Opis
Masivna	Nekoliko diskontinuiteta na velikom razmaku
Blokovita	Blokovi ujednačenih dimenzija
Pločasta	Jedna dimenzija znatno manja od preostale dvije
Štapičasta	Jedna dimenzija znatno veća od preostale dvije
Nepravilna	Velike varijacije u veličini i obliku bloka
Razlomljena	Vrlo mali razmak diskontinuiteta

Osim što oblik bloka može biti opisan kvalitativno (tablica 2-11), moguće ga je i točno definirati. Prema Palmstrom (1995) točan oblik bloka definiran je na temelju faktora oblika bloka (β):

$$\beta \approx 20 + 7 \frac{a_3}{a_1} \quad (2-6)$$

gdje je a_3 i a_1 – najmanja i najveća dimenzija bloka. Navedeni izraz uzima u obzir samo najduži i najkraći dimenziju bloka, otklanjajući time ograničenje da je blok formiran kao rezultat presijecanja tri para paralelnih ploha (Palmstrom, 1995). Klasifikacija oblika bloka obzirom na definiranu vrijednost faktora oblika bloka (β) prikazana je u tablici 2-12.

Palmstrom (1995) je predložio i korelaciju između volumetrijskog broja pukotina (J_v) i volumena bloka (V_b) koristeći upravo faktor oblika bloka (β) kao korelacijski faktor:

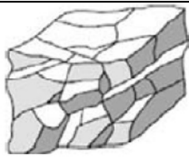
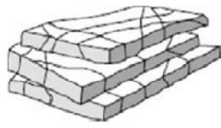
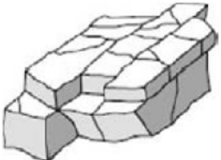
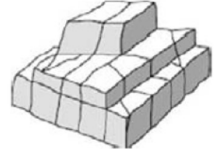
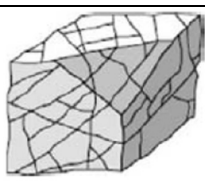
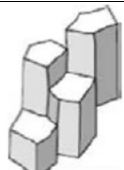
$$V_b = \beta \cdot J_v^{-3} \quad (2-7)$$

Tablica 2-12 Klasifikacija faktora oblika bloka (Palmstrom, 1995).

Faktor oblika bloka (β)	Opis oblika bloka
27	Ekvidimenzionalan
28-32	Neznatno izdužen ili pločast
33-59	Umjereno izdužen ili pločast
0-200	Jako izdužen ili pločast
>200	Ekstremno izdužen ili pločast

Za praktičnu primjenu oblici blokova mogu se aproksimirati pravilnim geometrijskim tijelima. Osim što na oblik bloka utjecaj ima duljina diskontinuiteta koji se presijecaju, važni su i kutovi koje njihove plohe zatvaraju. Zbog neuključenosti međusobnih kutova koje zatvaraju diskontinuiteta u parametar β , Palmstrom (2005) je predložio novu klasifikaciju oblika bloka prikazanu u tablici 2-13.

Tablica 2-13 Opis strukture i oblika bloka stijenske mase (Palmstrom, 2005, ISRM, 1978).

Naziv oblika blok	Prikaz oblika bloka	Opis
Polihedralni blok		Nepravilna mreža diskontinuiteta bez postojanja dominantnih setova
Pločasti blok		Jedan dominantan set diskontinuiteta kao što je slojevitost; debljina bloka znatno manja od duljine i širine
Prizmatski blok		Dva dominantna seta diskontinuiteta, međusobno paralelni, treći nepravilan set diskontinuiteta
Ekvidimenzionalan blok		Tri dominantna seta diskontinuiteta, međusobno okomita
Romboedarski blok		Tri ili više dominantnih setova diskontinuiteta
Stupičasti blok		Nekoliko dominantnih setova diskontinuiteta

2.3. Geološki indeks čvrstoće (GSI)

Hoek i Brown (1980) su definirajući Hoek-Brownov kriterij čvrstoće utvrdili da isti nema inženjerski smisao ukoliko se ne može povezati sa geološkim opažanjima i uvjetima na terenu. U vidu nepostojanja adekvatne klasifikacije stijenske mase koja bi mogla uspostaviti vezu između strukture stijenske mase (blokovitosti) i stanja diskontinuiteta u cilju procjene čvrstoće stijenske mase razvijen je Geološki indeks čvrstoće (*engl. Geological strength index, GSI*). Geološki indeks čvrstoće razvijen je dugi niz godina, a problematika njegova razvoja obrađena je u nizu značajnih znanstvenih publikacija kao što su Hoek (1994), Hoek et al., (1995), Hoek i Brown (1997).

Osnovni problem inicijalne primjene GSI sustava za karakterizaciju stijenske mase je njegova velika podudarnost sa vrijednostima RMR klasifikacije (Marinos et al. 2007). Daljnji razvoj klasifikacijskog sustava (Hoek et al., 1998, Marinos i Hoek, 2000, 2001) uključio je i primjenu klasifikacijskog sustava na heterogene stijenske mase, te stijenske mase slabe kvalitete čime je nastao GSI sustav kakav danas poznajemo.

Geološki indeks čvrstoće kvalitativni je klasifikacijski sustav koji se temelji na ocjeni litologije, strukture (blokovitosti) i stanja diskontinuiteta stijenske mase, čija uspješnost primjene ponajprije ovisi o iskustvu inženjera geologije. Postupak se zasniva na vizualnoj ocjeni navedenih parametara na prirodnim izdancima, zasjecima linijskih građevina, tunela, te jezgri istraživačkih bušotina. Osnovni cilj ovako razvijenog kvalitativnog sustava je otkloniti numeričko bodovanje karakteristika diskontinuiteta budući da kvantitativna ocjena njihova ponašanja nema inženjerski smisao u slučaju slabih i kompleksnih stijenskih masa (Marinos et al., 2007). Također, važno je naglasiti da je osnovna namjena GSI klasifikacije osigurati ulazni parameter za procjenu čvrstoće stijenske mase, a ne zamijeniti Q i RMR klasifikaciju u vidu projektiranja podgradnih sustava.

Sonmez i Ulusay (1999) uveli su u praktičnu primjenu kvantitativnu verziju GSI klasifikacije (slika 2-9). Kvantifikacija uključuje uvođenje dva nova parametra: ocjena diskontinuiteta (*engl. Surface condition rating, SCR*), te ocjena strukture stijenske mase (*engl. Structure rating, SR*). Ocjena diskontinuiteta SCR uključuje procjenu hrapavosti (R_r), ispune (R_f) i trošnosti (R_w) stjenki diskontinuiteta prema metodologiji preuzetoj iz RMR klasifikacije (Bieniawski, 1989). Sukladno tomu, ocjena uvjeta površine diskontinuiteta računa se prema izrazu:

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad (2-8)$$

gdje su R_r , R_w i R_f – ocjena hrapavosti, trošnosti i ispune diskontinuiteta.

Ocjena strukture stijenske mase (SR) kao ulazni podatak koristi volumetrijski broj pukotina J_v prema izrazu (Sonmez i Ulusay, 1999):

$$SR = -17,5 \ln(J_v) + 79,8 \quad (2-9)$$

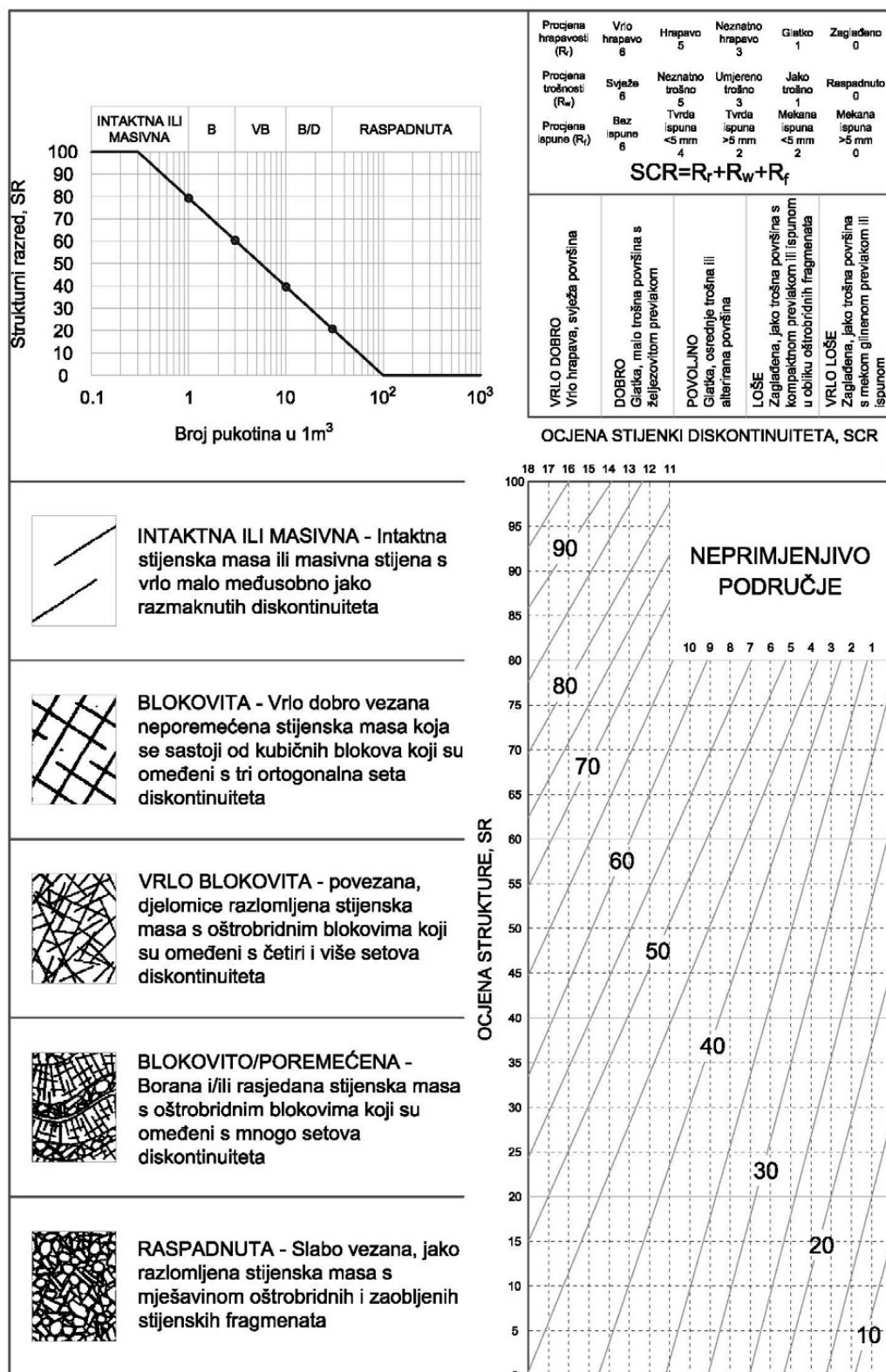
Kvantifikaciji Geološkog indeksa čvrstoće treba pristupiti sa oprezom. Proces kvantifikacije ovog sustava usko je ograničen na one stijenske mase kod kojih se frekvencija pojavnosti i orijentacija diskontinuiteta može jasno odrediti. Kvantifikaciju također nije moguće provesti u uvjetima tektonski poremećene stijenske mase (Marinos et al., 2007). U takvom sustavu Sonmez i Ulusay (1999) predlažu upotrebu originalnog GSI sustava koji se zasniva na kvalitativnoj ocjeni litologije, strukture stijenske mase, te stanja diskontinuiteta.

Iz toga proizlazi da je kvantifikaciju GSI sustava moguće provesti samo u slučaju kada je $35 < GSI < 75$, te kada je slom uvjetovan karakteristikama diskontinuiteta, a ne čvrstoćom intaktne stijene.

Prilikom procjene GSI vrijednosti na terenu, svakoj je inženjerskogeološkoj zoni potrebno dodijeliti raspon vrijednosti GSI-a, a ne jednu egzaktnu vrijednosti (Hoek i Brown, 1997). Vrijednosti GSI klasifikacije moguće je dobiti korelacijom sa RMR klasifikacijom. Autori tako predlažu korelaciju RMR vrijednosti sa vrijednostima GSI klasifikacije za $RMR_{89} > 23$ prema izrazu (Hoek et al., 1995):

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (2-10)$$

Za vrijednosti $RMR_{89} < 23$ nije moguće koristiti navedenu korelaciju već se predlaže korištenje Q klasifikacijskog sustava.



Slika 2-9. Kvantitativni GSI klasifikacijski sustav (Sonmez i Ulusay, 1999).

2.4. Daljinske metode istraživanja i njihova primjena u inženjerskoj geologiji

Daljinska istraživanja u inženjerstvu omogućavaju prikupljanje informacija o objektu bez fizičkog kontakta istraživača sa predmetom istraživanja. Klasične manualne metode prikupljanja podataka o stijenskoj masi u inženjerskoj geologiji sastoje se od prikupljanja informaciji o orijentaciji diskontinuiteta korištenjem geološkog kompasa, te vizualnim opisom karakteristika diskontinuiteta i karakteristika stijenske mase. Manualne metode imaju niz nedostataka od kojih su najznačajniji: dugotrajnost, subjektivnost u provođenju mjerenja, te nemogućnost uzimanja mjerenja na većim visinama. Sve navedeno rezultira reduciranim brojem izmjerenih podataka. Primjena daljinskih metoda istraživanja smanjuje vrijeme potrebno za boravak na terenu i povećava vrijeme dostupno za kartiranje u kabinetu. Upravo osiguravanje dodatnog vremena za kartiranje struktura povećava broj prikupljenih podataka, a s time i veću objektivnost (Buyer, 2018). Tehnike daljinskih istraživanja počinju u potpunosti zamjenjivati klasične metode prikupljanja podataka iz sljedećih razloga (Gaich et al., 2006):

- ponovljivost i objektivnost rezultata
- reducirano vrijeme za prikupljanje podataka na terenu
- povećana razina preciznosti
- povećana sigurnost kod prikupljanja podataka i dostupnost inače nedostupnih mjesta
- mogućnost automatizacije procesa prikupljanja podataka.

Do danas je razvijen veliki broj daljinskih metoda za prikupljanje podataka čiji je osnovni cilj dobivanje 3D oblaka točaka (*engl. Point Cloud*). U području kartiranja stijenskih pokosa i čela iskopa tunela izdvajaju se dvije metode (Poropat, 2006):

- lasersko skeniranje (LS),
- digitalna fotogrametrija (DP).

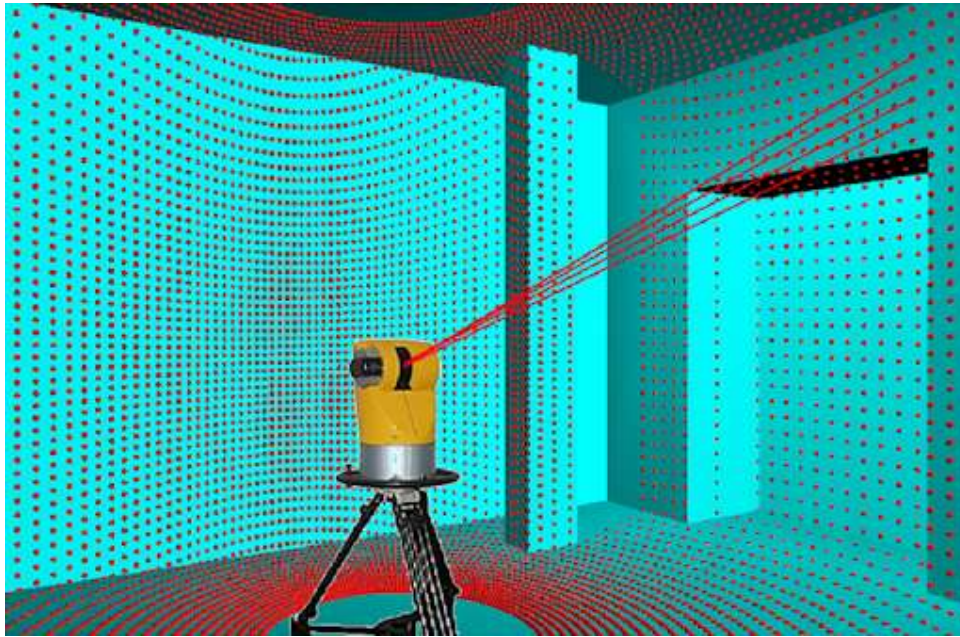
Metoda laserskog skeniranja automatizirana je i vrlo efikasna metoda prikupljanja prostornih podataka upotrebnom lasera. Metoda se službeno naziva LiDAR (*engl. Light Detection And Ranging*) i zasniva se na mjerenju kuta i udaljenosti do određene točke u području snimanja (Lasić, 2008). Metoda laserskog skeniranja ima niz prednosti nad metodama klasičnog prikupljanja prostornih podataka i to iz tri razloga:

- točnost

- produktivnost - prikupljanje velikog broja točaka u kratkom vremenu
- LiDAR je monokromatski sustav sa vlastitim osvjetljenjem.

Primjena laserskog skeniranja osobito je važna u prikupljanju prostornih informacija o nepravilnim površinama, kao što je na primjer površina terena. Mogućnost LiDAR tehnologije da laserske zrake prolaze kroz vegetaciju i registriraju površinu terena daju joj veliku prednost naspram ostalih metoda daljinskog prikupljanja podataka. Upravo joj te karakteristike omogućuju generiranje vrlo preciznih digitalnih modela visina (*engl. DEM*). Generirani digitalni modela visina vrlo su velike preciznosti (± 1 mm), te velike gustoće točaka (razmak između pojedinih točaka često je manji od milimetra) što omogućava realan prikaz površine terena (Lasić, 2008). Uz informacije o prostornom položaju (X, Y i Z koordinata) svakoj točki u oblaku točaka pridružen je i podatak o RGB (*engl. Red, Green, Blue*) modelu boje reflektirane površine, što omogućava vrlo realan prikaz površina nalik na fotografiju. Digitalni model visina (DEM) dobiven metodom laserskog skeniranja pravilno je pozicioniran u prostoru, te je predstavljen svojim apsolutnim (geodetski koordinatni sustav) ili relativnim (lokalni koordinatni sustav) koordinatama. Ovisno o veličini površine koja se skenira i položaju laserskog skeniranja, razlikuju se terestričko lasersko skeniranje (TLS) i lasersko skeniranje iz zraka (ALS).

Terestričko lasersko skeniranje (slika 2-10) predstavlja metodu prikupljanja prostornih podataka o objektu pomoću skenera koji se nalazi na površini terena. Ovakav način skeniranja pogodan je za strme površine (stijenski pokosi), te za objekte kao što su zgrade, mostovi i tuneli. Osnovne karakteristike TLS-a su pojedinačna mjerenja, nekontroliran odabir točaka, mali uloženi trud po točki mjerenja, kvaliteta je opisnog karaktera, te se vrši odabir snimljenih točaka u uredu (*engl. postprocessing*). Terestrički laserski skeneri mogu se kategorizirati obzirom na tri kriterija, prema načinu (principu) snimanja, načinu mjerenja udaljenosti, te načinu prikupljanja oblaka točaka (Miler, 2007).

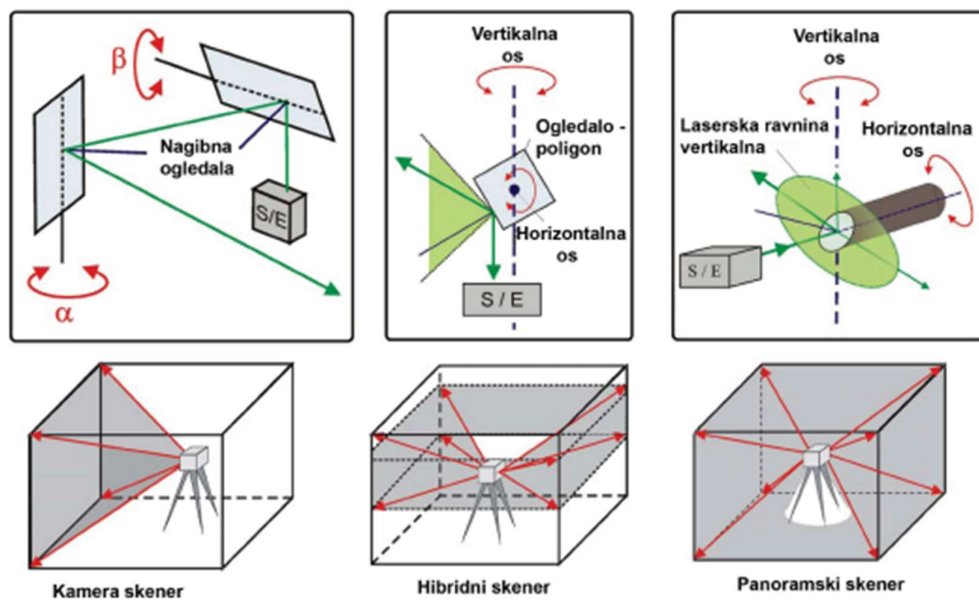


Slika 2-10 Terestrički laserski skener (TLS).

Terestrički laserski skeneri se obzirom na način snimanja dijele na (Miler, 2007):

- skeneri-kamere – ograničeni prozor snimanja,
- hibridni skeneri – ograničenje samo po vertikalnoj osi,
- panoramski skeneri – neograničen prozor snimanja.

Principi snimanja za navedene skenere prikazani su na slici 2-11.

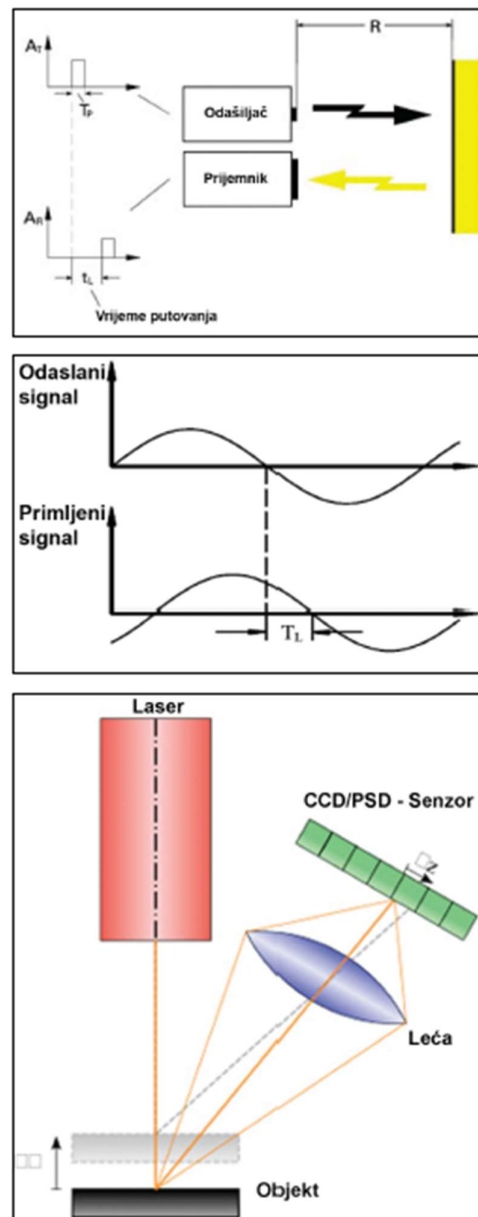


Slika 2-11 Shematski prikaz tri vrste skenera prema načinu snimanja (Miler, 2007).

Točnost i domet terestričkog laserskog skeniranja uvelike ovisi i o načinu mjerenja udaljenosti, a danas se primjenjuju tri različite tehnologije (Miler, 2007):

- pulsni skeneri – mjerenje vremena između odaslanog i primljenog signala,
- fazni skeneri – mjerenje razlike faza između odaslanog i primljenog signala,
- triangulacijski skeneri – princip optičke triangulacije.

Principi mjerenja udaljenosti za navedene skenere prikazani su na slici 2-12.



Slika 2-12 Shematski prikaz pulsnog, faznog i triangulacijskog načina mjerenja udaljenosti (Miler, 2007).

Posljednja podjela terestričkih laserskih skenera je ona na temelju načina prikupljanja oblaka točaka. S obzirom na to imaju li mogućnost automatskog georeferenciranja terestrički laserski skeneri se dijele na (Miler, 2007):

- skeneri sa kompenzatorom – omogućuju georeferencijiranje na terenu,
- skeneri bez kompenzatora – moguće je naknadno georeferenciranje ukoliko postoje točke poznatih koordinata (engl. *Ground Control Points*).

Do danas je razvijen veliki broj daljinskih metoda za prikupljanje podataka u inženjerskoj geologiji, a zajedničko im je omogućuju daljinsko prikupljanje podataka i analizu diskontinuiteta koristeći dva različita pristupa (Buyer, 2018):

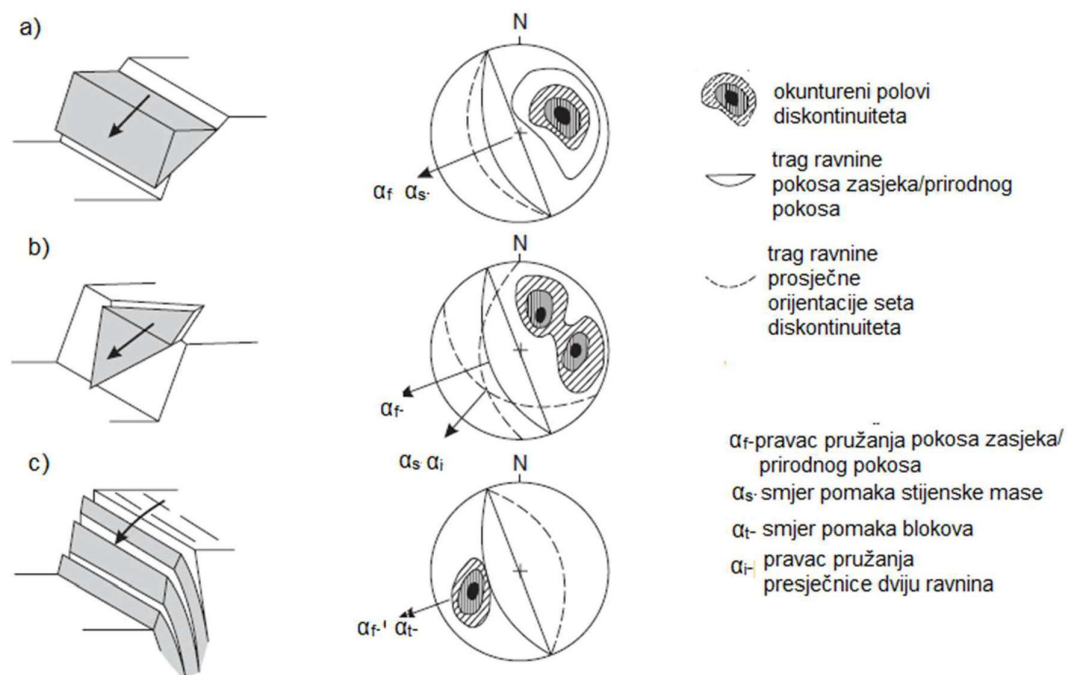
- vektorska analiza diskontinuiteta – generiranje digitalnog modela površine i 3D oblaka točaka,
- rasterska analiza diskontinuiteta – analiza 2D fotografija.

Vektorska analiza diskontinuiteta obuhvaća proces dodjeljivanja vektora normala svakoj točki u 3D oblaku točaka, te definiranju njene orijentacije u prostoru (Buyer, 2018). Znajući orijentaciju vektora normale svake točke, te broj susjednih, koplanarnih, jednako orijentiranih točaka, Jaboyedoff et al. (2007) su definirali metodologiju za određivanje planarnih površina, odnosno ploha diskontinuiteta. Na tržištu je dostupno nekoliko komercijalnih softwera za detekciju površina diskontinuiteta poput Split-FX (Slob et al., 2005) i Coltop-3D (Jaboyedoff et al., 2007), međutim njihova primjena je ograničena obzirom na visoku cijenu. U okviru programskog jezika Matlab također je razvijeno nekoliko softwera poput DiAna (Gigli i Casagli, 2011) i PlaneDetect (Voge et al., 2013), međutim oni nisu javno dostupni.

Većina današnjih softwera za automatsku i poluautomatsku detekciju diskontinuiteta koriste nepravilne triangulirane mreže (engl. *TIN*) za simplifikaciju površina diskontinuiteta (Gigli i Casagli, 2011, Slob et al., 2007). Iskorak u metodi automatske detekcije diskontinuiteta napravljen je razvojem *Discontinuity Set Extractor (DSE)*, javno dostupnog softwera za detekciju diskontinuiteta na izvornim podacima 3D oblaka točaka (Riquelme et al., 2014). Uz navedene softvere veliku primjenu u daljinskim istraživanjima u inženjerskoj geologiji ima *CloudCompare*. Razlog raširenoj primjeni leži u činjenici da je riječ o *open source* softveru koji omogućava generiranje, manipulaciju te obradu 3D oblaka točaka i mreža.

2.5. Kinematička analiza stabilnosti

Prilikom izgradnje linijskih objekata poput cesta i željeznica potrebno je duž planirane trase potrebno je osigurati stabilnost stijenskih pokosa. Kako bi se mogli projektirati stabilni pokosi potrebno je prikupiti podatke o strukturnim značajkama stijenske mase, u svrhu određivanja potencijalnih mehanizama sloma. Proces identifikacije potencijalnih nestabilnosti naziva se kinematička analiza. Analiza se provodi na temelju ucrtanih polova diskontinuiteta na stereografskoj projekciji koja uključuje i trag zasljeska stijenske mase budući da se slom može dogoditi jedino kao rezultat pomaka prema slobodnoj površini (Wyllie i Mah, 2005). Obzirom na prostorni odnos položaja diskontinuiteta i zasljeska definirana su 3 mehanizma sloma: planarni slom, klinasti slom i prevrtanje (slika 2-13).



Slika 2-13 Glavni mehanizmi sloma stijenske mase: a) planarni slom, b) klinasti slom, c) prevrtanje (modificirano prema Wyllie i Mah, 2005.).

Planarni slom u stijenskoj masi (slika 2-12, a)) događa se duž geološkog diskontinuiteta koji je nepovoljno orijentiran u odnosu na orijentaciju zasljeska, te na njemu isklinjava. Prema Wyllie i Mah (2005.) sljedeći uvjeti moraju biti zadovoljeni da bi došlo do planarnog sloma stijenske mase: (1) diskontinuitet isklinjava na zasljesku, (2) kut nagiba diskontinuiteta manji je od kuta nagiba zasljeska, (3) smjer nagiba diskontinuiteta približno je jednak smjeru nagiba

zasjeka ($\pm 20^\circ$), (4) kut nagiba diskontinuiteta mora biti veći od kuta unutarnjeg trenja diskontinuiteta.

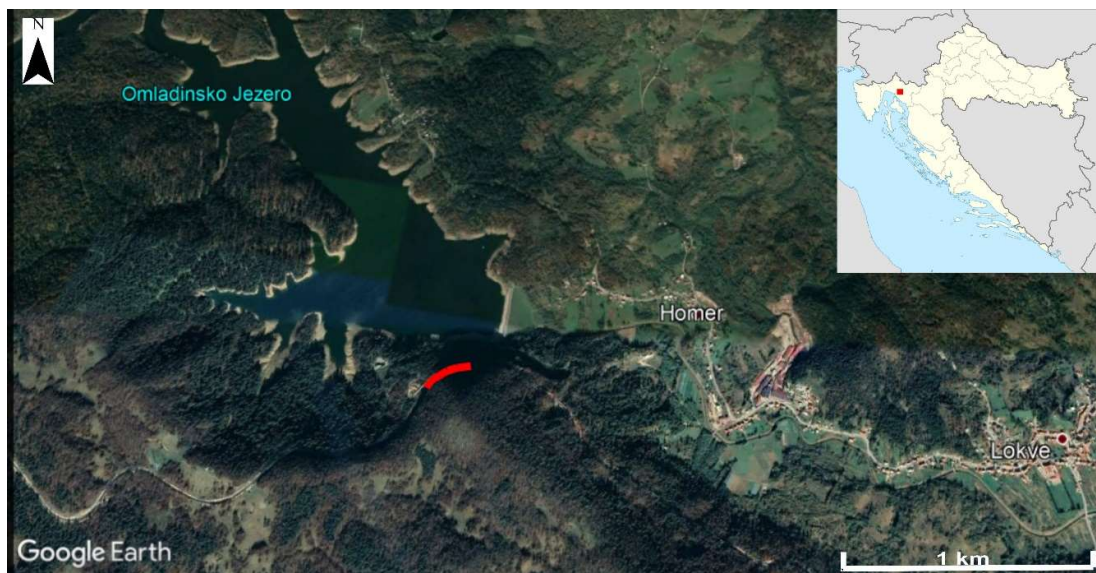
Klinasti slom u stijenskoj masi (slika 2-12, b)) događa se duž presječne dva ili više diskontinuiteta koja mora isključivati nazasjeku. Prema Wyllie i Mah (2005) sljedeći uvjeti moraju biti zadovoljeni da bi došlo do klinastog sloma stijenske mase: (1) kut nagiba presječne dva diskontinuiteta mora biti veći od kuta unutarnjeg trenja, (2) kut nagiba presječne dva diskontinuiteta mora biti manji od nagiba zasjeka.

Prevrtanje predstavlja oblik sloma u stijenskoj masi kod kojeg dolazi do rotacije odvojenog bloka stijenske mase prema naprijed. Da bi došlo do prevrtanja nužno je postojanje dva međusobno okomita diskontinuiteta, jednog okomitog, a jednog približno paralelnog zasjeku. Prema Wyllie i Mah (2005) sljedeći uvjeti moraju biti zadovoljeni da bi došlo do prevrtanja: (1) diskontinuitet mora padati u kosinu, (2) smjer kuta nagiba diskontinuiteta mora biti unutar $\pm 10^\circ$ od smjera nagiba zasjeka, (3) kut nagiba diskontinuiteta mora biti veći od kuta nagiba kritične klizne plohe, (4) kut nagiba kritične klizne plohe jednak je razlici kuta nagiba kosine i kuta unutarnjeg trenja, (5) smjer nagiba kritične klizne plohe jednak je smjeru nagiba lica zasjeka.

3. PRIRODNE ZNAČAJKE ISTRAŽIVANOG PRODUČJA

Istraživani stijenski zasjek nalazi se na državnoj cesti D3 (Goričan-Rijeka) između Delnica i Fužina, u općini Lokve, Gorski kotar. Zasjek je dobio naziv po vrhu Veliki Špićunak (1023 m n.m.) koji je jedan od šest vrhova koji okružuju udolinu u kojoj se smjestila općina Lokve. Istraživana stijenska masa nalazi se stotinjak metara južno od Lokvarskog jezera, nekada poznatog pod nazivom Omladinsko jezero te 2,5 kilometra zapadno od naselja Lokve (slika 3-1).

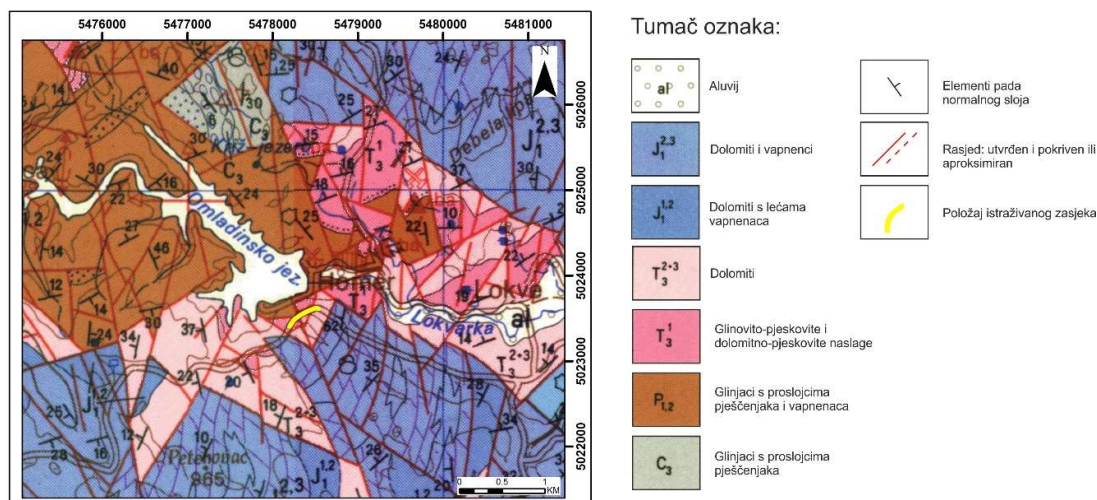
Stijenski zasjek je ukupne duljine veće od 300 metara. Dio stijenskog zasjeka saniran je kombinacijom mlaznog betona, te žičane mreže učvršćene štapnim sidrima. Kao dodatna zaštita od odrona, u podnožju zasjeka izvedena je barijera koja se sastoji od žičane mreže povezane na čelične stupove na međusobnom razmaku 4,0 metra. Preostali dio zasjeka duljine 140 metara potrebno je sanirati, te je upravo ta dionica zasjeka predmet ovog inženjerskogeološkog istraživanja.



Slika 3-1 Geografski položaj istraživanog zasjeka (crvena boja) prikazan na ortofoto karti (preuzeto s www.maps.google.com).

Orijentacija predmetnog zasjeka generalno je prema sjeverozapadu. Zasjek je prosječnog kuta nagiba između 60° i 80° , te visine između 10 i 25 metara. Visina zasjeka, kao i nagib povećavaju se idući s istoka na zapad. Iznad stijenskog zasjeka nalazi se brijeg obrastao crnogoricom, bez vidljivih izdanaka stijena.

Prema Osnovnoj geološkoj karti SFRJ M 1:100.000 – list Delnice (Savić i Dozet, 1983) i pripadajućem tumaču lista Delnice (Savić i Dozet, 1983) šire područje istraživanja izgrađeno je od naslaga karbonske (C_3), permske ($P_{1,2}$), trijaske (T_3^1, T_3^{2+3}), jurske ($J_1^{1,2}, J_1^{2,3}$) i kvartarne (al) starosti, kao što je prikazano na slici 3-2.



Slika 3-2 Isječak iz Osnovne geološke karte SFRJ, M 1:100.000 – list Delnice (istraživani pokos prikazan je žutom linijom) (modificirano prema Savić i Dozet 1983).

Najstarije naslage na širem području istraživanja gornjokarbonske su starosti (C_3) i nalaze se 2 km sjeverno od lokacije istraživanja. Gornjokarbonske naslage predstavljene su glinjacima, pješčenjacima s triticitima te konglomeratično-pješčanim litološkim članovima. Dio ovih naslaga fliškog je karaktera. Prema geološkom stupu prikazanom na listu Delnice (Savić i Dozet, 1983.) debljina karbonskih naslaga iznosi oko 380 metara.

Sjeverno i sjeveroistočno, neposredno od područja istraživanja, nalaze se naslage donjo i srednjopermske starosti ($P_{1,2}$). Ove naslage kontinuirano su istaložene na starije karbonske naslage. Dominantno su zastupljene glinenim i pješčano-glivenim naslagama, te pješčanim i pješčano-konglomeratičnim litološkim članovima. Prema geološkom stupu prikazanom na listu Delnice (Savić i Dozet, 1983) debljina permskih naslaga iznosi oko 1000 metara.

Područje istraživanja izgrađeno je od naslaga gornjotrijaske starosti (T_3^1, T_3^{2+3}), koje su u rasjednom i transgresivnom kontaktu sa starijim permskim naslagama ($P_{1,2}$). Prema tumaču za list Delnice (Savić i Dozet, 1983.) izdvojena su dva litološka člana, odnosno glineno-laporovite, pješčano-tinčaste i dolomitno-laporovito-pješčane naslage koje pripadaju donjem litološkom članu (T_3^1) te glavni dolomiti gornjeg litološkog člana (T_3^{2+3}). Prema

geološkom stupu prikazanom na listu Delnice (Savić i Dozet, 1983) klastične naslage su ukupne debljine 150 metara, dok ukupna debljina glavnog dolomita iznosi 300 metara.

Južno od područja istraživanja, na relativno velikoj površini, prostiru se naslage lijasa ($J_1^{1,2}$, $J_1^{2,3}$). Naslage lijasa predstavljene su naslagama dolomita s lećama vapnenaca ($J_1^{1,2}$), te izmjenom vapnenaca i dolomita ($J_1^{2,3}$) ukupne debljine oko 600 metara.

Najmlađe naslage na širem području istraživanja, a ujedno i na čitavom području lista Delnice su aluvijalni nanosi kvartarne starosti (al). Aluvijalni nanosi vezani su uz riječnu dolinu rijeke Lokvarke, a izgrađeni su dominantno od šljunka, pijeska, gline, te humusno-glinenog materijala. Debljina im je varijabilna, a kreće se od 0,5 m do najviše 4 m.

Prema Savić i Dozet (1983) šire područje istraživanja pripada gorskokotarsko-goteničkoj strukturno-tektonskoj jedinici. Kao što je vidljivo na slici 3-2. područje je ispresijecano nizom rasjeda, neutvrđene kinematike, koji predstavljaju granice između kronostratigrafskih jedinica. Najznačajnija strukturno-tektonska forma na području istraživanja je antiforma Omladinskog jezera. Izgrađena je od gornjokarbonskih i donjo i srednjopermskih stijena u svome središtu, dok su joj krila izgrađena od gronjotrijaskih dolomita i klastita. Antiforma je karakterističnog kružnog oblika (doma) s blago nagnutim slojevima, osim u svojim krilima gdje su isti blago ustrmljeni. Upravo stijenski zasjek Špićunak predstavlja dio jugoistočnog krila navedene antiforme.

Na samoj lokaciji zabilježeno je prisustvo aktivnih geomorfoloških procesa. Zabilježene su lokalne nestabilnosti u obliku odrona nastalih klinastim mehanizmom sloma i prevrtanjem te procesi erozije i trošenja stijenske mase. Stijenska masa istraživanog zasljea je pretežito vrlo blokovita do blokovita/poremećena, te mjestimično raspadnuta (Hoek i Marinos, 2000), umjereno do jako trošna. Na prometnici koja povezuje glavnu državnu cestu D3 i Lokvarsko jezero, u neposrednoj blizini istraživanog zasljea, uočeno je i klizište, koje je u trenutku kartiranja stijenskog zasljea bilo u fazi sanacije.

Pojava površinskih voda na širem području istraživanja karakterizirana je prisutstvom Lokvarskog jezera u podnožju istraživanog zasljea te manjeg povremenog vodotoka u jaruzi, oko 130 m JZ od istraživanog zasljea. Odsudstvo površinskih voda ukazuje na činjenicu da se dominantni tok vode na širem području odvija u podzemlju. Potpusnost naslaga te mehanizam otjecanja podzemnih voda uvjetovan je litološkom građom, strukturnim odnosima te stupnju trošnosti. Karbonatne naslage, odnosno dolomiti gornjeg trijasa, od kojih se sačinjen istraživani zasjek, karakteriziran je visokom trošnosti i visokim stupnjem tektonske oštećenosti što ukazuje na postojanje dominantno sekundarne poroznosti ovih naslaga kojima se odvija glavina podzemnog otjecanja.

4. METODOLOGIJA

U ovom poglavlju opisan je postupak određivanja geometrijskih značajki diskontinuiteta potrebnih za GSI klasifikaciju stijenske mase i kinematičke analize stabilnosti. Geometrijske značajke diskontinuiteta određene su na temelju terenskog inženjerskogeološkog kartiranja i na temelju analize digitalnog 3D modela pokosa stijenske mase dobivenog terestričkim laserskim skeniranjem. Analiza 3D modela provedena je na temelju direktnog očitavanja geometrijskih značajki diskontinuiteta, odnosno manualnim postupkom, te polu-automatski, na temelju čega su određeni setovi diskontinuiteta, njihove orijentacije, razmaci, te postojanost.

4.1. Terensko inženjerskogeološko kartiranje

Svrha terenskog inženjerskogeološkog kartiranja bila je opis geometrije stijenskog zasljeva, izdvajanje inženjerskogeoloških zona s obzirom na stupanj homogenosti, određivanje značajki diskontinuiteta. Inženjerskogeološke zone izdvojene su obzirom na razlike u litologiji, koja uključuje vrstu stijene i njenu trošnost, zatim na temelju orijentacije diskontinuiteta, te značajki diskontinuiteta koje uključuju razmak, postojanost, zijevo, ispunu i hrapavost/valovitost. Nakon što su izdvojene homogene inženjerskogeološke zone pristupilo se opisu stijenske mase. Opisom su obuhvaćene geometrijske značajke diskontinuiteta (orijentacija, razmak i postojanost) te ocjena stanja površine diskontinuiteta (hrapavost, ispunost, trošnost).

Orijentacije dominantnih setova diskontinuiteta mjerene su geološkim kompasom na reprezentativnih polahama pojedinog seta. Određivanje razmaka i postojanosti diskontinuiteta provedeno je mjerenjem mjernom trakom te su opisani sukladno preporukama ISRM-a (ISRM, 1978). Ocjena uvjeta površine diskontinuiteta uključivala je opis hrapavosti, ispune i trošnosti stijeni diskontinuiteta prema metodologiji GSI klasifikacije (Hoek et al., 1998). Na ovaj način provedeno inženjerskogeološko kartiranje omogućilo je prikupljanje podataka potrebnih za ocjenu strukture stijenske mase (SR) i ocjenu uvjeta površine diskontinuiteta (SCR) s ciljem određivanja raspona vrijednosti GSI klasifikacije.

4.2. Manualna identifikacija geometrijskih značajki diskontinuiteta sa 3D digitalnog modela

Manualna identifikacija geometrijskih značajki diskontinuiteta provedena je na 3D digitalnom modelu stijenskog zasljeva dobivenog terestričkim laserskim skeniranjem (TLS)

uređajem Faro Focus 3D s120 (slika 4-1). Digitalni model izrađen je u okviru izrade diplomskog rada Đikić Zvonimira, mag.ing.aedif. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci (Đikić, 2016).

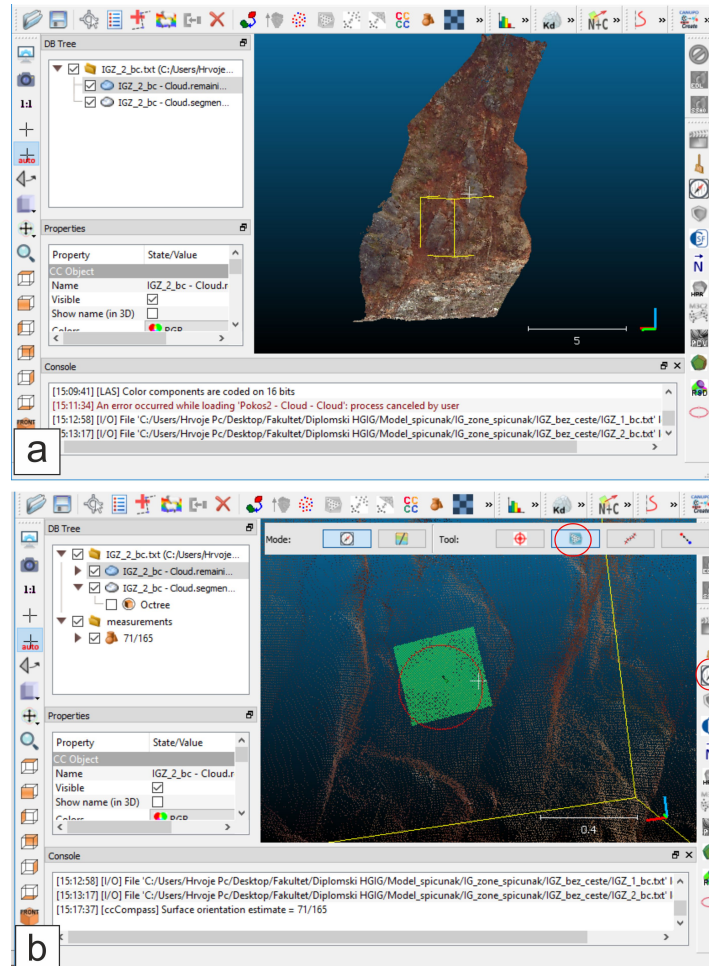


Slika 4-1 Snimanje stijenskog pokusa metodom terestričkog laserskog skeniranja (Đikić, 2016.).

Generirani 3D oblak točaka stijenskog zasjeka sadrži ukupno više od 78 milijuna točaka sadržanih u *.LAS* datoteci. Model je ukupne dužine 140 metara, te maksimalne visine 28 metara. Stijenski zasjek podijeljen je na inženjerskogeološke zone prema rezultatima terenskog inženjerskogeološkog karitranja, te je svaka zona analizirana zasebno.

Proces manualne identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu proveden je u softverima *CloudCompere* i *AutoCad Map 3D*, a sastoji se od određivanja orijentacije, razmaka i postojanosti dominantnih setova diskontinuiteta. U prvom koraku analize određene su orijentacije dominantnih setova diskontinuiteta. Analiza započinje učitavanjem 3D oblaka točaka odabrane inženjerskogeološke zone u *CloudCompare*. Na učitanom 3D modelu odabire se područje gdje su plohe diskontinuiteta jasno izražene (slika 4-2a; žuti kvadrat). Općenito vrijedi pravilo da što je veća gustoća točaka po jedinici površine to su diskontinuiteti izraženiji, a time je i izmjerenja orijentacija točnija. Mjerenja orijentacije provedena su pomoću alata „*Compass*“. Alat „*Compass*“ primjenjuje se za određivanje orijentacije planarnih površina predstavljenih grupom točaka. Za potrebe mjerenja orijentacija diskontinuiteta unutar alata „*Compass*“ korištena je funkcija „*Plane tool*“. Kad se aktivira ova funkcija, u 3D prozoru se prikazuje crveni krug kojim se odabiru točke koje će se aproksimirati ravninom (slika 4-2b). Ravnina se postavlja na sve točke koje

se nalaze unutar kruga primjenjujući metodu najmanjih kvadrata, te se za tu ravninu određuje smjer i kut nagiba. Za preciznije provođenje mjerenja moguće je mijenjati veličinu kruga unutar kojeg se aproksimira ravnina. Da bi dobivene vrijednosti orijentacija bile reprezentativne proveden je veliki broj mjerenja. Broj provedenih mjerenja ovisi o veličini inženjerskogeološke zone, broju setova diskontinuiteta, te o izraženosti ploha diskontinuiteta, a kretao se u rasponu od 100 do 350 mjerenja po zoni.



Slika 4-2 Određivanje orijentacije diskontinuiteta u programu *CloudCompare*; a) odabir reprezentativnog područja mjerenja; b) mjerenje orijentacije diskontinuiteta alatom *Compass*.

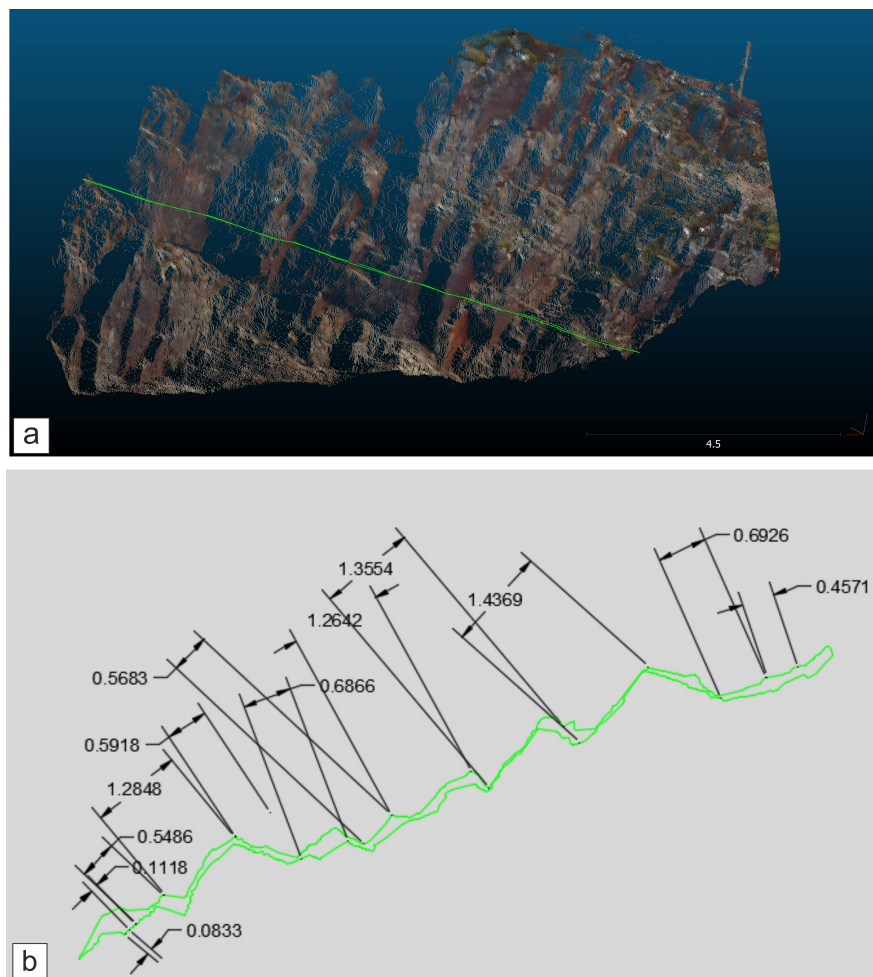
U idućem koraku se izmjerene orijentacije koriste za određivanje dominantnih setova diskontinuiteta. Ova analiza se provodi u softveru *Dips*. Navedeni softver određuje pripadnost pojedinih polova diskontinuiteta određenom setu koristeći *Fuzzy cluster* metodu obrade podataka značajki diskontinuiteta. *Fuzzy Cluster* metoda pripada skupini statističkih

metoda analize diskontinuiteta na temelju svih značajki (orijentacija, razmak, hrapavost, postojanost, čvrstoća), grupiranjem podataka višedimenzionalnih vektora (Hammah, Curran, 1998). U ovoj su analizi diskontinuiteti grupirani u setove isključivo na temelju orijentacije. Na taj način grupirani diskontinuiteti prikazani su u stereografskoj projekciji, a dominantni setovi diskontinuiteta predstavljeni su tragovima i polovima normala.

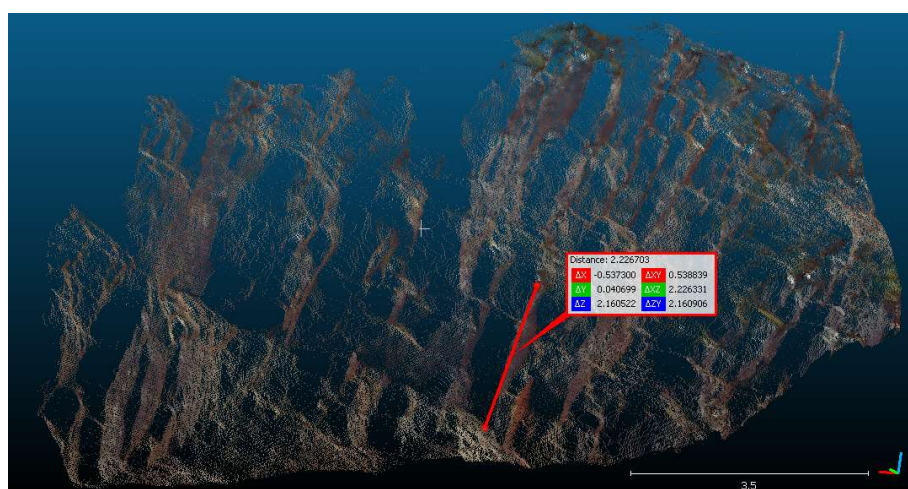
Određivanje razmaka diskontinuiteta provedeno je koristeći, u kombinaciji, softvere *CloudCompare* i *AutoCad Map 3D*. Razmaci pojedinog seta diskontinuiteta mjereni su metodom linearnog uzorkovanja (Priest, 1993). Linearno uzorkovanje provedeno je na način da su unutar svake inženjerskogeološke zone na 3D modelu u softveru *CloudCompare* postavljeni profili uzorkovanja okomito na pružanje pojedinog seta diskontinuiteta. Osim navedenog, profil uzorkovanja postavljen je tamo gdje isti presijeca najveći broj diskontinuiteta tog seta kako bi se provelo više mjerenja razmaka, a time i dobili reprezentativniji podaci. Navedeni postupak proveden je koristeći alat *Cross section-Contour* pomoću kojeg su na jednostavan način dobiveni profili uzorkovanja projicirani u odgovarajuću ravninu. Profil linearnog uzorkovanja prikazan je na slici 4-3a.

Svaki pojedini presjek eksportiran je u *.dxf* formatu kao *Polyline* u XY ravnini i učitao u *AutoCad Map 3D* gdje su provedena mjerenja razmaka. Provedena mjerenja predstavljaju pravi razmak diskontinuiteta, što otklanja potrebu za mjerenjem orijentacije linije uzorkovanja i korekcije dobivenih vrijednosti razmaka obzirom na kut između linije uzorkovanja i pružanja diskontinuiteta. Na slici 4-3b prikazan je konačni rezultat izmjerenih razmaka diskontinuiteta po profilu linearnog uzorkovanja. Na ovaj način prikupljeni podaci o razmacima statistički su obrađeni s ciljem određivanja minimalne, maksimalne, te srednje vrijednosti razmaka pojedinog seta diskontinuiteta.

Posljednji korak analize obuhvaća provedbu mjerenja postojanosti diskontinuiteta na 3D oblaku točaka. Postojanost je mjerena sukladno normi ISRM-a (ISRM, 1978) koja predlaže mjerenje postojanosti diskontinuiteta upotrebom mjerne vrpce. Postojanost diskontinuiteta mjerena je kao duljina prostiranja diskontinuiteta na plohi promatranja. Navedeni postupak proveden je koristeći alat *Point picking-Length* u softveru *CloudCompare* (slika 4-4). Prikupljeni podaci o postojanosti diskontinuiteta statistički su obrađeni s ciljem određivanja minimalne, maksimalne, te srednje vrijednosti postojanosti.



Slika 4-3 Određivanje razmaka diskontinuiteta: a) pozicija profila linearnog uzorkovanja; b) izmjereni razmaci diskontinuiteta.



Slika 4-4 Određivanje postojanosti diskontinuiteta u programu *CloudCompare*.

4.3. Polu-automatska identifikacija geometrijskih značajki diskontinuiteta sa 3D digitalnog modela

Polu-automatska identifikacija geometrijskih značajki diskontinuiteta sa 3D digitalnog modela provedena je koristeći *open-source* softver *Discontinuity Set Extractor (DSE)*, a uključivala je određivanje orijentacije, razmaka i postojanosti dominantnih setova diskontinuiteta. *DSE* je prvi javno dostupan softver za poluautomatsku, vektorsku identifikaciju diskontinuiteta, razvijen u programskom jeziku Matlab. Osnovna svrha ovog softvera je identifikacija ravnina i pripadajućih setova diskontinuiteta, te određivanje njihove orijentacije iz 3D oblaka točaka dobivenog laserskim skeniranjem ili digitalnom fotogrametrijom (Riquelme et al., 2014). Riquelme et al. (2014) predstavili su novu metodologiju za poluautomatsku identifikaciju diskontinuiteta koja se sastoji od nekoliko koraka:

1. Određivanje broja susjednih točaka (*engl. nearest neighbour search*),
2. Provedba testa koplanarnosti i izračun vektora normala,
3. Polu-automatska identifikacija diskontinuiteta primjenom Kernelove procjene gustoće (*engl. Kernel Density Estimation Analysis*),
4. Statistička analiza diskontinuiteta,
5. *Cluster* analiza.

U okviru ovog istraživanja korišten je *Discontinuity Set Extractor (DSE)* v2.08. Kalibracijski parametri korišteni za polu-automatsku identifikaciju diskontinuiteta prikazani su u tablici 4-1.

Tablica 4-1 Kalibracijski parametri za polu-automatsku identifikaciju diskontinuiteta koristeći *DSE*.

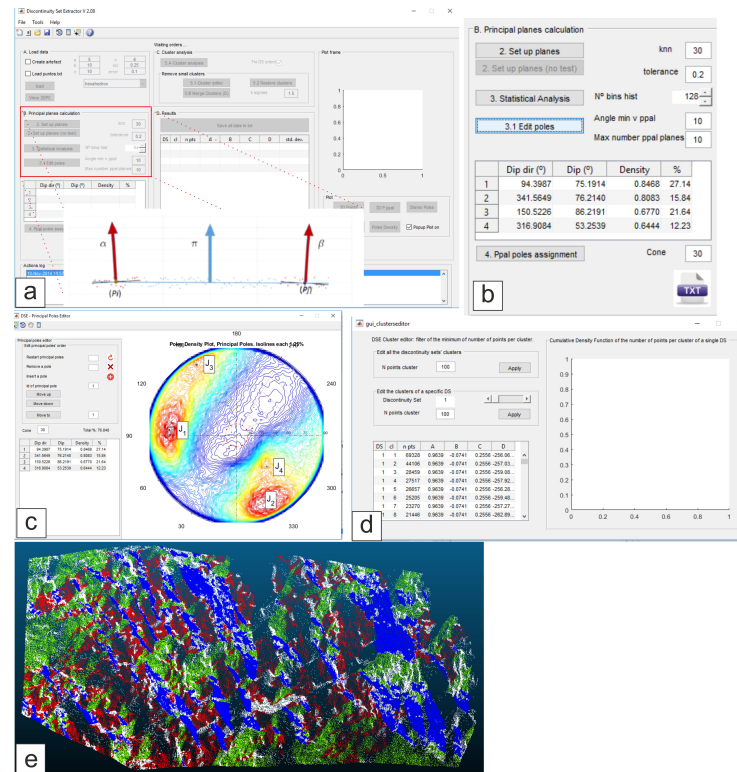
Kalibracijski parametar	Kalibracijska vrijednost
<i>knn</i>	30
Tolerancija orijentacije	0,2
Rezolucija <i>KDE</i> procjene gustoće	128
Minimalni kut između setova	10
Maksimalni broj setova	10
Konus <i>cluster</i> a	30
<i>k</i>	1,5
Minimalni broj točaka u <i>clusteru</i>	100-1000

Početak analize započinje unosom 3D oblaka točaka dobivenog laserskim skeniranjem. Na temelju ulazne vrijednosti broja susjednih točaka koje tvore planarnu površinu (knn), algoritam pronalazi one plohe koje odgovaraju pojedinom skupu točaka. Na slici 4-5a vidljivo je da skupina točaka s desne strane odgovara podsetu Q_j koji je definiran točkom P_j , dok skup točaka sa lijeve strane odgovara podsetu Q_i koji je definiran točkom P_i . Ovaj proces identifikacije ravnina temelji se na očekivanoj paralelnosti vektora normala podsetova ukoliko pripadaju istom glavnom setu diskontinuiteta. Uzmimo u obzir skup točaka Q_i definiran točkom (P_i) koja pripada nekoj nepoznatoj ravnini π . Ako je vektor α predstavnik podseta Q_i , tada se očekuje da su orijentacije vektora α i π podjednake. Isti princip vrijedi i za podset Q_j koji je definiran vektorom β . Ovaj podset je također dio ravnine π , a orijentacije sva tri vektora normala (α , β , π) približne su po iznosu. Ovaj korak analize uključuje i test koplanarnosti kojim se utvrđuju granice pojedinih ravnina, tj. detektiraju se sve one točke koje su koplanarne svojim susjednim točkama. Nakon što je izvršen test koplanarnosti provodi se izračun orijentacije i vektora normala prethodno određenih ravnina (slika 4-5b).

Statistička analiza provodi se na stereografskoj projekciji ucrtanih polova ravnina. Kako bi se na stereografskoj projekciji odredili dominantni setovi diskontinuiteta potrebno je: (1) izračunati vektor normale za svaku ravninu i ucrtati ga na stereogram, (2) izračunati gustoće polova ravnina, te (3) odrediti lokalne maksimume. Taj proces prikazan je na slici 4-5c.

Nakon što su na stereografskoj projekciji prikazani polovi svih setova diskontinuiteta i njihove gustoće (slika 4-5c), slijedi polu-automatska identifikacija dominantnih setova diskontinuiteta. U ovom će koraku korisnik će odlučiti jesu li rezultati raspodjela vektora normala u stereografskoj projekciji prihvatljivi ili neke rezultate treba izostaviti, te će prema tome prilagoditi parametre za filtraciju podataka. Ovaj se korak izvodi manualno, pregledom raspodjele gustoća, te prisustva lokalnih maksimuma gustoća. Posljednji korak je definiranje *cluster*a točaka, koje pripadaju jednom setu, u zasebne skupine koje predstavljaju površinu diskontinuiteta primjenom *Density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN)* algoritma (Ester et al., 1996). Generirani *clusteri* točaka također su podložni manualnoj korekciji. Na slici 4-3d prikazan je izbornik u kojem je moguće ukloniti sve one *cluster*e koji sadrže manje od nekog unaprijed definiranog broja točaka. U ovom je slučaju broj točaka postavljen na vrijednosti između 100 i 1000. Ukoliko pojedina inženjerskogeološka zona sadrži jasno izražene plohe diskontinuiteta sa velikim brojem točaka po jedinici površine tada je broj točaka postavljen na 1000, a ukoliko sadrži diskontinuitete male površine i malog broja točaka po jedinici površine tada je broj točaka postavljen na 100, kako bi se izbjegla da pojedini diskontinuiteti ne budu prepoznati.

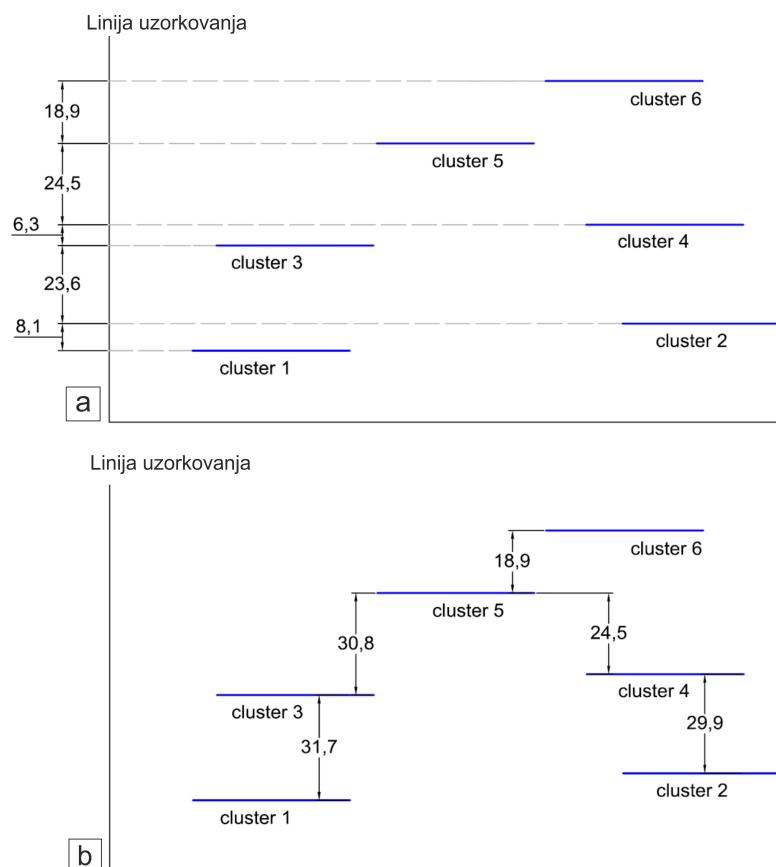
Postupak polu-automatske identifikacije diskontinuiteta predstavlja generiranje oblaka točaka u kojem su točke koje pripadaju istom setu obojane istom bojom. Model stijenskog zasjeka sa definiranim setovima diskontinuiteta prikazan je na slici 4-5e.



Slika 4-5 Polu-automatsko identifikacija setova diskontinuiteta u softveru DSE: a) test koplanarnosti; b) statistička analiza; c) stereografska projekcija polova normala diskontinuiteta; d) uređivanje *clusters*; e) prikaz identificiranih setova diskontinuiteta (Riquelme et al., 2014.).

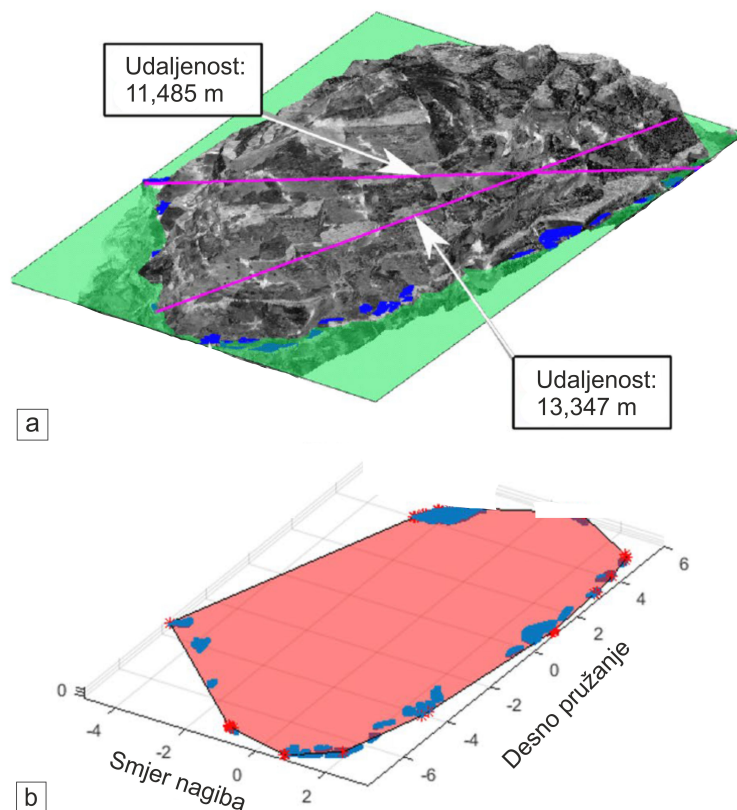
U idućem koraku, koristeći opciju „Normal spacing“ proveden je proračun razmaka između diskontinuiteta prema metodologiji predstavljenoj u Riquelme et al. (2015). Ulazni podatak u analizi predstavlja klasificirani 3D oblak točaka sa identificiranim diskontinuitetima i provedenom *cluster* analizom. Metodologija se zasniva na proračunu razmaka između svake planarne površine i njoj najbliže paralelne površine u 3D prostoru. To omogućava izračunavanje normalnog razmaka za svaku planarnu površinu unutar istog seta. Riquelme et al. (2015) definiraju dvije vrste razmaka diskontinuiteta: (1) razmaci između postojanih diskontinuiteta (*engl. Full persistent*) i (2) nepostojanih diskontinuiteta (*engl. Non persistent*), kao što je prikazano na slici 4-6. *Full persistent* razmaci definirani su na temelju pretpostavke diskontinuiteta beskonačne postojanosti, a *Non persistent* na temelju

diskontinuiteta stvarne postojanosti. Naposljetku, razmak diskontinuiteta se izračunava kao srednja vrijednost svih normalnih razmaka za svaki pojedinačni set diskontinuiteta.



Slika 4-6 Polu-automatsko određivanje razmaka diskontinuiteta u softveru *DSE*: a) *Full persistent* razmaci, b) *Non persistent* razmaci (modificirano prema Riquelme et al., 2015).

Posljednji korak analize je određivanje postojanosti diskontinuiteta koristeći opciju „*Persistence*“ prema metodologiji predstavljenoj u Riquelme et al. (2018). Kao i kod određivanja razmaka diskontinuiteta i ova metodologija kao ulazni parametar zahtjeva prethodno klasificirani 3D oblak točaka sa identificiranim diskontinuitetima i provedenom *cluster* analizom (slika 4-7a). Koplanarni *clusteri* objedinjeni su u jedinstvenu grupu točaka za koju je provedena analiza postojanosti. Vrijednost postojanosti diskontinuiteta se u okviru ove metodologije određuje u dva smjera: (1) u pravcu smjera nagiba diskontinuiteta i (2) pravcu desnog pružanja diskontinuiteta (slika 4-7b). Kao reprezentativna vrijednost za potrebe ovog istraživanja uzeta je maksimalna vrijednost postojanosti, bez obzira na smjeru određivanja, te srednja vrijednosti svih maksimalnih vrijednosti pojedinog seta.



Slika 4-7 Polu-automatsko određivanje postojanosti diskontinuiteta u softveru *DSE*: a) položaj plohe diskontinuiteta na 3D modelu, b) izdvojena ploha diskontinuiteta sa naznačenim smjerovima određivanja postojanosti (modificirano prema Riquelme et al., 2018).

4.4. Klasifikacija stijenske mase i provedba kinematičkih analiza

Klasifikacija stijenske mase u okviru ovog istraživanja provedena je koristeći Geološki indeks čvrstoće (GSI) prema metodologiji predstavljenoj u Sonmez i Ulusay (1999.). Navedena metodologija zasniva je na procjeni dva kvantitativna parametra: (1) ocjena strukture stijenske mase (SR), te (2) ocjena uvjeta površine diskontinuiteta (SCR). Ocjena strukture stijenske mase provedena je na temelju podataka terenskog kartiranja, te na temelju podataka dvije varijacije inženjerskogeološkog kartiranja primjenom daljinskih metoda istraživanja (manualno na 3D modelu, te polu-automatsko). Terenskim inženjerskogeološkim kartiranjem prikupljeni su podaci o ocjeni uvjeta površine diskontinuiteta i primijenjeni su na sve tri metode. Obzirom na varijabilnost vrijednosti

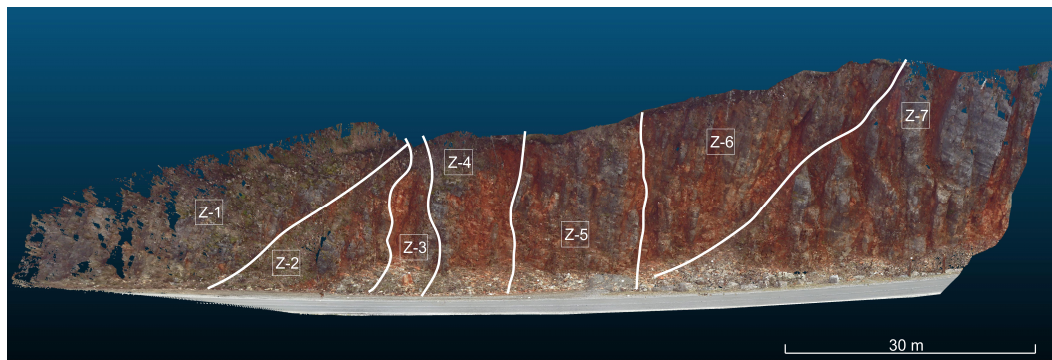
razmaka, te broja setova diskontinuiteta dobivenih različitim metodama kartiranja, provedena je dobivenih vrijednosti GSI klasifikacijskog sustava.

Kinematičke analize stabilnosti provedene su u softveru *DIPS (Rocscience)*. Navedeni softver osim što omogućava vizualni pregled i statistički obradu mjerenih strukturnih podataka, ima mogućnost i provedbe kinematičkih analiza stabilnosti koristeći alat *Kinetic analysis*. Analize su provedene zasebno za svaku inženjerskogeološku zonu kako bi se dobio uvid u potencijalne oblike nestabilnosti. Kao ulazi parametar korištene su orijentacije, unaprijed definiranih, dominantnih setova diskontinuiteta, prosječna orijentacija zasjeka u pripadajućoj inženjerskogeološkoj zoni, te bazni kut unutarnjeg trenja stjenki diskontinuiteta koji u slučaju dolomita iznosi $\varphi=35^\circ$ (Gonzalez de Vallejo i Ferrer, 2011).

5. REZULTATI INŽENJERSKOGEOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati inženjerskogeološkog kartiranja stijenskog zasjea Špičunak na državnoj cesti D3 (Goričan-Rijeka) primjenom daljinskih metoda istraživanja. S obzirom da je riječ o inženjerskogeološkom kartiranju u detaljnom mjerilu, izdvojene su inženjerskogeološke jedinice koje odgovaraju rangu inženjerskih tipova. Duž predmetnog zasjea izdvojeno je sedam inženjerskogeoloških zona istovrsnih karakteristika intaktne stijene obzirom na litologiju i trošnost, te istovrsnih strukturnih karakteristika (slika 5-1.).

Rezultati obuhvaćaju identifikaciju geometrijskih značajki diskontinuiteta (orijentacija, razmak i postojanost) primjenom manualne i polu-automatske metode obrade 3D modela stijenske mase, statističku obradu navedenih podataka s ciljem usporedbe navedenih metoda, te klasifikaciju stijenske mase primjenom GSI klasifikacije sa provedenim kinematičkim analizama stabilnosti.

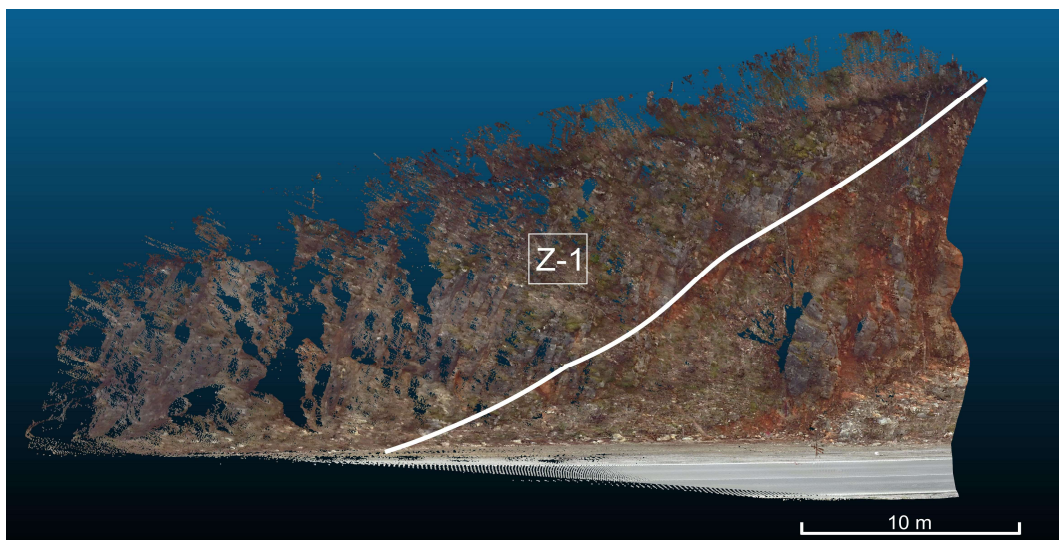


Slika 5-1. 3D model stijenskog zasjea Špičunak podijeljen na inženjerskogeološke zone.

5.1. Inženjerskogeološka zona Z-1

Inženjerskogeološka zona Z-1 (slika 5-2, 5.3) izgrađena je od stijenske mase gornjotrijaskih dolomita. Zasjek je visine od 8 metara na početku zone do maksimalne visine 17 metara na kraju zone. Prosječna orijentacija stijenskog zasljea iznosi 326/80. Manualnom identifikacijom geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu utvrđeno je da je stijenska masa raspucana po četiri seta diskontinuiteta, slojevitosti S0 (295/42), te tri seta pukotina S1 (99/76), S2 (179/82), S3 (349/75). S druge strane, polu-automatskom identifikacijom geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu utvrđeno je da je stijenska masa raspucana po tri seta diskontinuiteta, slojevitosti S0 (312/50), te dva seta pukotina S1 (101/74) i S3 (326/62). Rezultati identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta prikazani su u tablici 5-1.

Na temelju rezultata terenskog opisa stanja stjenki diskontinuiteta te manualne i polu-automatske identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta provedena je GSI klasifikacija stijenske mase. Diskontinuiteti su s obzirom na ocjenu stjenki procijenjeni kao loši do dobri (SCR=6-12), dok je struktura procijenjena kao blokovito/poremećena do vrlo blokovita (SR=33-57) na temelju manualne identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta i raspadnuta do blokovita (SR=0-62) na temelju polu-automatske identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta. S obzirom na navedene terenske vrijednosti stanja diskontinuiteta, te ovisno o metodi određivanja geometrijskih značajki diskontinuiteta, GSI vrijednosti kreću se u rasponu od 32 do 57 (manualna identifikacija) i od 22 do 64 (polu-automatska identifikacija).



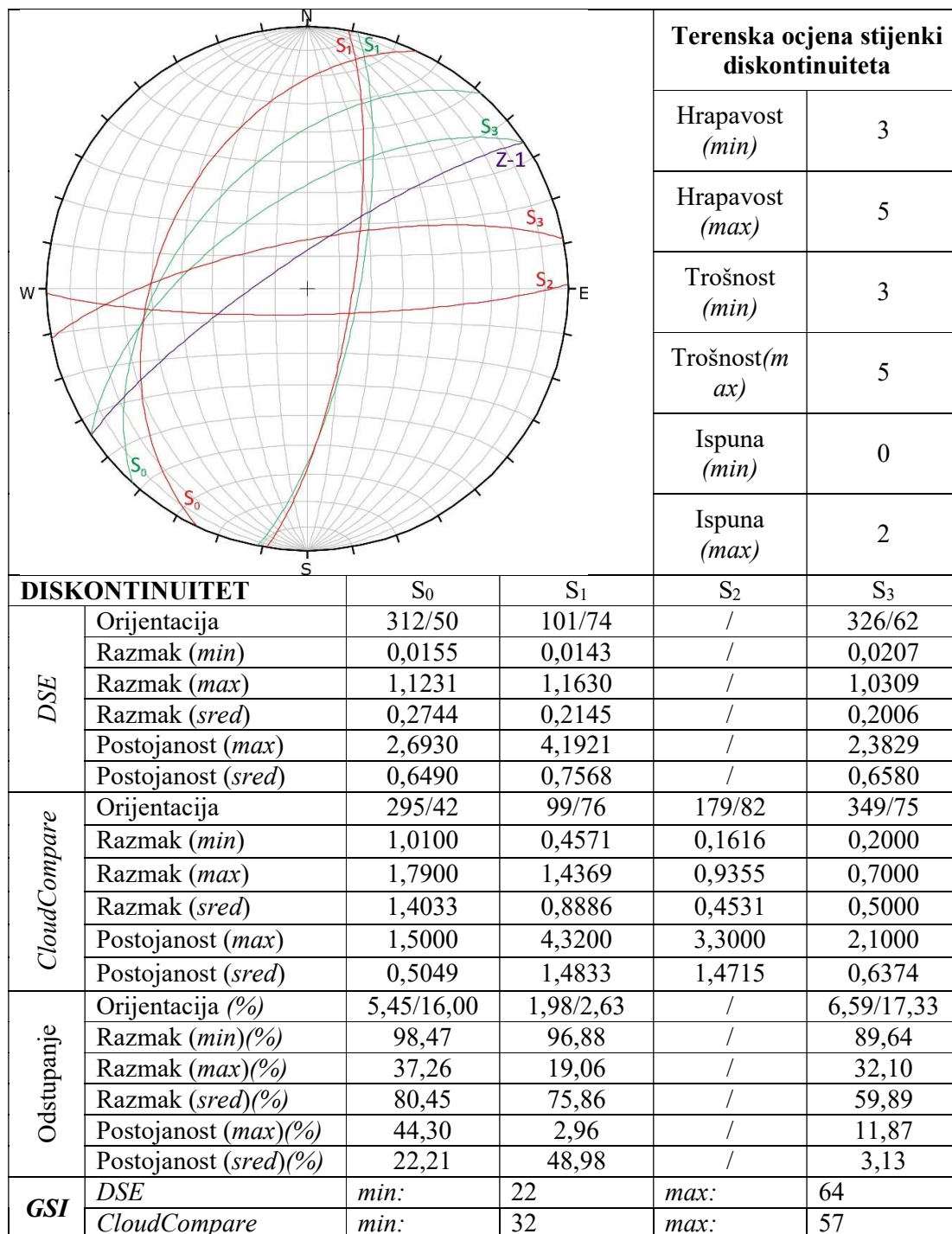
Slika 5-2 Inženjerskogeološka zona Z-1 - pogled na 3D model.



Slika 5-3 Inženjerskogeološka zona Z-1 - pogled na zonu.

Provedbom kinematičkih analiza stabilnostina podacima manualne identifikacije diskontinuiteta (prilog 1) utvrđena je mogućnost pojave planarnog sloma po plohama diskontinuiteta S_0 i S_3 te klinastog sloma po presječnicama diskontinuiteta S_0 i S_2 , S_0 i S_3 te S_2 i S_3 . Po presječnici diskontinuiteta S_1 i S_2 moguće je prevrtanje, dok mogućnost pojave prevrtanja savijanjem nije zabilježena. S druge strane, provedbom kinematičkih analiza stabilnosti na podacima polu-automatske identifikacije diskontinuiteta (prilog 2) utvrđena je pojava planarnog sloma po plohama S_0 i S_3 , kao i kod manualne identifikacije, te klinastog sloma po presječnicama diskontinuiteta S_0 i S_1 , S_0 i S_3 te S_1 i S_3 . Mogućnost pojave prevrtanja, te prevrtanja savijanjem nije zabilježena.

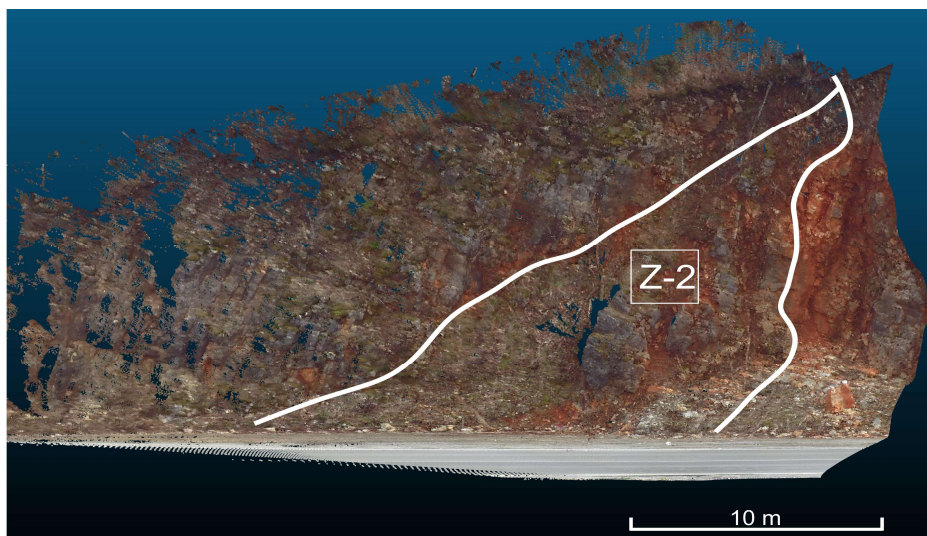
Tablica 5-1 Opis značajki diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z-1. Stereografska projekcija uključuje setove diskontinuiteta identificirane manualnom metodom koristeći *CloudCompare* (crvena linija) te polu-automatski koristeći softver *Discontinuity Set Extactor* (zeleni linija).



5.2. Inženjerskogeološka zona Z-2

Inženjerskogeološka zona Z-2 (slika 5-4, 5.5) izgrađena je od stijenske mase gornjotrijaskih dolomita. Zasjeak je maksimalne visine 20 metara na kraju zone. Prosječna orijentacija stijenskog zasjeaka iznosi 324/63. Manualnom identifikacijom geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu utvrđeno je da je stijenska masa raspucana po pet setova diskontinuiteta, slojevitosti S_0 (308/41) te četiri seta pukotina S_1 (109/76), S_2 (171/81), S_3 (325/82) i S_4 (41/73). S druge strane, polu-automatskom identifikacijom geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu utvrđeno je da je stijenska masa raspucana po četiri seta diskontinuiteta, slojevitosti S_0 (317/46), te tri seta pukotina S_1 (111/78), S_2 (164/75) i S_3 (322/74). Rezultati identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta prikazani su u tablici 5-2.

Na temelju rezultata terenskog opisa stanja stjenki diskontinuiteta te manualne i polu-automatske identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta provedena je GSI klasifikacija stijenske mase. Diskontinuiteti su s obzirom na ocjenu stjenki procijenjeni kao povoljni do dobri ($SCR=8-12$), dok je struktura procijenjena kao blokovito/poremećena ($SR=27-38$) na temelju manualne identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta i raspadnuta do vrlo blokovita ($SR=0-41$) na temelju polu-automatske identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta. S obzirom na navedene terenske vrijednosti stanja diskontinuiteta, te ovisno o metodi određivanja geometrijskih značajki diskontinuiteta, GSI vrijednosti kreću se u rasponu od 36 do 47 (manualna identifikacija) i od 28 do 47 (polu-automatska identifikacija).



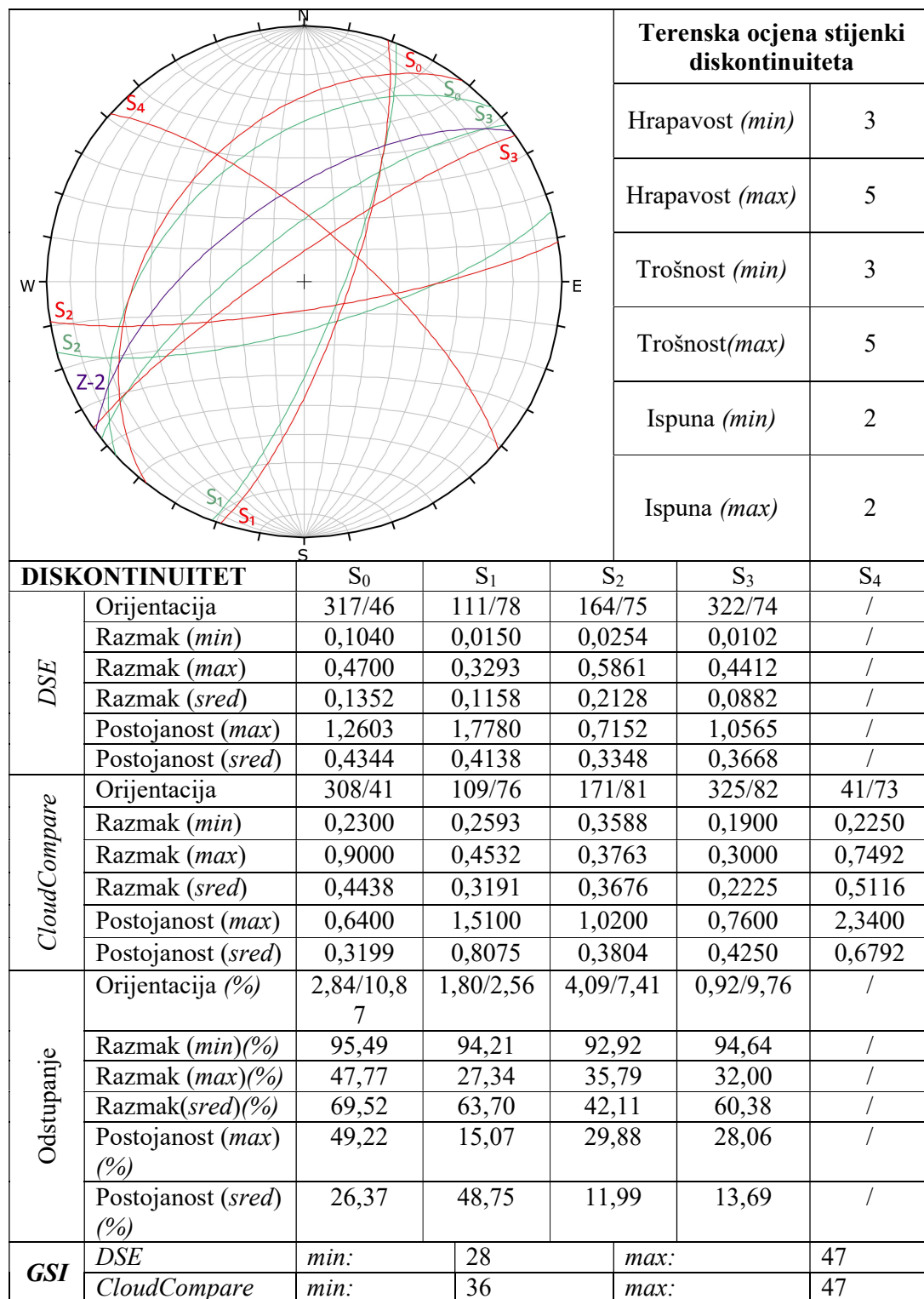
Slika 5-4 Inženjerskogeološka zona Z-2 -pogled na 3D model.



Slika 5-5 Inženjerskogeološka zona Z-2 - pogled na zonu.

Provedbom kinematičkih analiza stabilnosti na podacima manualne identifikacije diskontinuiteta (prilog 3) utvrđena je mogućnost pojave planarnog oblika sloma po plohi diskontinuiteta S_0 , te klinastog sloma po presječnici diskontinuiteta S_0 i S_2 te S_0 i S_4 . Po presječnici diskontinuiteta S_1 i S_2 , S_2 i S_4 te S_1 i S_4 moguće je prevrtanje, dok mogućnost pojave prevrtanja savijanjem nije zabilježena. S druge strane, provedbom kinematičkih analiza stabilnosti na podacima polu-automatske identifikacije diskontinuiteta (prilog 4) utvrđena je pojava planarnog sloma po plohi diskontinuiteta S_0 , te klinastog sloma po presječnici diskontinuiteta S_0 i S_1 te S_0 i S_2 . Po presječnici diskontinuiteta S_1 i S_2 moguće je prevrtanje, dok mogućnost pojave prevrtanja savijanjem nije zabilježena.

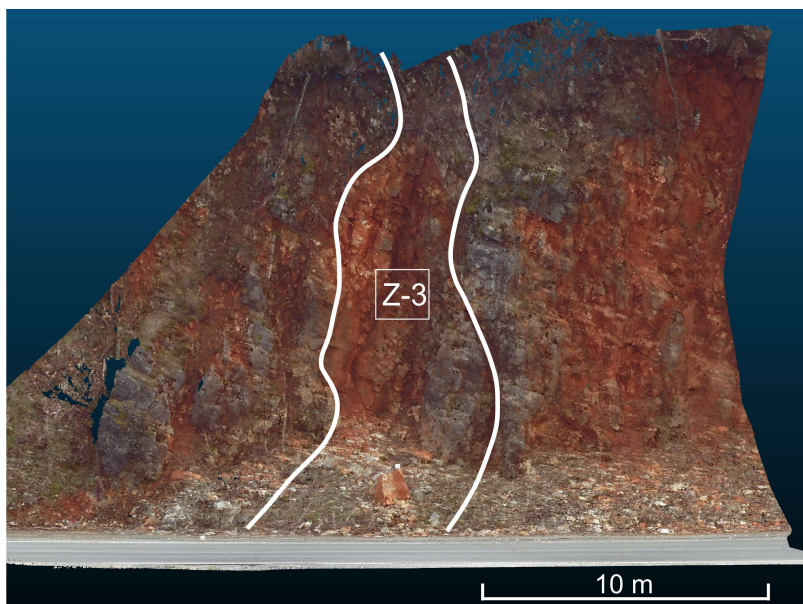
Tablica 5-2 Opis značajki diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z-2. Stereografska projekcija uključuje setove diskontinuiteta identificirane manualnom metodom koristeći *CloudCompare* (crvena linija) te polu-automatski koristeći softver *Discontinuity Set Extractor* (zeleni linija).



5.3. Inženjerskogeološka zona Z-3

Inženjerskogeološka zona Z-3 (slika 5-6, 5-7) izgrađena je od stijenske mase gornjotrijaskih dolomita. Zasjeak je maksimalne visine 14,4 metara, te prosječne orijentacije 341/74. Manualnom identifikacijom geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu utvrđeno je da je stijenska masa raspucana po pet setova diskontinuiteta, slojevitosti S_0 (324/33) te četiri seta pukotina S_1 (82/76), S_2 (157/55), S_3 (344/81) i S_4 (46/82). Polu-automatskom identifikacijom geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu utvrđeno je da je stijenska masa također raspucana po pet setova diskontinuiteta, slojevitosti S_0 (335/46), te četiri seta pukotina S_1 (81/68), S_2 (159/54), S_3 (345/78) i S_4 (46/79). Rezultati identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta prikazani su u tablici 5-3.

Na temelju rezultata terenskog opisa stanja stjenki diskontinuiteta te manualne i polu-automatske identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta provedena je GSI klasifikacija stijenske mase. Diskontinuiteti su s obzirom na ocjenu stjenki procijenjeni kao loši do povoljni ($SCR=4-10$), dok je struktura procijenjena kao blokovito/poremećena ($SR=20-37$) na temelju manualne identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta i raspadnuta do vrlo blokovita ($SR=0-43$) na temelju polu-automatske identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta. S obzirom na navedene terenske vrijednosti stanja diskontinuiteta, te ovisno o metodi određivanja geometrijskih značajki diskontinuiteta, GSI vrijednosti kreću se u rasponu od 24 do 43 (manualna identifikacija) i od 17 do 44 (polu-automatska identifikacija).



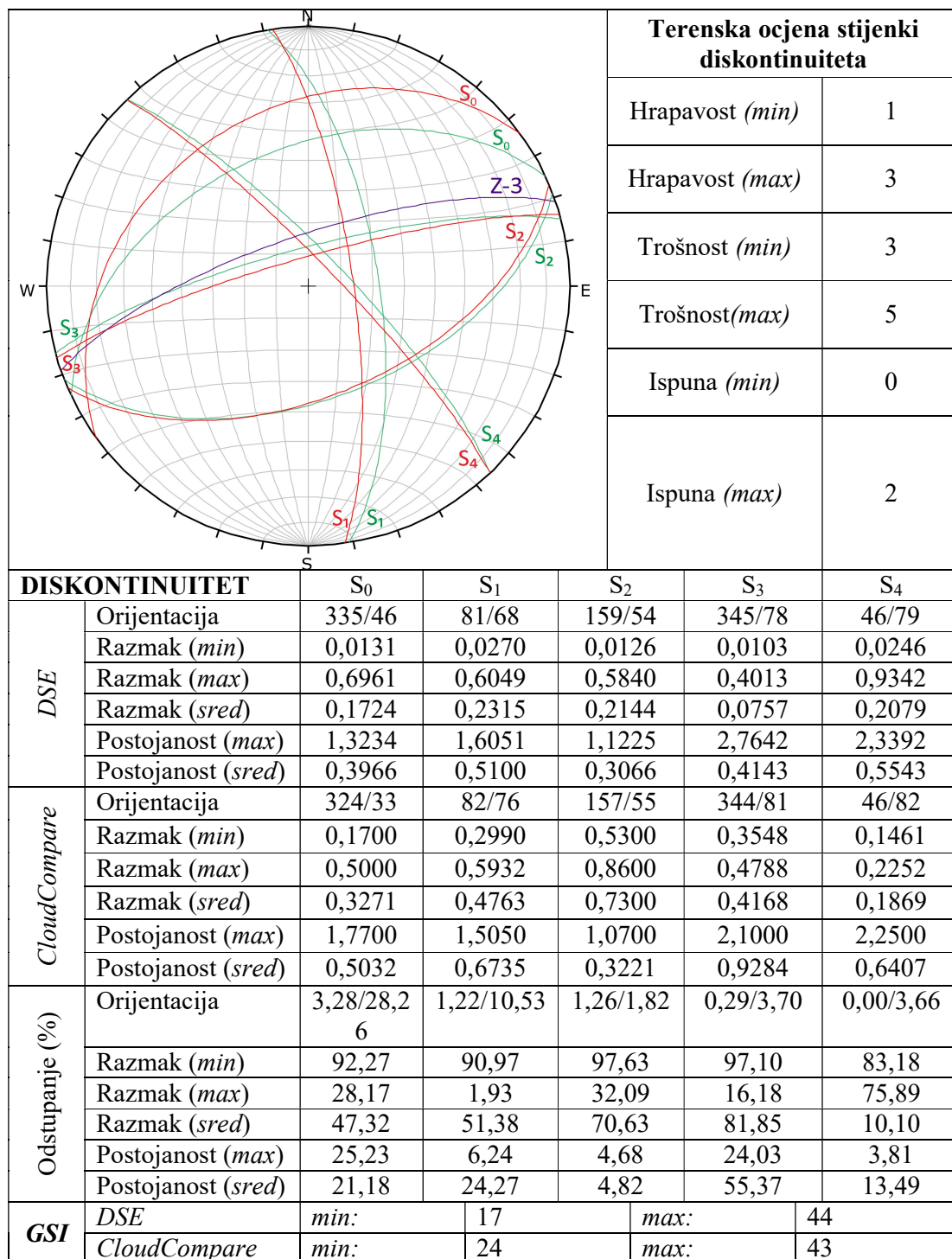
Slika 5-6 Inženjerskogeološka zona Z-3 - pogled na 3D model.



Slika 5-7 Inženjerskogeološka zona Z-3 - pogled na zonu.

Provedbom kinematičkih analiza stabilnosti na podacima manualne identifikacije diskontinuiteta (prilog 5) utvrđena je mogućnost pojave klinastog sloma po presječnici diskontinuiteta S_0 i S_3 . Po presječnici diskontinuiteta S_1 i S_2 te S_1 i S_4 moguće je prevrtanje, dok je pojava prevrtanja savijanjem zabilježena po plohi diskontinuiteta S_2 . Mogućnost pojave planarnog sloma nije zabilježena. S druge strane, provedbom kinematičkih analiza stabilnosti na podacima polu-automatske identifikacije diskontinuiteta (prilog 6) utvrđena je pojava planarnog sloma po plohi diskontinuiteta S_0 , te klinastog sloma po presječnici diskontinuiteta S_0 i S_1 , S_0 i S_3 te S_0 i S_4 . Po presječnici diskontinuiteta S_1 i S_4 moguće je prevrtanje, dok je mogućnost pojave prevrtanja savijanjem zabilježena po plohi diskontinuiteta S_2 .

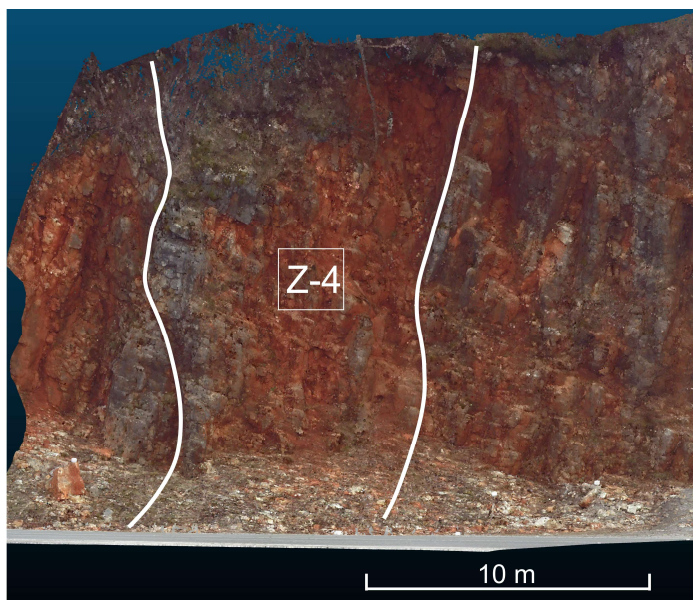
Tablica 5-3 Opis značajki diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z-3. Stereografska projekcija uključuje setove diskontinuiteta identificirane manualnom metodom koristeći *CloudCompare* (crvena linija) te polu-automatski koristeći softver *Discontinuity Set Extractor* (zeleni linija).



5.4. Inženjerskogeološka zona Z-4

Inženjerskogeološka zona Z-4 (slika 5-8, 5-9) izgrađena je od stijenske mase gornjotrijaskih dolomita. Zasjeak je maksimalne visine 15 metara, te prosječne orijentacije 308/70. Manualnom identifikacijom geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu utvrđeno je da je stijenska masa raspucana po šest setova diskontinuiteta, slojevitosti S_0 (303/35) te pet setova pukotina S_1 (109/75), S_2 (154/75), S_3 (328/81), S_4 (64/80) i S_5 (17/83). Polu-automatskom identifikacijom geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu utvrđeno je da je stijenska masa također raspucana po šest setova diskontinuiteta, slojevitosti S_0 (321/46), te pet setova pukotina S_1 (113/68), S_2 (152/76), S_3 (332/72), S_4 (63/74) i S_5 (3/83). Rezultati identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta prikazani su u tablici 5-4.

Na temelju rezultata terenskog opisa stanja stjenki diskontinuiteta te manualne i polu-automatske identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta provedena je GSI klasifikacija stijenske mase. Diskontinuiteti su s obzirom na ocjenu stjenki procijenjeni kao vrlo loši do povoljni ($SCR=2-8$), dok je struktura procijenjena kao blokovito/poremećena do vrlo blokovita ($SR=32-46$) na temelju manualne identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta i raspadnuta do vrlo blokovita ($SR=0-43$) na temelju polu-automatske identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta. S obzirom na navedene terenske vrijednosti stanja diskontinuiteta, te ovisno o metodi određivanja geometrijskih značajki diskontinuiteta, GSI vrijednosti kreću se u rasponu od 21 do 41 (manualna identifikacija) i od 11 do 40 (polu-automatska identifikacija).



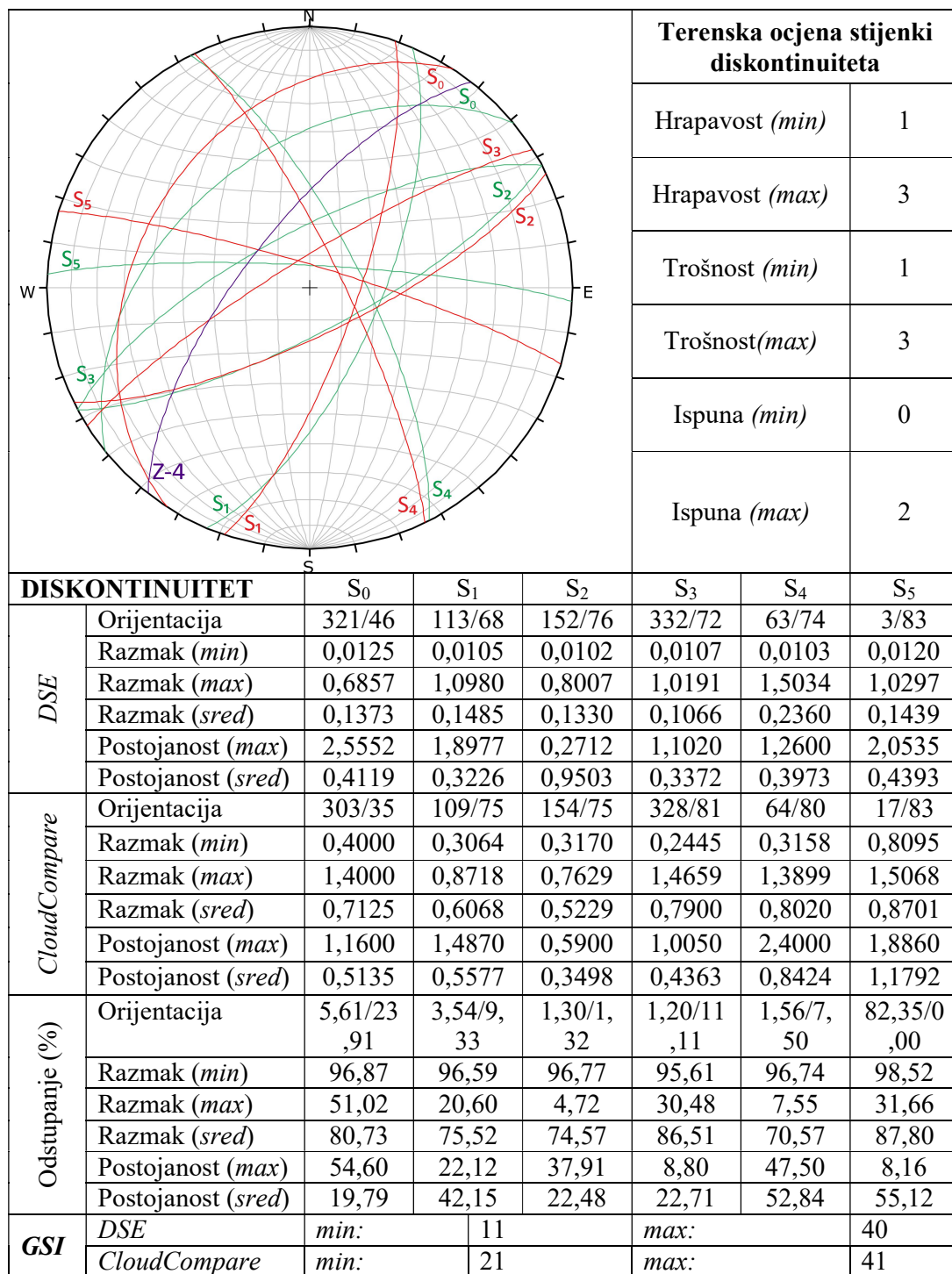
Slika 5-8 Inženjerskogeološka zona Z-4 - pogled na 3D model.



Slika 5-9 Inženjerskogeološka zona Z-4 - pogled na zonu.

Provedbom kinematičkih analiza stabilnosti na podacima manualne identifikacije diskontinuiteta (prilog 7) utvrđena je mogućnost pojave planarnog oblika sloma po plohi diskontinuiteta S_0 , te klinastog sloma po presječnici diskontinuiteta S_0 i S_2 , S_0 i S_3 te S_0 i S_5 . Po presječnici diskontinuiteta S_1 sa diskontinuitetima S_2 , S_3 , S_4 , S_5 , međusobnoj presječnici diskontinuiteta S_5 i S_4 , S_2 i S_4 te S_2 i S_5 moguće je prevrtanje. Prevrtanje savijanjem moguće je po diskontinuitetu S_1 . S druge strane, provedbom kinematičkih analiza stabilnosti na podacima polu-automatske identifikacije diskontinuiteta (prilog 8) utvrđena je pojava planarnog sloma po plohi diskontinuiteta S_0 te klinastog sloma po presječnici diskontinuiteta S_0 i S_4 , S_0 i S_5 te S_3 i S_5 . Po presječnici diskontinuiteta S_1 sa diskontinuitetima S_2 , S_4 , S_5 , međusobnoj presječnici diskontinuiteta S_5 i S_4 , S_2 i S_4 te S_2 i S_5 moguće je prevrtanje. Prevrtanje savijanjem moguće je po diskontinuitetu S_1 .

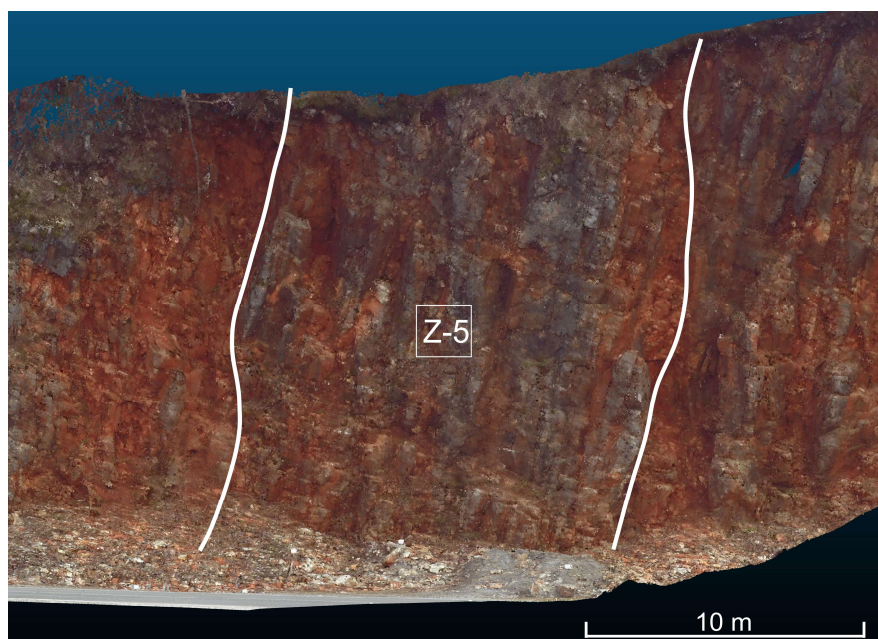
Tablica 5-4 Opis značajki diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z-4. Stereografska projekcija uključuje setove diskontinuiteta identificirane manualnom metodom koristeći *CloudCompare* (crvena linija) te polu-automatski koristeći softver *Discontinuity Set Extractor* (zeleni linija).



5.5. Inženjerskogeološka zona Z-5

Inženjerskogeološka zona Z-5 (slika 5-10, 5-11) izgrađena je od stijenske mase gornjotrijaskih dolomita. Zasek je maksimalne visine 16 metara, te prosječne orijentacije 321/78. Manualnom identifikacijom geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu utvrđeno je da je stijenska masa raspucana po pet setova diskontinuiteta, slojevitosti S_0 (300/35) te četiri seta pukotina S_1 (99/76), S_2 (146/83), S_3 (334/60) i S_5 (21/80). Polu-automatskom identifikacijom geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu utvrđeno je da je stijenska masa raspucana po četiri seta pukotina S_1 (109/72), S_2 (140/84), S_3 (330/65) i S_5 (16/80). Rezultati identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta prikazani su u tablici 5-5.

Na temelju rezultata terenskog opisa stanja stjenki diskontinuiteta te manualne i polu-automatske identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta provedena je GSI klasifikacija stijenske mase. Diskontinuiteti su s obzirom na ocjenu stjenki procijenjeni kao loši do dobri ($SCR=4-12$), dok je struktura procijenjena kao blokovito/poremećena do vrlo blokovita ($SR=34-51$) na temelju manualne identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta i raspadnuta do blokovita ($SR=0-61$) na temelju polu-automatske identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta. S obzirom na navedene terenske vrijednosti stanja diskontinuiteta, te ovisno o metodi određivanja geometrijskih značajki diskontinuiteta, GSI vrijednosti kreću se u rasponu od 32 do 54 (manualna identifikacija) i od 17 do 58 (polu-automatska identifikacija).



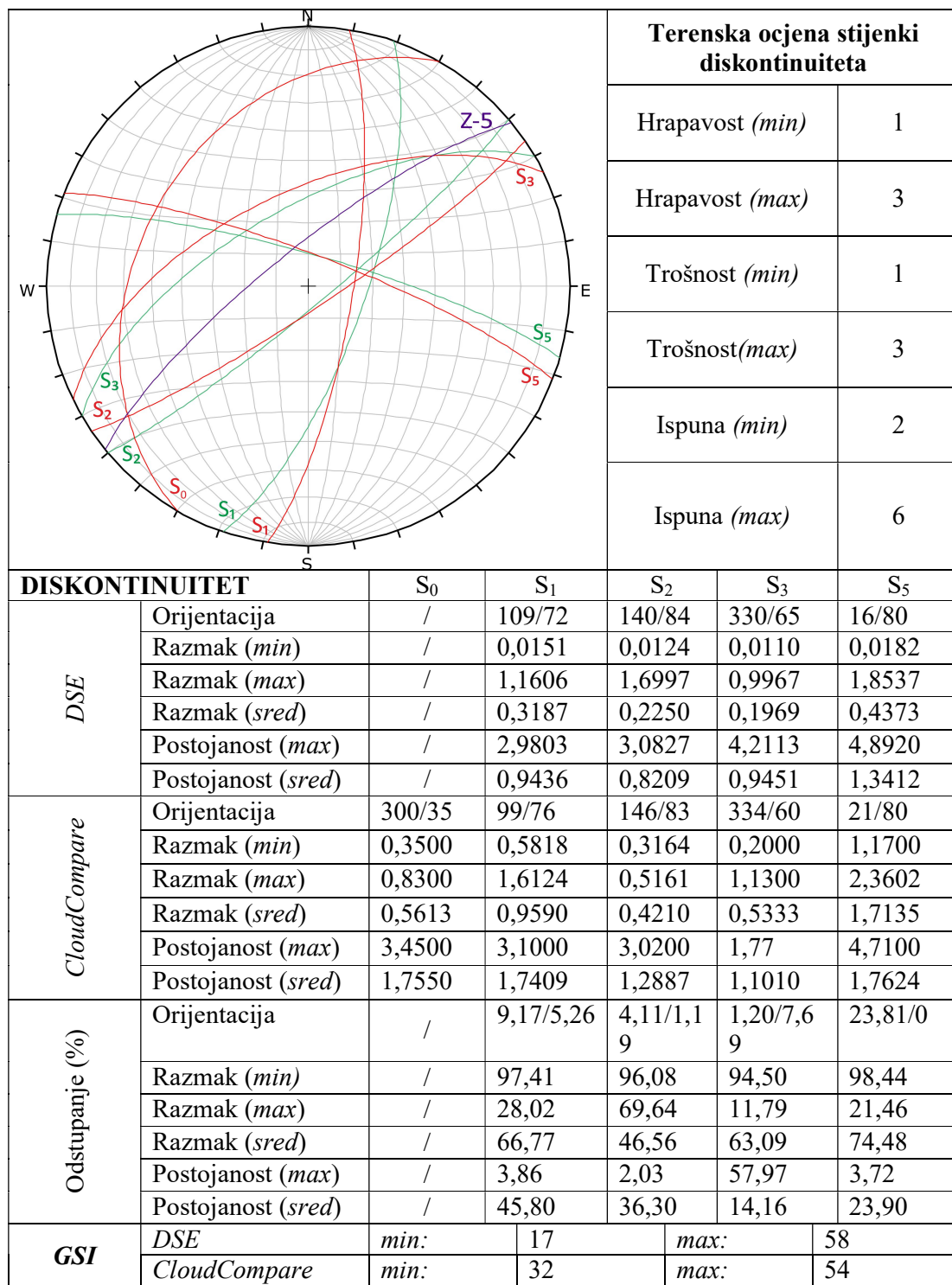
Slika 5-10 Inženjerskogeološka zona Z-5 - pogled na 3D model.



Slika 5-11 Inženjerskogeološka zona Z-5 - pogled na zonu.

Provedbom kinematičkih analiza stabilnosti na podacima manualne identifikacije diskontinuiteta (prilog 9) utvrđena je mogućnost pojave planarnog oblika sloma po plohi diskontinuiteta S_0 i S_3 . Mogućnost klinastog sloma zabilježena je po presječnici diskontinuiteta S_0 i S_3 , S_0 S_5 te po međusobnoj presječnici diskontinuiteta S_1 i S_3 i S_3 i S_5 . Po presječnici diskontinuiteta S_1 sa diskontinuitetima S_2 i S_5 te presječnici diskontinuiteta S_2 i S_5 moguće je prevrtanje. Prevrtanje savijanjem moguće je po diskontinuitetu S_2 . S druge strane, provedbom kinematičkih analiza stabilnosti na podacima polu-automatske identifikacije diskontinuiteta (prilog 10) utvrđena je mogućnost pojave planarnog oblika sloma po plohi diskontinuiteta S_3 . Mogućnost klinastog sloma zabilježena je po presječnici diskontinuiteta S_1 i S_3 te S_3 i S_5 . Po presječnici diskontinuiteta S_1 sa diskontinuitetima S_2 i S_5 te presječnici diskontinuiteta S_2 i S_5 moguće je prevrtanje. Prevrtanje savijanjem moguće je po diskontinuitetu S_2 .

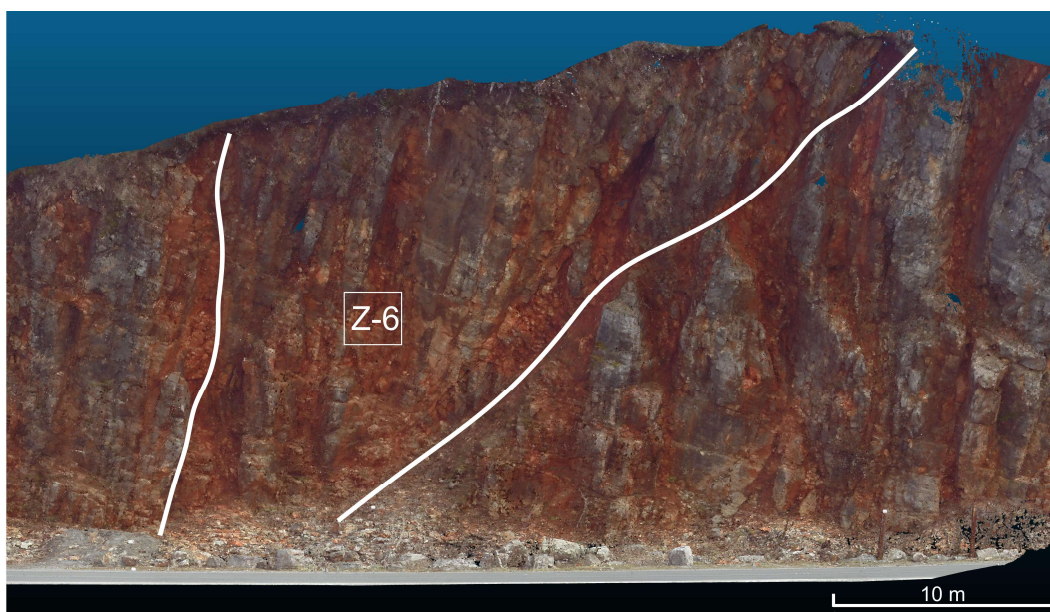
Tablica 5-5 Opis značajki diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z-5. Stereografska projekcija uključuje setove diskontinuiteta identificirane manualnom metodom koristeći *CloudCompare* (crvena linija) te polu-automatski koristeći softver *Discontinuity Set Extractor* (zeleni linija).



5.6. Inženjerskogeološka zona Z-6

Inženjerskogeološka zona Z-6 (slika 5-12, 5-13) izgrađena je od stijenske mase gornjotrijaskih dolomita. Zasjeak je maksimalne visine 16 metara, te prosječne orijentacije 321/78. Manualnom identifikacijom geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu utvrđeno je da je stijenska masa raspucana po pet setova diskontinuiteta, slojevitosti S_0 (297/35) te četiri seta pukotina S_1 (91/81), S_2 (146/81), S_3 (347/80) i S_5 (19/81). Polu-automatskom identifikacijom geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu utvrđeno je da je stijenska masa raspucana po četiri seta diskontinuiteta, slojevitosti S_0 (316/53) te tri seta pukotina S_1 (94/75), S_2 (150/86) i S_3 (341/76). Rezultati identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta prikazani su u tablici 5-6.

Na temelju rezultata terenskog opisa stanja stjenki diskontinuiteta te manualne i polu-automatske identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta provedena je GSI klasifikacija stijenske mase. Diskontinuiteti su s obzirom na ocjenu stjenki procijenjeni kao loši do dobri ($SCR=6-14$), dok je struktura procijenjena kao blokovito/poremećena do vrlo blokovita ($SR=38-46$) na temelju manualne identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta i raspadnuta do blokovita ($SR=0-68$) na temelju polu-automatske identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta. S obzirom na navedene terenske vrijednosti stanja diskontinuiteta, te ovisno o metodi određivanja geometrijskih značajki diskontinuiteta, GSI vrijednosti kreću se u rasponu od 34 do 56 (manualna identifikacija) i od 22 do 67 (polu-automatska identifikacija).



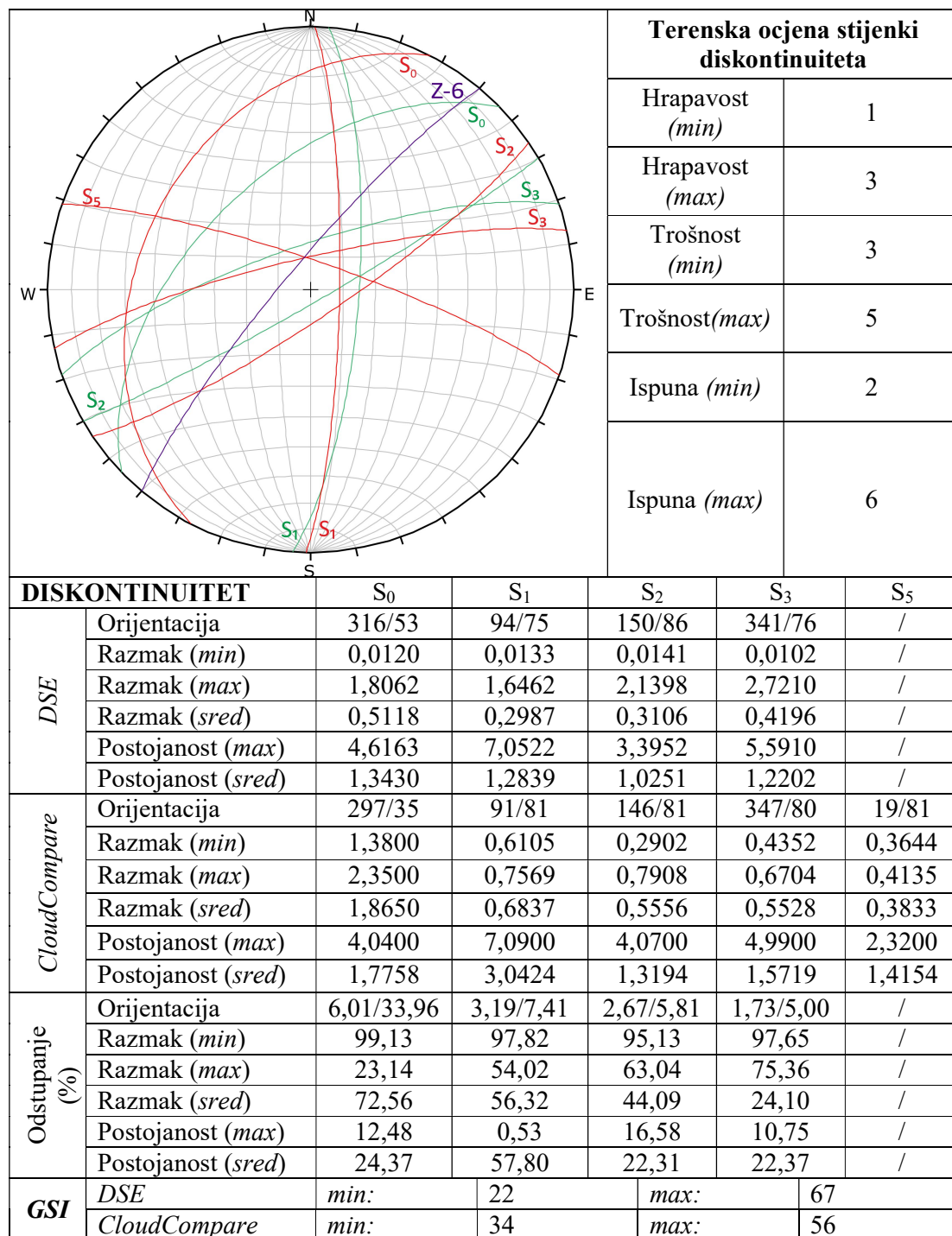
Slika 5-12 Inženjerskogeološka zona Z-6 - pogled na 3D model.



Slika 5-13 Inženjerskogeološka zona Z-6 - pogled na zonu.

Provedbom kinematičkih analiza stabilnosti na podacima manualne identifikacije diskontinuiteta (prilog 11) utvrđena je mogućnost pojave planarnog oblika sloma po plohi diskontinuiteta S_0 . Mogućnost klinastog sloma zabilježena je po presječnici diskontinuiteta S_0 i S_2 , S_0 i S_3 te S_0 i S_5 . Po presječnici diskontinuiteta S_1 i S_2 , S_1 i S_5 te presječnici diskontinuiteta S_2 i S moguće je prevrtanje. Prevrtanje savijanjem moguće je po diskontinuitetu S_2 . S druge strane, provedbom kinematičkih analiza stabilnosti na podacima polu-automatske identifikacije diskontinuiteta (prilog 12) također je utvrđena mogućnost pojave planarnog oblika sloma po plohi diskontinuiteta S_0 . Mogućnost klinastog sloma zabilježena je po presječnici diskontinuiteta S_0 i S_1 , S_0 i S_2 te S_0 i S_3 . Po presječnici diskontinuiteta S_1 i S_2 moguće je prevrtanje. Mogućnost pojave prevrtanja savijanjem nije zabilježena.

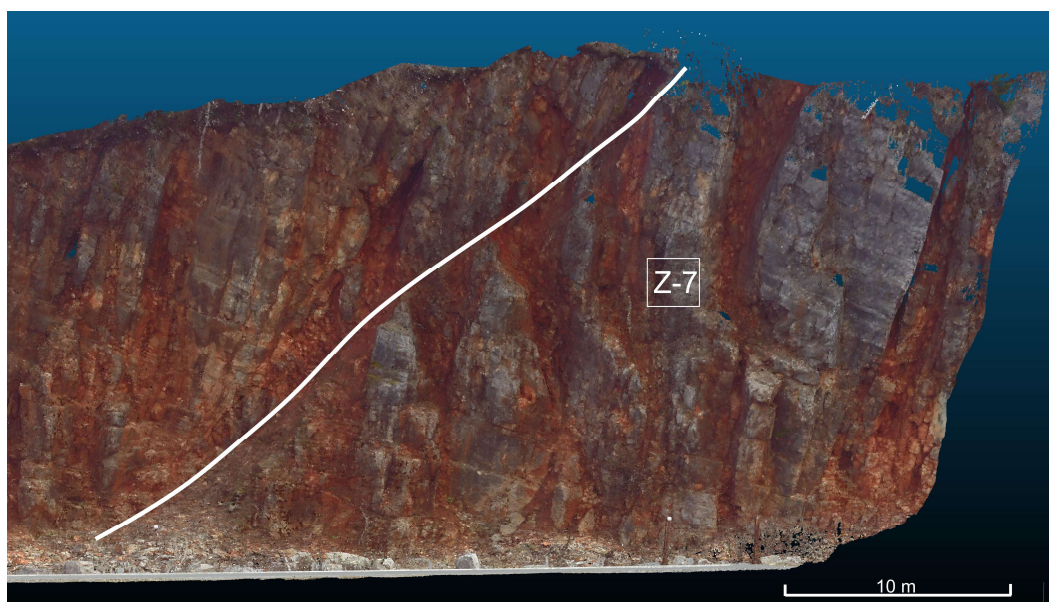
Tablica 5-6 Opis značajki diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z-6. Stereografska projekcija uključuje setove diskontinuiteta identificirane manualnom metodom koristeći *CloudCompare* (crvena linija) te polu-automatski koristeći softver *Discontinuity Set Extractor* (zeleni linija).



5.7. Inženjerskogeološka zona Z-7

Inženjerskogeološka zona Z-7 (slika 5-14, 5-15) izgrađena je od stijenske mase gornjotrijaskih dolomita. Zasjeak je maksimalne visine 23 metara, te prosječne orijentacije 311/77. Manualnom identifikacijom geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu utvrđeno je da je stijenska masa raspucana po pet setova diskontinuiteta, slojevitosti S_0 (304/41) te četiri seta pukotina S_1 (61/77), S_2 (126/75), S_3 (335/82) i S_4 (34/82). Polu-automatskom identifikacijom geometrijskih značajki diskontinuiteta na 3D modelu utvrđeno je da je stijenska masa također raspucana po pet setova diskontinuiteta, slojevitosti S_0 (312/50) te četiri seta pukotina S_1 (90/81), S_2 (121/80), S_3 (332/80) i S_4 (48/72). Rezultati identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta prikazani su u tablici 5-7.

Na temelju rezultata terenskog opisa stanja stjenki diskontinuiteta te manualne i polu-automatske identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta provedena je GSI klasifikacija stijenske mase. Diskontinuiteti su s obzirom na ocjenu stjenki procijenjeni kao povoljni do dobri ($SCR=10-14$), dok je struktura procijenjena kao blokovito/poremećena do blokovita ($SR=35-61$) na temelju manualne identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta i raspadnuta do blokovita ($SR=0-63$) na temelju polu-automatske identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta. S obzirom na navedene terenske vrijednosti stanja diskontinuiteta, te ovisno o metodi određivanja geometrijskih značajki diskontinuiteta, GSI vrijednosti kreću se u rasponu od 43 do 63 (manualna identifikacija) i od 32 do 64 (polu-automatska identifikacija).



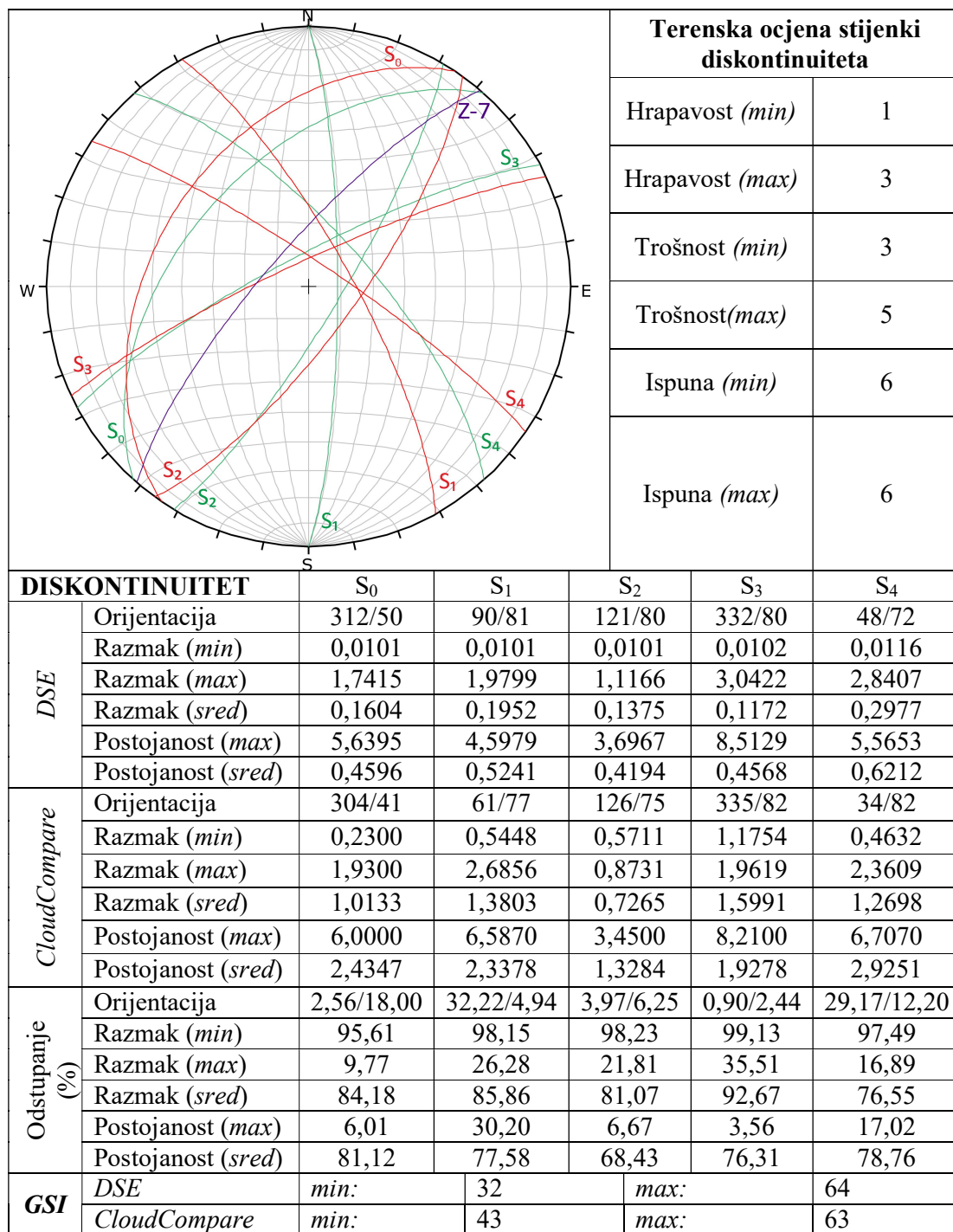
Slika 5-14 Inženjerskogeološka zona Z-7 - pogled na 3D model.



Slika 5-15 Inženjerskogeološka zona Z-7 - pogled na zonu.

Provedbom kinematičkih analiza stabilnosti na podacima manualne identifikacije diskontinuiteta (prilog 13) utvrđena je mogućnost pojave planarnog oblika sloma po plohi diskontinuiteta S_0 . Mogućnost klinastog sloma zabilježena je po presječnici diskontinuiteta S_0 i S_1 , S_0 i S_3 te S_0 i S_4 . Po presječnici diskontinuiteta S_1 i S_2 , S_1 i S_4 , te presječnici diskontinuiteta S_2 i S_4 moguće je prevrtanje. Prevrtanje savijanjem moguće je po diskontinuitetu S_2 . S druge strane, provedbom kinematičkih analiza stabilnosti na podacima polu-automatske identifikacije diskontinuiteta (prilog 14) također je utvrđena mogućnost pojave planarnog oblika sloma po plohi diskontinuiteta S_0 . Mogućnost klinastog sloma zabilježena je po presječnici diskontinuiteta S_0 i S_1 , S_0 i S_2 , S_0 i S_3 te S_0 i S_4 . Po presječnici diskontinuiteta S_1 i S_2 , S_2 i S_3 te S_2 i S_4 moguće je prevrtanje. Prevrtanje savijanjem moguće je po diskontinuitetu S_2 .

Tablica 5-7 Opis značajki diskontinuiteta u inženjerskogeološkoj zoni Z-7. Stereografska projekcija uključuje setove diskontinuiteta identificirane manualnom metodom koristeći *CloudCompare* (crvena linija) te polu-automatski koristeći softver *Discontinuity Set Extractor* (zeleni linija).



6. RASPRAVA

Inovativna primjena daljinskih metoda istraživanja u okviru koje se koriste 3D oblaci točaka visoke rezolucije predstavlja iskorak u području kartiranja stijenske mase. Budući da je stijenska masa obilježena vrlo kompleksnom 3D geometrijom i složenim strukturnim odnosima potrebno je na objektivan i reprezentativan način prikupiti podatke o geometrijskim značajkama diskontinuiteta koji će rezultirati realnim inženjerskogeološkim modelom stijenske mase. Tradicionalne metode kartiranja stijenske mase, provedene ili u jednoj (*engl. Scanline mapping*) ili u dvije dimenzije (*engl. Window mapping*) suviše su subjektivne, vremenski ograničene te rezultiraju najčešće malim brojem prikupljenih podataka. Također, prilikom terenskog kartiranja vrlo često ne postoji mogućnost pristupa određenim dijelovima stijenske mase. S druge strane, primjena daljinskih metoda istraživanja omogućava prikupljanje većeg broja podataka bez vremenskog i prostornog ograničenja, a time i definiranja reprezentativnijeg inženjerskogeološkog modela.

U okviru ovog diplomskog rada zadatak je bio utvrditi razlike između dvije metodologije kartiranja stijenske mase u okviru primjene daljinskih metoda istraživanja. Razmatrana je točnost i preciznost manualne i polu-automatske metode identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta, primjenom dva različita softvera: (1) *CloudCompare* za manualnu, te (2) *DSE* za polu-automatsku identifikaciju. Obje metodologije uključivale su identifikaciju dominantnih setova diskontinuiteta i njihovih orijentacija, međusobnog razmaka te postojanosti. Uz navedeno analiziran je utjecaj prikupljenih parametara na rezultat GSI klasifikacije stijenske mase te su provedene kinematičke analize stabilnosti. Parametri koji se odnose na stanje stijenki diskontinuiteta, potrebni za GSI klasifikaciju, određeni su prilikom terenskog istraživanja.

Provedena mjerenja orijentacija na 3D modelu stijenskog zasjeka, manualnom i polu-automatskom metodom, ukazala su na određena odstupanja između dvaju metoda, kako u broju identificiranih setova diskontinuiteta, tako i u dobivenim vrijednostima orijentacija. Razlike u vrijednostima orijentacija u većini slučajeva manje su od 10 %, uz činjenicu da su neznatno manja odstupanja u određivanju smjera nagiba nego kuta nagiba. Maksimalno zabilježeno odstupanje smjera nagiba iznosi 82,35%, a kuta nagiba 33,96%. Srednje odstupanje smjera nagiba iznosi 7,94%, a kuta nagiba 8,96%. Najveća međusobna odstupanja orijentacija diskontinuiteta primjenom dviju metoda utvrđena su prilikom identifikacije ploha slojevitosti (S_0) te vertikalnog seta pukotina (S_5). Zabilježena značajna odstupanja posljedica su malog broja točaka s kojima su predstavljene plohe diskontinuiteta

S_0 i S_5 , što je prvenstveno rezultat nemogućnosti adekvatnog snimanja nepovoljno orijentiranih ploha *TLS*-om. Pojedina ploha diskontinuiteta može biti nepovoljno orijentirana obzirom na stajalište *TLS*-a prilikom snimanja što najčešće rezultira malim brojem točaka kojim je pojedina ploha predstavljena. Navedeno znači da prilikom snimanja *TLS*-om upravo njegovo stajalište onemogućava snimanje ploha određene orijentacije. Upravo iz tog razloga primjenom polu-automatske metode nevedene plohe diskontinuiteta nije uopće moguće prepoznati ili su identificirane na pogrešan način što rezultira pogrešnim iznosom orijentacije. Nemogućnost identifikacije slojevitosti (S_0) polu-automatskom metodom vidljiva je na primjeru inženjerskogeološke zone Z-5, dok je nemogućnost identifikacije subvertikalnog seta pukotina S_5 vidljiva na primjeru inženjerskogeološke zone Z-6. Točnost određivanja orijentacije ovisi i o broju mjerenja, gdje veći broj mjerenja daje točnije rezultate.

Mjerenja razmaka setova diskontinuiteta opterećena su najvećim odstupanjem između primjene dvaju metoda. Prilikom analize rezultata promatrana su odstupanja maksimalnih, minimalnih te srednjih vrijednosti razmaka. Analizom je utvrđeno da su najveća odstupanja zabilježena prilikom usporedbe minimalnih razmaka (95,78%), a najmanja prilikom usporedbe maksimalnih razmaka (31,8%). Polu-automatskom metodom određivanja razmaka diskontinuiteta dobivene su precijenjene vrijednosti minimalnih razmaka centimetarskih dimenzija. Navedeno je rezultat prepoznavanja subotrogonalnih ploha nastalih trošenjem dolomita koje su primjenom polu-automatske metode interpretirane kao plohe diskontinuiteta. S druge strane, manualnom metodom mjerenja diskontinuiteta dobivene su realne vrijednosti minimalnih razmaka diskontinuiteta pojedinog seta (decimetarske dimenzije) budući da korisnik ima mogućnost sam odrediti između kojih diskontinuiteta će mjeriti razmak. Vrijednosti maksimalnih razmaka znatno su manjeg odstupanja. Razlog navedenog je činjenica da su maksimalni razmaci mjereni između jasno vidljivih, dominantnih ploha diskontinuiteta koje su upotrebom obje metode uspješno identificirane. Odstupanja srednjih razmaka prosječne su vrijednosti 66,36%, a navedeno je rezultat velikog odstupanja minimalnih vrijednosti razmaka što ima utjecaj na njihovu srednju vrijednost.

Rezultati određivanja postojanosti diskontinuiteta pokazuju značajnu razliku između postojanosti određenih manualnom i polu-automatskom metodom. Odstupanja između dvije metode velikog su raspona, od 3% do 81%. Manualna metoda omogućava određivanje postojanosti onih diskontinuiteta koji su predstavljeni samo tragom, dok je polu-automatska metoda ograničena na određivanje postojanosti onih diskontinuiteta koji su predstavljeni

plohom diskontinuiteta. Upravo je navedeno razlog vrlo velikog raspona odstupanja između dviju metoda.

Na temelju dobivenih vrijednosti geometrijskih značajki diskontinuiteta provedena je GSI klasifikacija stijenske mase prema metodologiji Sonmez i Ulusay (2002.). Prilikom klasifikacije diskontinuiteti su ocijenjeni na temelju terenskog istraživanja, kao loši do dobri, dok je ocjena strukture stijenske mase ovisila o geometrijskim značajkama diskontinuiteta dobivenim iz modela stijenskog zasjeka. Na temelju dobivenih rezultata GSI klasifikacije može se zaključiti da minimalne vrijednosti razmaka dobivene polu-automatskom metodom nisu reprezentativne vrijednosti budući da značajno povećavaju raspon vrijednosti GSI-a i time klasifikacijski sustav gubi svoj smisao. S druge strane, manualnom identifikacijom geometrijskih značajki dobivene su vrijednosti raspona GSI klasifikacije koje realno odražavaju stanje na terenu, a stijenska masa je generalno ocijenjena kao blokovito/poremećena do vrlo blokovita.

7. ZAKLJUČAK

Inženjerskogeološko kartiranje stijenske mase na stijenskom zasjeku Špičunak (Gorski kotar) provedeno je s ciljem usporedbe rezultata identifikacije geometrijskih značajki diskontinuiteta primjenom manualne i polu-automatske metode na 3D oblaku točaka dobivenim terestričkim laserskim skeniranjem (TLS). Na temelju identificiranih geometrijskih značajki diskontinuiteta te terenski opisanog stanja stijenki diskontinuiteta provedena je GSI klasifikacija stijenske mase. Na temelju identificiranih geometrijskih značajki diskontinuiteta provedene su i kinematičke analize stabilnosti u svrhu definiranja potencijalnih mehanizama sloma.

U okviru diplomskog rada razmatrane su dvije razine automatizacije prikupljanja podataka o geometrijskim značajkama diskontinuiteta: (1) manualna i (2) polu-automatska metoda. Na temelju provedenih analiza prikupljenih podataka o orijentaciji, razmaku i postojanosti diskontinuiteta te utvrđenih odstupanja izvedeno je nekoliko zaključaka:

- manualnom metodom dobiveni su točniji podaci o broju setova diskontinuiteta,
- međusobna odstupanja utvrđenih orijentacija diskontinuiteta primjenom dvaju metoda manja su od 10%,
- primjena polu-automatske metode u identifikaciji setova uvelike ovisi o kvaliteti generiranog 3D modela budući da lošija kvaliteta uzrokuje neprepoznavanje pojedinih setova diskontinuiteta
- određivanje razmaka diskontinuiteta opterećeno je najvećim međusobnim odstupanjem dvaju metoda
- polu-automatska metoda daje široki raspon vrijednosti razmaka diskontinuiteta s precijenjenim vrijednostima minimalnih razmaka,
- manualna metoda omogućava veću kontrolu nad provedbom mjerenja razmaka diskontinuiteta pa iz tog razloga daje realnije vrijednosti razmaka,
- manualna metoda daje bolje rezultate određivanja postojanosti diskontinuiteta budući da omogućava i mjerenje postojanosti onih diskontinuiteta koji su predstavljeni samo tragom, a ne i vidljivom plohom diskontinuiteta,
- polu-automatska metoda omogućava prikupljanje velikog broja podataka o geometrijskim značajkama diskontinuiteta u relativno kratkom vremenu (više stotina mjerenja u nekoliko minuta),

- manualna metoda jednostavnija je za primjenu budući da nije potrebno poznavanje i modifikacija niza ulaznih parametara potrebnih za polu-automatsku identifikaciju geometrijskih značajki diskontinuiteta,
- precijenjene vrijednosti minimalnih vrijednosti razmaka diskontinuiteta onemogućuju primjenu tih rezultata u klasifikaciji stijenske mase primjenom GSI klasifikacijskog sustava,
- u procesu klasifikacije stijenske mase gdje je potrebno utvrditi ocjenu stanja diskontinuiteta primjena daljinskih metoda istraživanja nije na razini razvoja da je to moguće, pa su iz tog razloga metode terenskog karitriranja još uvijek nezamjenjive.

Iz svega navedenog može se proizlazi da primjena daljinskih metoda istraživanja u inženjerskoj geologiji omogućava prikupljanje velikog broja reprezentativnih podataka o geometrijskim značajkama diskontinuiteta te iz tog razloga polako zamjenjuje klasično kartiranje. Usporedbom manualne i polu-automatske metode dolazi do izražaja nedovoljna razvijenost algoritama za polu-automatsku identifikaciju geometrijskih značajki diskontinuiteta te postoji potreba da inženjerski geolog validira dobivene rezultate i ocijeni da li su odraz pravog stanja na terenu kako ne bi došlo do donošenja pogrešnih i zavaravajućih zaključaka o stanju stijenske mase.

8. LITERATURA

BARTON N., CHOUBEY V., 1977. The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, *Rock Mechanics*, 10(1/2), str. 1-54.

BARTON N.R., 1974. A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. Norwegian Geotechnical Institute Publication, 105.

BIENIAWSKI Z.T., 1984. Rock mechanics design in mining and tunneling, A.A. Balkema, Rotterdam/Boston, 135 str.

BIENIAWSKI, Z.T., 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses, *South African Institution of Civil Engineers*, 15, str. 335-344.

BUYER, A., 2018. Contributions to Block Failure Analyses using Digital Joint Network Characterization. PhD. thesis; Institute of Rock Mechanics and Tunnelling, Graz University of Technology, Graz.

CAI, M., KAISER, P. K. & YANG, H. S., 2007. Estimation of Block Sizes for Rock Masses with Non-persistent Joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 40 (2), str. 169–192.

CAI, M., KAISER, P. K., UNO, H., TASAKA, Y. & MINAMI, M., 2004. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41 (1), str. 3–19.

ĐIKIĆ Z., 2016. Primjena tehnologije oblaka točaka za projektiranje sanacije stijenske kosine Špičunak, Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci. Diplomski rad, 105 str.

ELMO, D., ROGERS, S., STEAD, D. & EBERHARDT, E., 2014. Discrete Fracture Network approach to characterise rock mass fragmentation and implications for geomechanical upscaling. *Mining Technology* 123 (3), str. 149–161.

G. V., 2006. Remote 3D Mapping Of Rock Mass Structure. U: J. Kottenstette und F. Tonon (Hg.): *Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization. GoldenRocks 2006 - The 41st U.S. Rock Mechanics Symposium*. Golden, Colorado, 17-18.06.2006. American Rock Mechanics Association. 1, str. 63–75.

GAICH, A., PÖTSCH, M., SCHUBERT, W., 2006. Basics and application of 3D imaging systems with conventional and high-resolution cameras. U: Fulvio Tonon und Joseph T. Kottenstette (Hg.): Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterisation. Report on a Workshop Held in Golden. Colorado, str. 33–48.

GIGLI, G., CASAGLI, N., 2011. Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48, str. 187–198.

GONZALEZ DE VALLEJO, L., FERRER, M., 2011. Geological Engineering, Hoboken, CRC Press.

GOTTSBACHER, L., 2017. Calculation of the Young's Modulus for Rock Masses with 3DEC and comparing it with empirical methods. Master Thesis; Institute of Rock Mechanics and Tunnelling, Graz University of Technology, Graz.

HOEK E., BROWN E.T., 1997. Practical Estimates of Rock Strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 34 (8), str. 1165-1187.

HOEK E., BROWN, E.T., 1980a. Underground Excavations in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, London.

HOEK E., KAISER P.K., BAWDEN W.F., 1995. Support of Underground Excavations in Hard Rock, Rotterdam: A.A. Balkema, 215 str.

HOEK E., MARINOS P., BENISSI M., 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) Classification for Very Weak and Sheared Rock Masses. The Case of the Athens Shist Formation. Bull. Engl. Geol. Env., 57, str. 151-160.

HOEK, E., 1994. Strength of rock and rock masses, ISRM News Journal, 2(2), str. 4-16.

HRŽENJAK P, BRIŠEVAC, Z., 2009, Upute i predlošci za laboratorijske vježbe iz Mehanike stijena, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, interna skripta, Zagreb.

ISRM (1975) Commission on Terminology, Symbols and Graphic Representation 1975, Terminology (english, french, germany).

ISRM (1978) Commission on standardization of laboratory and field tests Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 15, str. 319-368.

ISRM (1979) Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials; Part 1: Suggested method for determination of the uniaxial compressive strength of rock materials; Part 2: Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression.

ISRM (1985) Suggested method for determining point load strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstract, 2, str.-60.

JABOYEDOFF,M., METZGER,R., OPPIKOFER,T., COUTURE,R., DERRON,M., LOCAT,J., TURMEL, D., 2007. New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points:COLTOP-3D software. RockMechanics. Meeting Society's Challenges and Demands. U:Proceedings of the 1st Canada–US Rock Mechanics Symposium,Vancouver,Canada, str. 31.

LASIĆ, Z., 2008., Primjena laserskih uređaja, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu - Geodetski fakultet, interna skripta, Zagreb.

MARINOS P., MARINOS V., HOEK E., 2007. Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. Underground works under special conditions, str. 13-21.

MARINOS, P., Hoek, E., 2000. GSI-A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation. Proc. GeoEng 2000 Conference, Melbourne.

MARINOS, P., HOEK, E., 2001. Estimating the Geotechnical Properties of Heterogeneous Rock Masses such as Flysch, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 60, str. 85-92.

MILER M., ĐAPO A., KORDIĆ B., MEDVED I., 2007. Terestrički laserski skeneri. Ekscentar, 10, str. 35-38.

PALMSTROM A., 1995. Rmi – a rock mass characterization system for rock engineering purposes, PhD. thesis; Department of Geology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo, Oslo.

PALMSTROM A., 2005. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD), Tunnelling and Underground Space Technology, 20, str. 362–377.

PALMSTROM, A., 1982. The Volumetric Joint Count – A Useful and Simple Measure of The Degree of Rock Jointing. Proc. 4th International Congress International Association for Engineering Geology, 5, str. 221 – 228.

POLLAK, D., 2007. Utjecaj trošenja karbonatnih stijenskih masa na njihova inženjerskogeološka svojstva, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, str. 299.

PRIEST, S. D., 1993. Discontinuity Analysis for Rock Engineering. Chapman and Hall, str. 473, London.

RIQUELME, A. J., ABELLÁN, A. & TOMÁS, R., 2015. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. Engineering Geology, 195, str. 185–195.

RIQUELME, A. J., ABELLÁN, A., TOMÁS, R. & JABOYEDOFF, M., 2014. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. Computers and Geosciences, 68, str. 38–52.

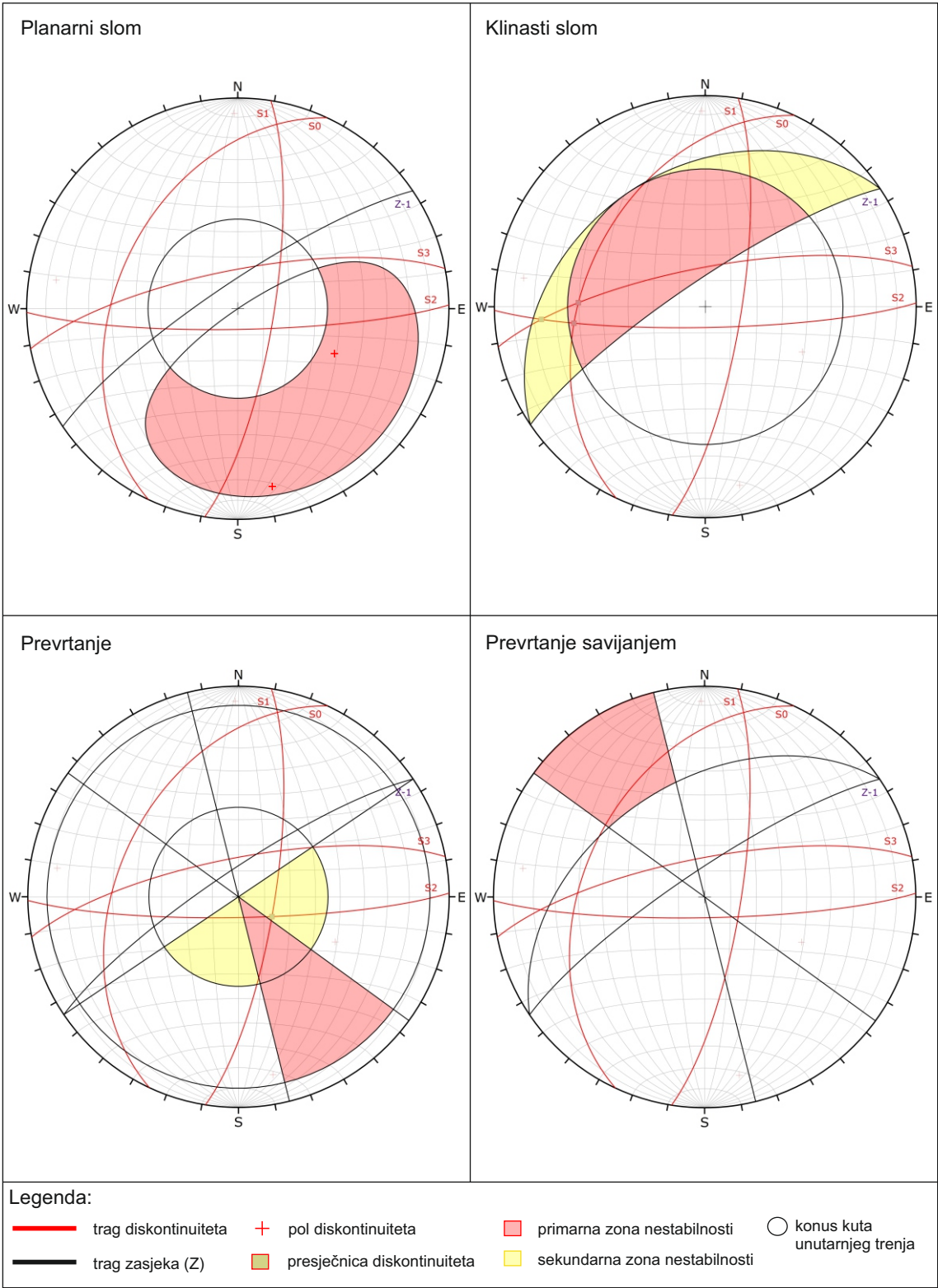
RIQUELME, A., TOMÁS, R., CANO, M., PASTOR, J. L. & ABELLÁN, A., 2018. Automatic Mapping of Discontinuity Persistence on Rock Masses Using 3D Point Clouds. Rock Mechanics and Rock Engineering, 8. str. 135-140

SAVIĆ, D. i DOZET, S., 1983. Osnovna geološka karta 1:100 000, list Delnice, L 33 – 90. Zagreb: Savezni geološki zavod, Beograd.

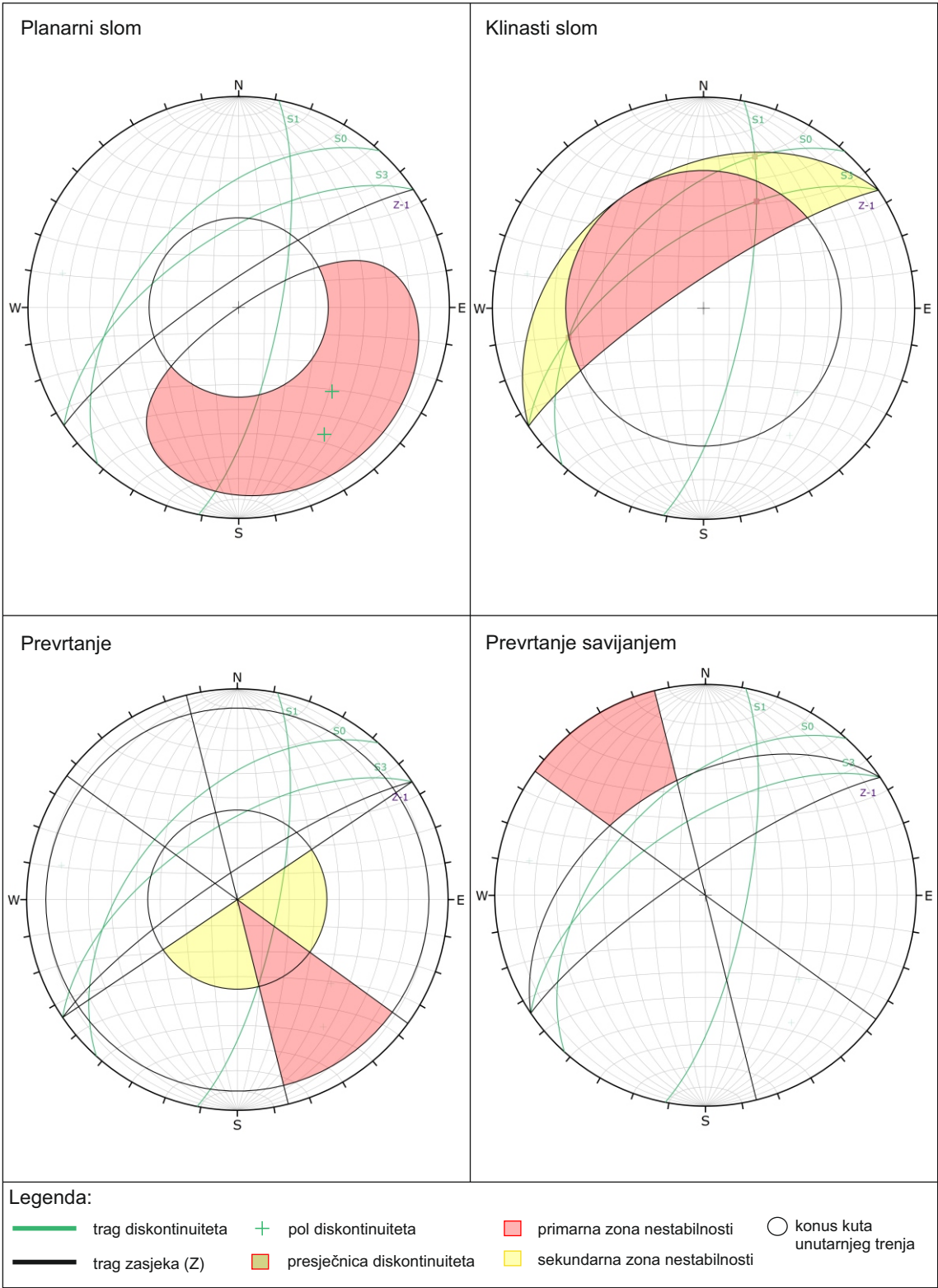
SAVIĆ, D. i DOZET, S., 1983. Osnovna geološka karta 1:100 000: Tumač za list Delnice, L 33 – 90. Zagreb: Savezni geološki zavod, Beograd.

- SLOB, S., HACK, H., FENG,Q., RÖSHOFF, K., TURNER,A. 2007. Fracture mapping using 3D laser scanning techniques. U:Proceedings of the 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics, Lisbon, Portugal, str.299–302.
- SLOB, S., VANKNAPEN, B., HACK,R., TURNER,K., KEMENY,J. 2005. Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning. Transp.Res.Rec.:J.Transport.Res.Board 1913, str. 187–194.
- SONMEZ, H., ULUSAY, Z., 2002., A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slopa stability case studies, Bulletin of Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University, Turkey.
- STILLE, H. & PALMSTRØM, A., 2003. Classification as a tool in rock engineering. Tunnelling and Underground Space Technology 18 (4), str. 331–345.
- VÖGE, M.,LATO,M.J.,DIEDERICHS,M.S., 2013. Automated rock mass discontinuity mapping from 3-dimensional surface data. Engineering Geology, 164, str. 155–162.
- WYLLIE, D.,C., MAH, C., W., 2005. Rock slope engineering, Civil and mining, 4th edition, New York, Spoon Press.

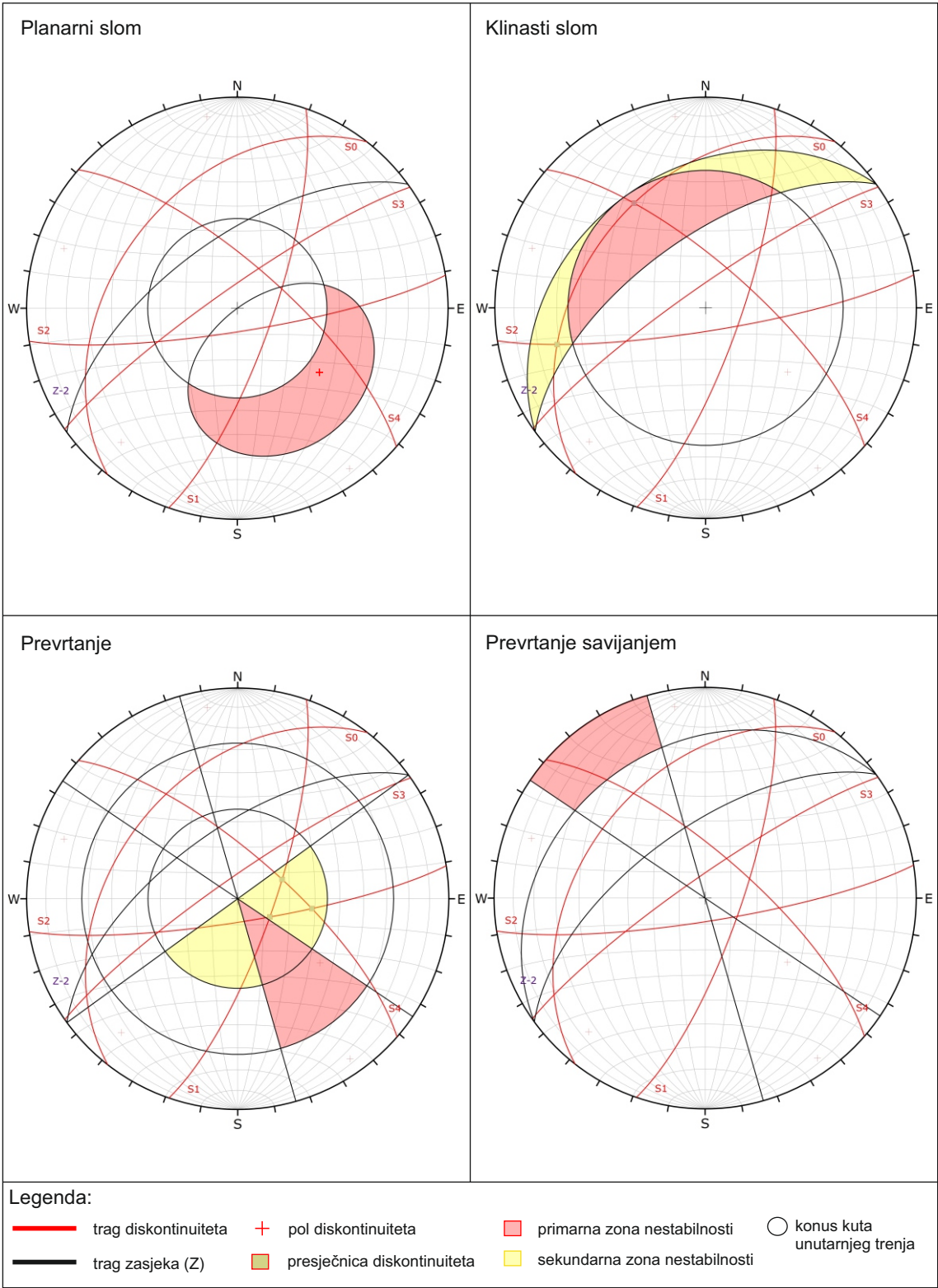
Prilog 1. Kinematička analiza stabilnosti (*CloudCompare*) - Inženjerskogeološka zona Z-1



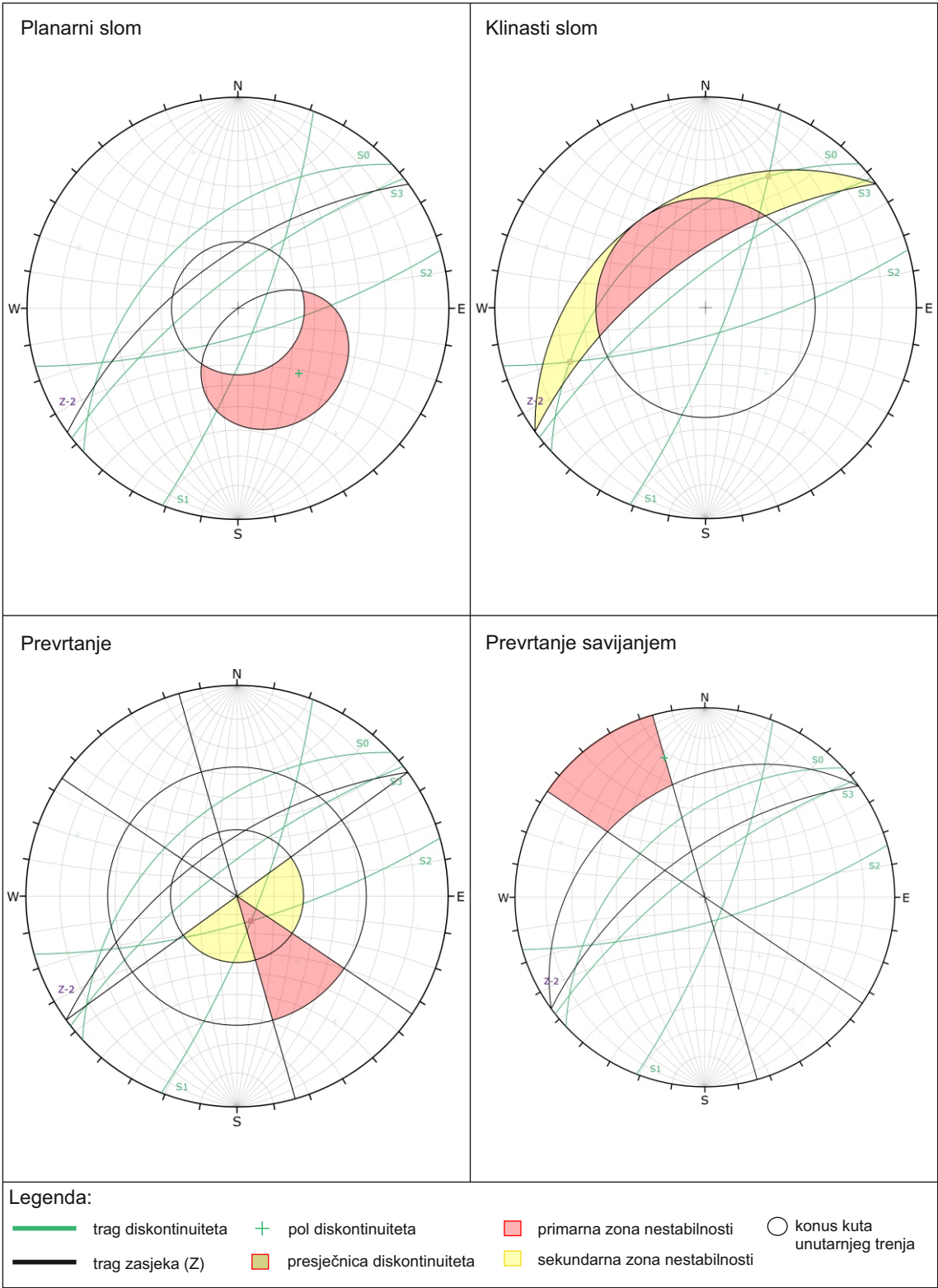
Prilog 2. Kinematička analiza stabilnosti (DSE) - Inženjerskogeološka zona Z-1



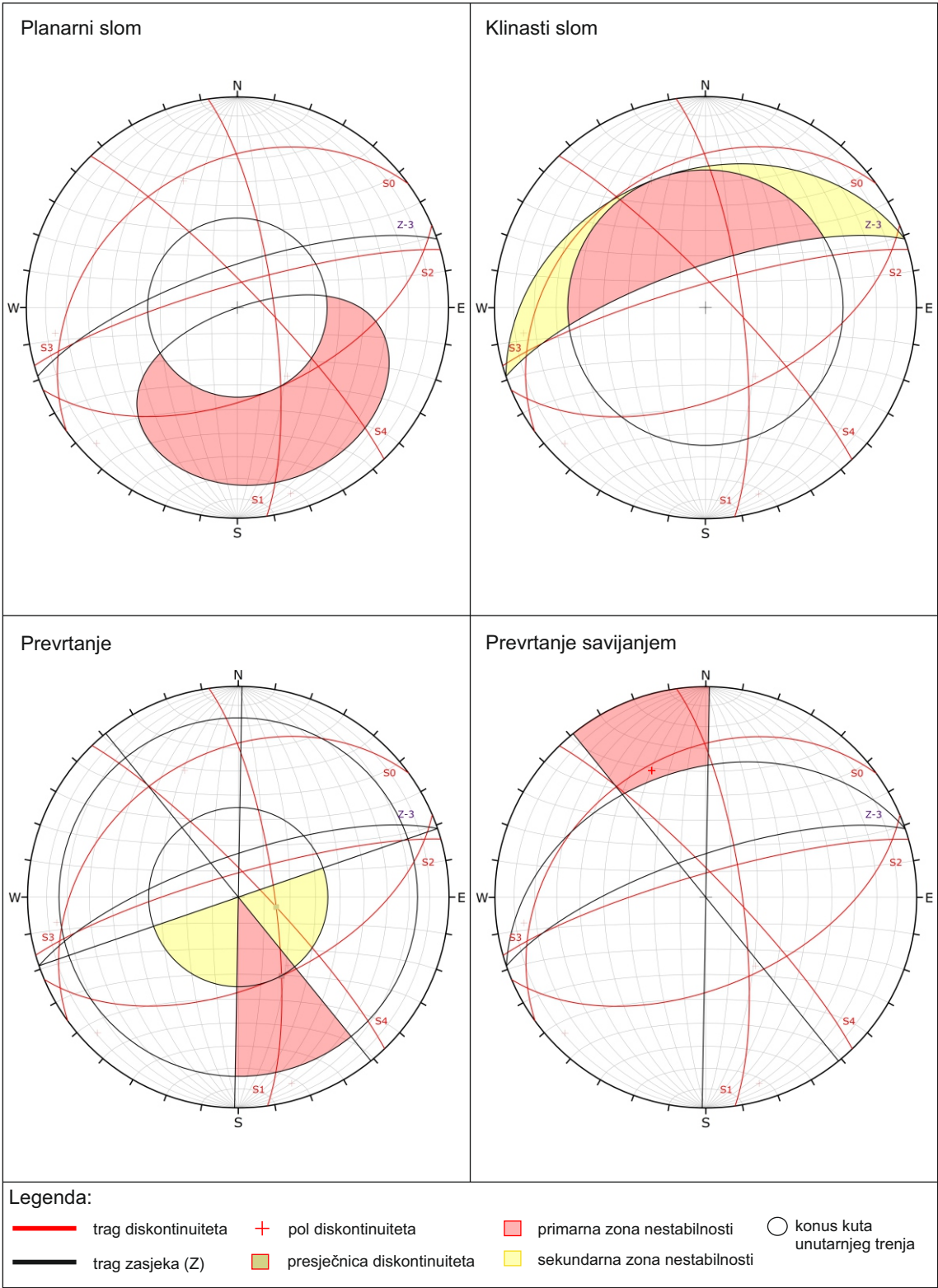
Prilog 3. Kinematička analiza stabilnosti (*CloudCompare*) - Inženjerskogeološka zona Z-2



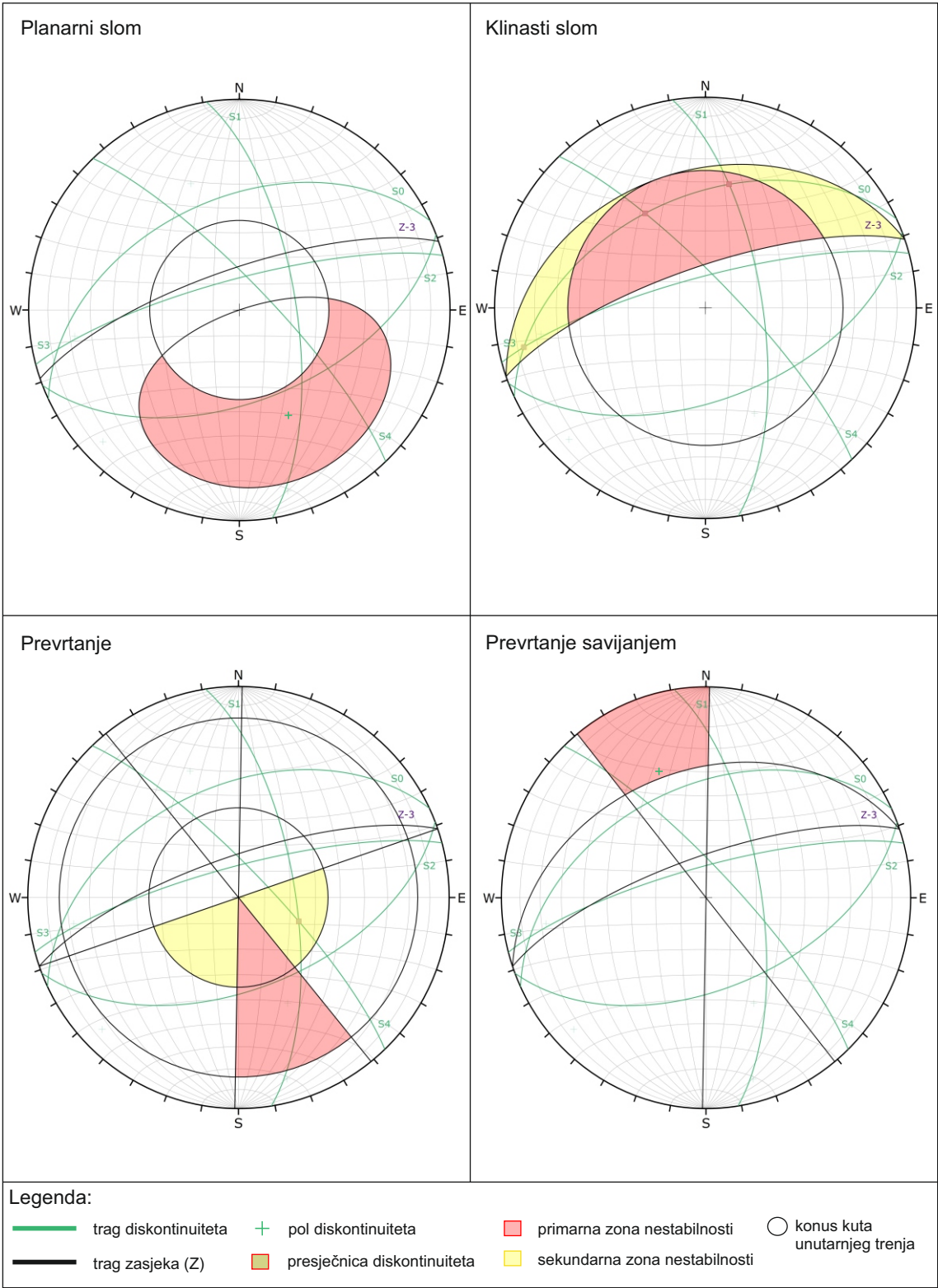
Prilog 4. Kinematička analiza stabilnosti (DSE) - Inženjerskogeološka zona Z-2



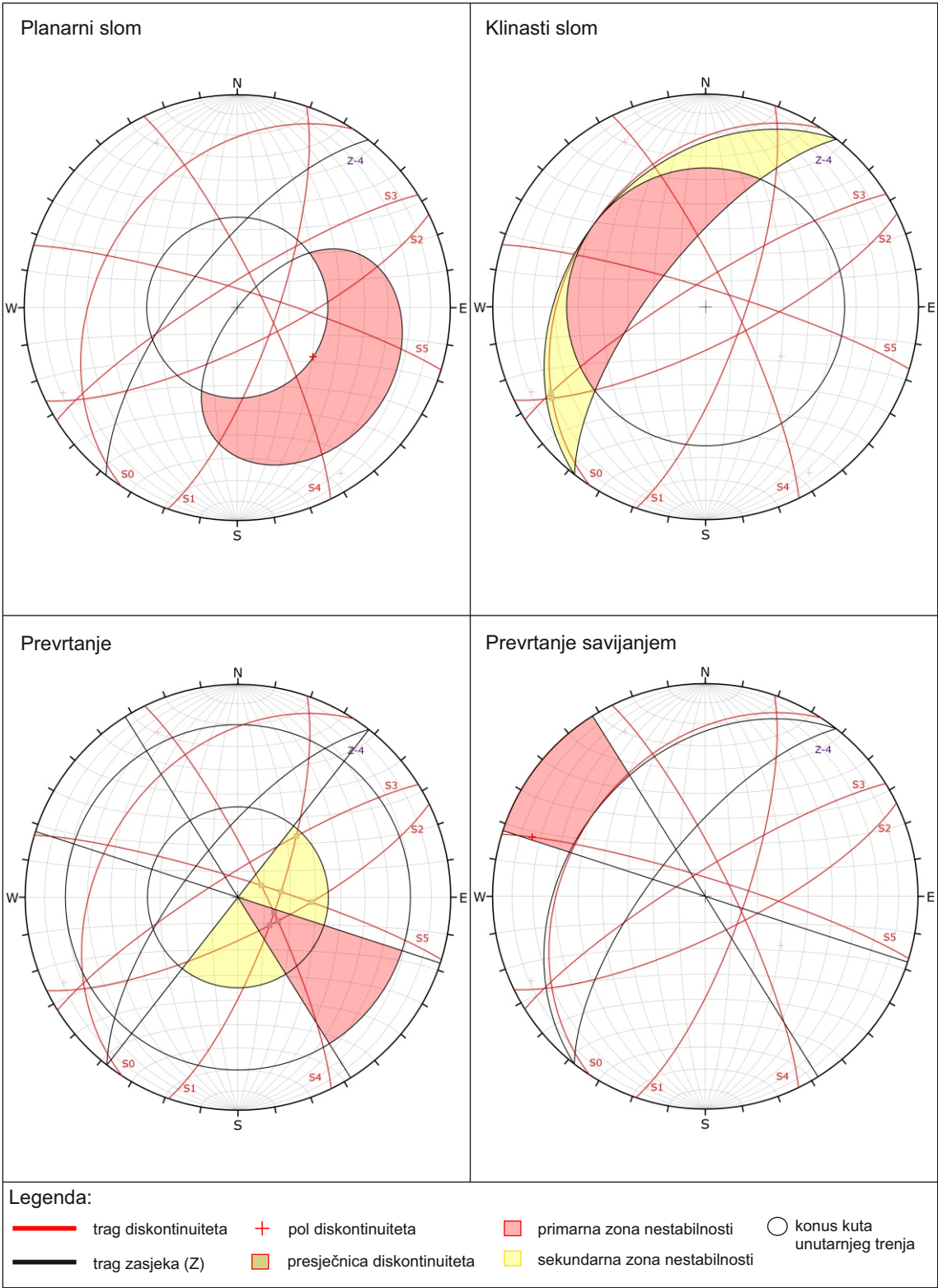
Prilog 5. Kinematička analiza stabilnosti (*CloudCompare*) - Inženjerskogeološka zona Z-3



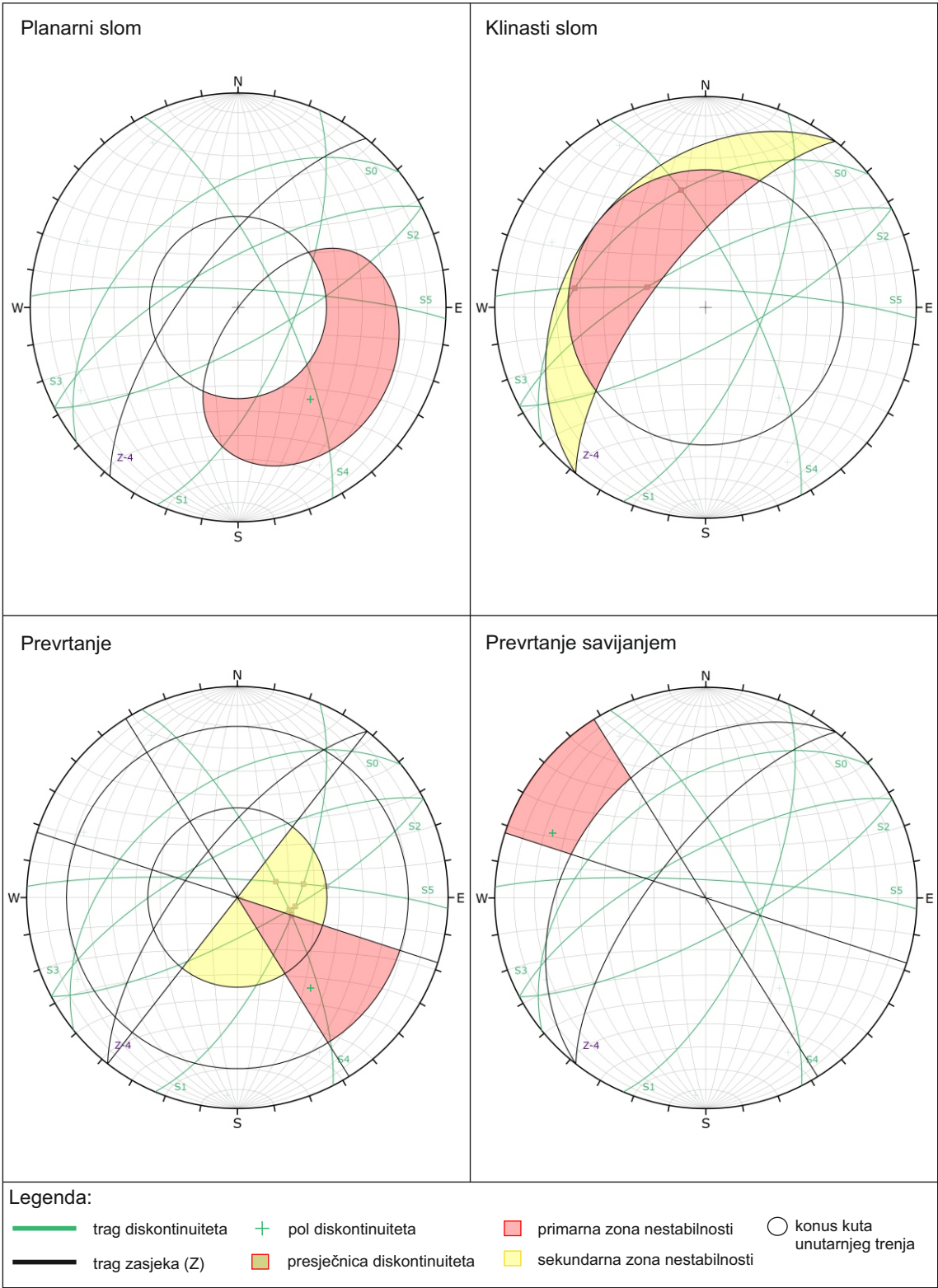
Prilog 6. Kinematička analiza stabilnosti (DSE) - Inženjerskogeološka zona Z-3



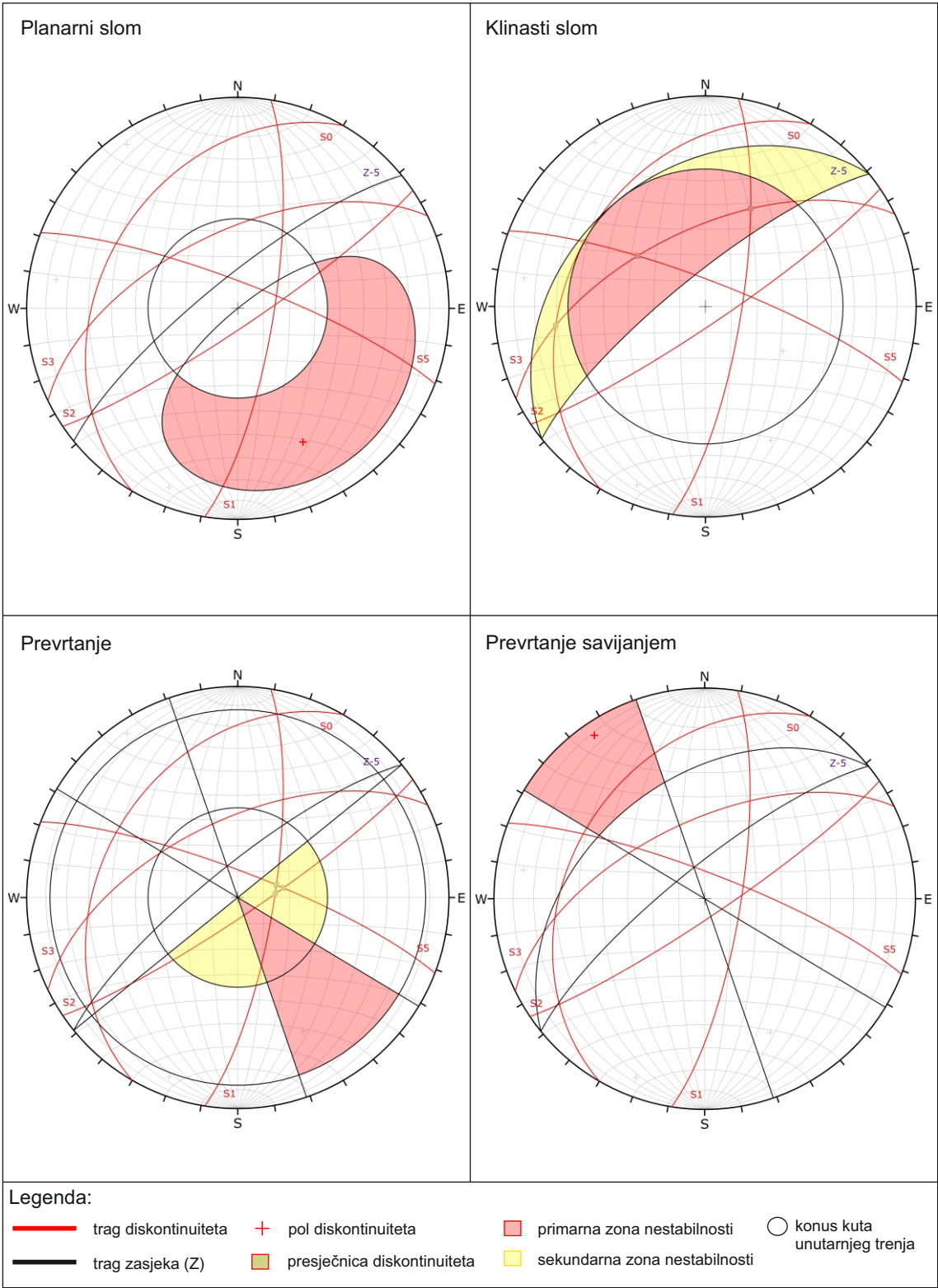
Prilog 7. Kinematička analiza stabilnosti (*CloudCompare*) - Inženjerskogeološka zona Z-4



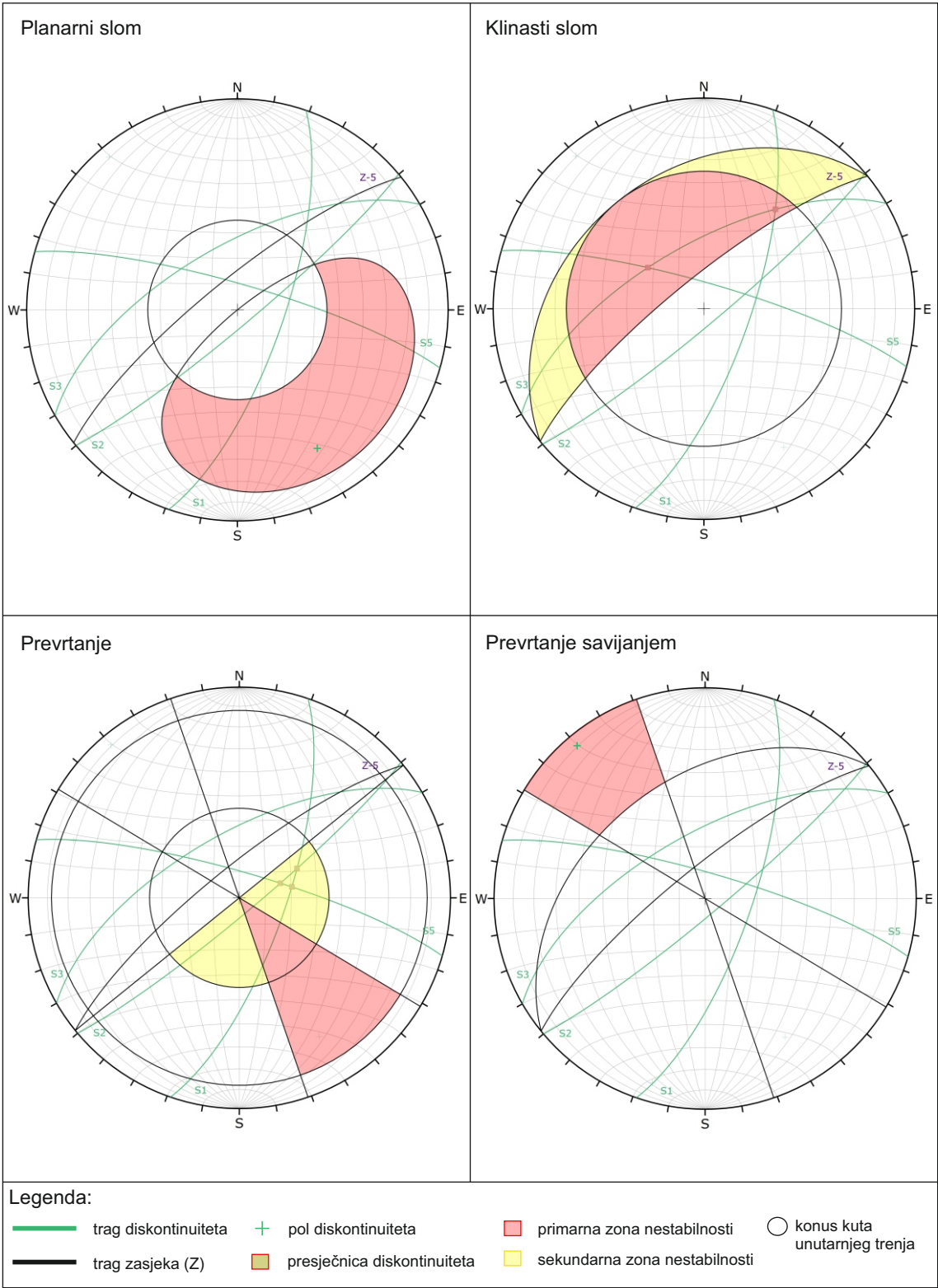
Prilog 8. Kinematička analiza stabilnosti (DSE) - Inženjerskogeološka zona Z-4



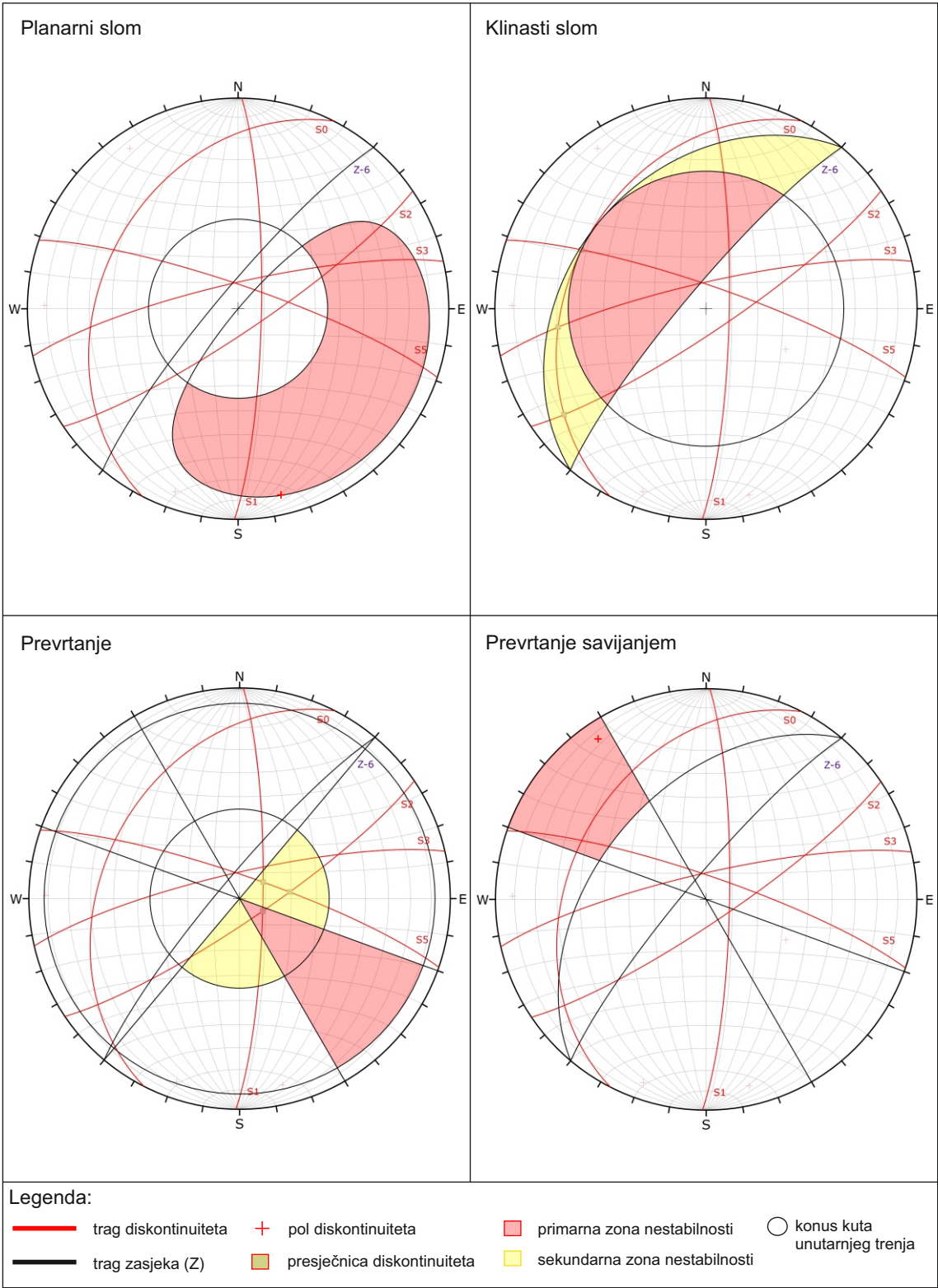
Prilog 9. Kinematička analiza stabilnosti (*CloudCompare*) - Inženjerskogeološka zona Z-5



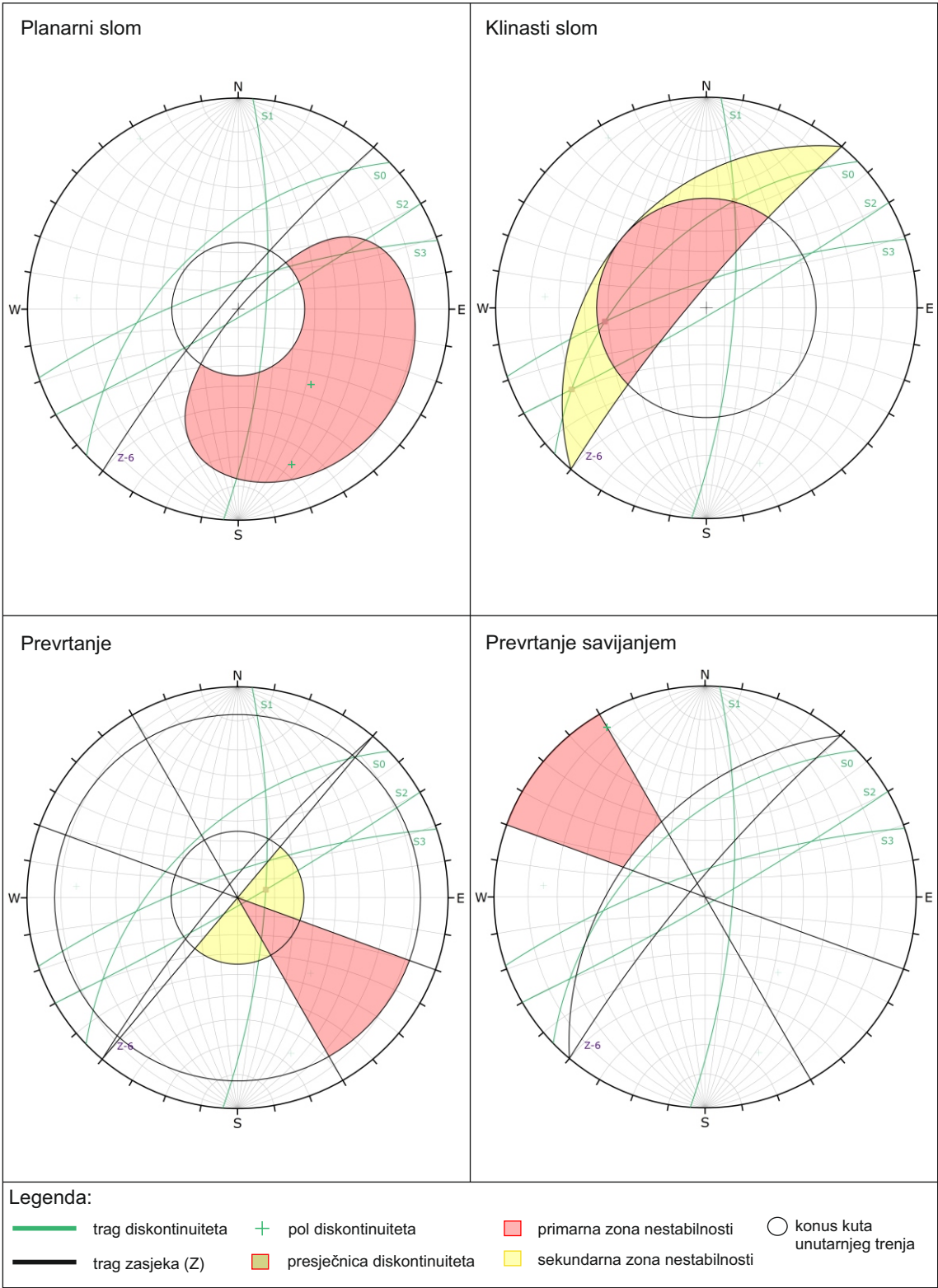
Prilog 10. Kinematička analiza stabilnosti (DSE) - Inženjerskogeološka zona Z-5



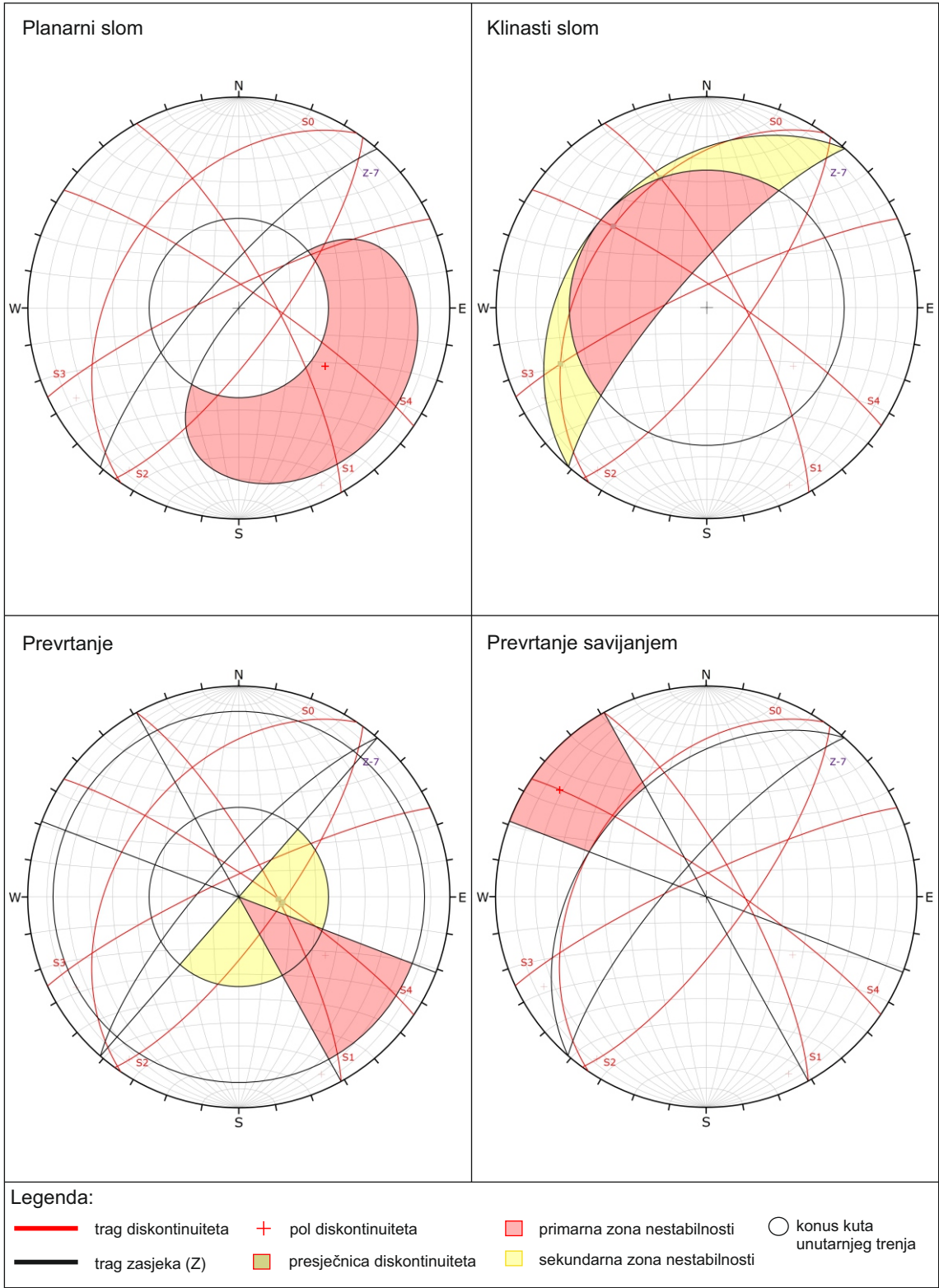
Prilog 11. Kinematička analiza stabilnosti (*CloudCompare*) - Inženjerskogeološka zona Z-6



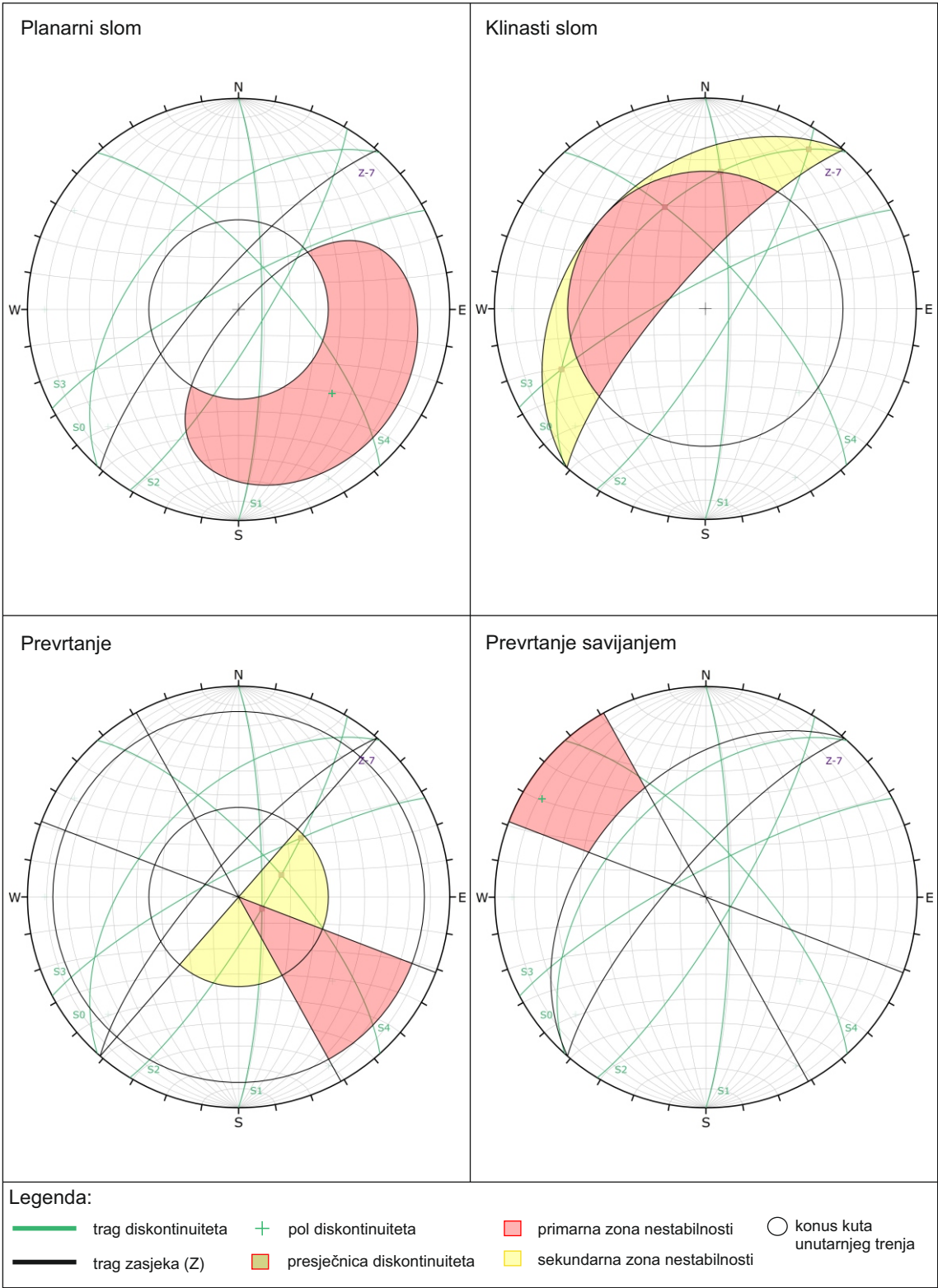
Prilog 12. Kinematička analiza stabilnosti (DSE) - Inženjerskogeološka zona Z-6



Prilog 13. Kinematička analiza stabilnosti (*CloudCompare*) - Inženjerskogeološka zona Z-7



Prilog 14. Kinematička analiza stabilnosti (DSE) - Inženjerskogeološka zona Z-7





KLASA: 602-04/20-01/57
URBROJ: 251-70-03-20-3
U Zagrebu, 30.06.2020.

Hrvoje Lukačić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/57, UR. BROJ: 251-70-13-20-1 od 01.04.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

INŽENJERSKOGEOLOŠKO KARTIRANJE STIJENSKE MASE NA ZASJEKU ŠPIČUNAK (GORSKI KOTAR) PRIMJENOM DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu doc. dr. sc. Martin Krkač, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Doc. dr. sc. Martin Krkač

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Stanko Ružičić

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i
studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)