

UNIVERZA V LJUBLJANI
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA GEOLOGIJO

**KARAKTERIZACIJA INŽENIRSKO-GEOLOŠKIH
LASTNOSTI FLIŠA Z UPORABO
TERESTRIČNEGA LASERSKEGA SKENIRANJA IN
BLIŽNJESLIKOVNE FOTOGRAMETRIJE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

TINA ŽIVEC

LJUBLJANA, junij 2020

UNIVERSITY OF LJUBLJANA
FACULTY OF NATURAL SCIENCES AND ENGINEERING
DEPARTMENT OF GEOLOGY

**CHARACTERISATION OF ENGINEERING
GEOLOGICAL PROPERTIES OF FLYSCH ROCK
MASS BY USING TERRESTRIAL LASER
SCANNING AND CLOSE-RANGE
PHOTOGRAMMETRY**

Ph. D. THESIS

TINA ŽIVEC

LJUBLJANA, June 2020

PODATKI O DISERTACIJI

Število listov: 292

Število strani: 225

Število slik: 79

Število preglednic: 25

Število literaturnih virov: 170

Število prilog: 4

Študijski program: GRAJENO OKOLJE

Smer: GEOLOGIJA

Komisija za zagovor:

Predsednik: *prof. dr. Boštjan Markoli*

Mentor: *izr. prof. dr. Timotej Verbovšek*

Somentorica: *doc. dr. Mojca Kosmatin Fras*

Član: *izr. prof. dr. Marko Vrabec*

Članica: *doc. dr. Karmen Fifer Bizjak*

Član: *prof. dr. Krištof Oštir*

Ljubljana,

ZAHVALA

Na tem mestu bi se rada zahvalila za pomoč in podporo pri doktorski disertaciji mentorju izr. prof. dr. Timoteju Verbovšku in somentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras.

Doktorska disertacija je bila izdelana v okviru operacije krepitve razvojnih oddelkov v podjetjih (KROP), v sklopu katere smo v podjetju Elea iC d.o.o. želeli raziskati obstoječe možnosti, na novo razviti orodja oz. metode ter jih povezati z drugimi orodji, da omogočimo inženirskim geologom hitrejše, bolj učinkovito in natančnejše delo. Pri projektu smo sodelovali s podjetjem DFG Consulting d.o.o. in TU Graz iz Avstrije. Razvojno raziskovalno skupino, ki smo jo ustanovili, smo poimenovali NTg2 (New Technologies in Geomatics and Geomechanics). Brez te operacije, ki je bila sofinancirana s strani Evropske unije in sodelavcev, vseh meritev in analiz ne bi mogla izvesti.

Meritve smo izvajali na aktivnih gradbiščih in v kamnolomu, zato bi se rada zahvalila predstavnikom DARS, DRI, Imprefond ter g. Nedeljku Čeligoju in g. Simonu Čeligoju, da so nam omogočili časovni okvir za meritve v predoru Markovec, podzemni garaži Park San Giusto v Trstu in v kamnolomu Elerji. Obenem se zahvaljujem izr. prof. dr. Mateju Dolencu (UL NTF) za izvedbo analize rentgenske difrakcije, dr. Tilnu Urbančiču (UL FGG) za podporo pri geometrični analizi ter dr. Draženu Navratilu (Hrvatski geološki institut) in dr. Markusu Pötschu (podjetje 3GSM) za podporo pri analizah v programu ShapeMetriX3D.

Disertacijo posvečam mami Milojki, očetu Danijelu in sestri Maši.

IZVLEČEK V SLOVENSKEM JEZIKU

Pri geotehničnem projektiranju objektov v heterogenih hribinah, kot je fliš, je pomembna karakterizacija hribine, s katero opišemo inženirsko-geološke lastnosti na obravnavanem območju. Za karakterizacijo hribine je ključno poznavanje geomehanskih lastnosti intaktne kamnine in diskontinuitet, ki vplivajo na geotehnično obnašanje hribine predvsem v času izkopa, pri heterogenih hribinah pa je pomembno poznavanje tudi deleža posameznih litoloških enot. Za fliš jugozahodne Slovenije in vzhodne Italije je značilno ciklično menjavanje tankoplastnatega laporovca in peščenjaka, ki se pojavljajo v različnih razmerjih in imajo različne geomehanske lastnosti. Debelina plasti je od 2 cm do 60 cm, zato je pri geološki spremljavi izkopa, z ročnim zajemom podatkov, težko ovrednotiti posamezne litološke enote, posebno pri nedostopnih in nestabilnih izdankih ter izkopnih čelih. Posledično so geološki popisi velikokrat pomanjkljivi in subjektivni, kar vpliva tudi na geotehnično projektiranje. V doktorski disertaciji sem se zato usmerila v možnost vključevanja bližnjelikovne fotogrametrije in terestričnega laserskega skeniranja v geološko spremljavo pri izkopih v tankoplastnatih fliših, saj omogočajo določitev litologije in geometrijskih lastnosti diskontinuitet. Meritve smo izvedli na izbranih lokacijah podzemnih in površinskih izkopov v flišu. Rezultati so pokazali, da sta pri natančnem načrtovanju zajema podatkov bližnjelikovna fotogrametrija in terestrično lasersko skeniranje primerna pri geološkem popisu tankoplastnatega fliša, pri čemer je priporočljiva kombinacija obeh. Pri karakterizaciji fliša s sistemom inženirsko-geološke klasifikacije RMR, s katerim predvidimo geotehnično obnašanje hribin, predstavljata pomemben doprinos v smeri objektivne inženirsko-geološke spremljave s hitrimi in natančnimi meritvami izdankov in izkopnih čel, saj je projektiranje, ki se navezuje na merjene podatke iz terena je bolj realno od vnaprej določenih analitičnih rešitev.

Ključne besede:

fliš, terestrično lasersko skeniranje, bližnjelikovna fotogrametrija, klasifikacija hribine, intenziteta odboja

ABSTRACT

For geotechnical design in heterogeneous rock mass, such as flysch, the rock mass characterisation is important, as it describes engineering geological properties of the investigated area. The knowledge of geomechanical properties of intact rock and discontinuities is crucial for rock mass characterisation, because the geotechnical behaviour of the rock mass during the excavation depends on them. For heterogeneous rock mass characterisation, we need to determine the ratio between different lithological units, as well. Flysch of southwestern Slovenia and east Italy is represented by the cyclic alternation of thin-bedded marlstone and sandstone, with different percentage and different geomechanical properties. Layers are usually 2 cm to 60 cm thick, therefore it is difficult to determine individual lithological units in the field, only using manual data acquisition. This is especially apparent when logging distant and unstable outcrops and excavated faces. As a result, the geological face logs lack of measured data and are subjective. For my doctoral thesis I have therefore decided to test the possibility for integrating close-range photogrammetry and terrestrial laser scanning in the geological logging of excavations in thin-bedded flysch, as it is possible to extract geometrical properties of discontinuities and determine the lithology. Measurements have been performed in selected ground and underground excavations in flysch. The results showed, that in case the data acquisition using close-range photogrammetry and terrestrial laser scanning has been properly planned, it can be appropriate for geological logging of thin-bedded flysch. Due to some limitations, it is advisable to combine both methods. When characterizing flysch by using the RMR classification system, based on which we predict the geotechnical behaviour of the rock mass, the used technologies represent an important contribution towards the objective engineering-geological logging. It is possible to quickly and accurately acquire data of excavated faces. Design relating to measured field data is more realistic than predefined analytical solutions.

Key words:

flysch, terrestrial laser scanning, close-range photogrammetry, rock mass classification, intensity

ŠIRŠI POVZETEK VSEBINE

Karakterizacija hribine ima pomembno vlogo pri umeščanju geotehničnih objektov, kot so predori in podporne konstrukcije v hribino. Z njo opišemo geomehanske lastnosti intaktne kamnine in diskontinuitet, ki vplivajo na geotehnično obnašanje hribine tako v času izkopa kot kasnejšega obratovanja, pri čemer vplivajo različni geomehanski parametri različno. Glede na obravnavane objekte in geomehanske lastnosti hribin, so raziskovalci pri določanju sistemov klasifikacije poudarjali različne parametre, ki vplivajo na geotehnično obnašanje in so pomembni za nadaljnje geotehnično projektiranje. Pri geotehničnem projektiranju na območju Slovenije so se najbolj uveljavili sistemi klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989) in Q (Barton et al., 1974) ter orodje GSI (Marinos in Hoek, 2000).

V inženirski geologiji določamo litološke in strukturne lastnosti hribin na podlagi geološkega popisa izdankov in izkopnih čel. Parametre litologije (sestavo, preperevanje) in diskontinuitet (vpade, gostote in raztezanja ter odprtost) določamo na osnovi standarda SIST EN ISO 14689-1:2004 in priporočil ISRM (Barton, 1978). Na terenu zajemamo podatke predvsem ročno, kar vpliva na količino in kakovost zajetih podatkov za nadaljnje analize, zaradi velikokrat težko dostopnih in nestabilnih izdankov ter časovnih omejitev pa so geološki popisi tudi pomanjkljivi in subjektivni. Z digitalizacijo postopkov zajemanja in obdelave podatkov se je povečala težnja po hitrejšem, natančnejšem in objektivnem delu inženirskega geologa, zato so raziskovalci preučevali možnost vključevanja bližnjelikovne fotogrametrije (Kemeny & Post, 2003; Gaich et al., 2006; Sturzenegger, 2010; Umili et al., 2013; Verma in Bourke, 2019) in terestričnega laserskega skeniranja (Sturzenegger et al., 2007; Lato et al., 2009; Fekete in Diedrichs, 2013) v geološko kartiranje in spremljavo izkopov. Rezultati raziskav so med drugim pokazali, da lahko lidarski oblak točk iz TLS uporabimo za geometrijsko analizo diskontinuitet (Slob et al., 2002; Sturzenegger in Stead, 2009; Riquelme et al., 2014; Wang et al., 2017; Drews et al., 2018) in za razlikovanje med litološkimi enotami na podlagi intenzitete odboja laserskega žarka (Pesci et al., 2008; Pfeifer et al., 2007; Franceschi et al., 2009; Burton et al., 2011; Humair et al., 2015; Matasci et al., 2015).

Z uveljavljanjem bližnjelikovne fotogrametrije in terestričnega laserskega skeniranja na področju inženirske geologije sem z doktorsko disertacijo preverila možnosti njunega vključevanja v geološko spremljavo pri umeščanju objektov v heterogeno hribino, kot je tankoplastnati fliš. Zanj je značilno ciklično menjavanje laporovca in peščenjaka, z različnimi geomehanskimi lastnostmi. Pri razumevanju geotehničnega obnašanja fliša je zato pomembno poznavanje deleža posamezne kamnine in geometrijskih lastnosti diskontinuitet.

Zaradi tankih plasti debeline od 2 cm do 60 cm, slabo izraženih strukturnih lastnosti in pojavov plasti z vmesno ali prehodno sestavo med laporovcem in peščenjakom, je zahtevane podatke za analizo težko natančno določiti samo iz ročnega popisa. Otežena je tudi karakterizacija fliša na osnovi uveljavljenih sistemov klasifikacije RMR in Q, saj nepopolno vrednotita geomehanske parametre pri tankoplastnatih heterogenih hribinah.

Meritve v sklopu doktorske disertacije sem izvedla na treh izbranih lokacijah, kjer so se izvajali izkopi v flišu: v kamnolomu Elerji pri Škofijah, koder sem izvedla bistvene meritve z največ izvedenimi raziskavami, v predoru Markovec med Koprom in Izolo ter v podzemni garaži Park San Giusto v Trstu. Meritve smo izvajali med delovnim procesom, zato smo bili omejeni s časom, na rezultate pa so vplivali tudi povečana vsebnost trdnih delcev, slaba osvetljenost, povišana temperatura, ter predvsem uporabljena metoda izkopa, ki lahko zabriše strukturne lastnosti hribine in otežuje določitev litologije. Na izbranih lokacijah sem izvedla bližnjelikovno stereofotogrametrijo, SfM fotogrametrijo s fotoaparatom in pametnim telefonom in terestrično lasersko skeniranje ter rezultate primerjala z ročnimi geološkimi popisi. V sklopu analize sem preverila možnost določitve litologije, stopnje preperevanja in stopnje vlažnosti iz vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka ter geometrijske lastnosti diskontinuitet. Z raziskavami sem želela združiti ugotovitve predhodnih ločenih raziskav za določanje geometrijskih lastnosti diskontinuitet in litologije. Podobne raziskave so izvajali Matasci et al. (2015) in Humair et al. (2015), vendar ne na tankoplastnatih fliših niti z namenom vrednotenja parametrov za karakterizacijo fliša s sistemom inženirsko-geološke klasifikacije RMR. Sistem klasifikacije RMR sem izbrala zaradi kategorij vrednotenja parametrov, ki so podobne mednarodnim priporočilom ISRM (Barton, 1978) in standardu SIST EN ISO 14689-1:2004, omogoča pa tudi vrednotenje parametrov, ki so vezani na litologijo, stopnjo preperevanja in stopnjo vlažnosti s pomočjo uteženega povprečja.

Za karakterizacijo tankoplastnatega fliša iz lidarskega oblaka točk sem izvedla natančne raziskave skeniranja vzorcev s TLS, s poudarkom na analizi intenzitete odboja laserskega žarka glede na litologijo, stopnjo vlažnosti in stopnjo preperevanja, v odvisnosti od razdalje. V sklopu meritev sem izvedla detajlne analize, s katero sem primerjala zajete podatke z različnimi metodami in preverila ustrezno načrtovanje izmer za interpretacijo rezultatov. Za dosego čim bolj natančnih fotogrametričnih 3D modelov sem za vključevanje bližnjelikovne fotogrametrije testirala različne velikosti tarč za njihovo avtomatsko prepoznavanje. Pri testiranju sem uporabila 12-bitne kodirane krožne tarče z velikostjo polmera središčnega kroga od 10 mm do 30 mm ter različne objektivne in nastavitve fotografiranja. Rezultati so pričakovani, saj tarče velikost do 15 mm pri večjih razdaljah ni možno prepoznati, podobno niti največjih tarč pri najkrajših razdaljah snemanja. Njihovo prepoznavanje je odvisno predvsem od velikosti

tarče na sliki in razdalje fotografiranja, zato je pri vključevanju fotogrametrije ključno poznavanje opreme, katero uporabljamo za zajem podatkov. V kamnolomu Elerji smo izvedli obsežen sklop meritev in geometrično analizo z uporabo SfM fotogrametrije s fotoaparatom in pametnim telefonom, terestričnega laserskega skeniranja, 3D laserskega skeniranja in rezultate primerjali z referenčno tahimetrično izmero z inštrumentom Leica Nova Multistation MS50. Rekonstruirane oblake točk sem primerjala v programu CloudCompare. Rezultati analize natančnosti oblakov točk z referenčnim lidarskim oblakom točk in izmerjenimi razdaljami med oslonilnimi točkami kažejo zelo majhne razlike. Pri izmeri, opravljeni s SfM fotogrametrijo so bile razlike +/-2 mm, s terestričnim laserskim skenerjem +/-4 mm, medtem ko so bile večje razlike pri fotogrametričnem oblaku točk iz fotografij pametnega telefona (+/- 8 mm) in 3D laserskim skenerjem (+/-15 mm). Največje razlike so bile pri vseh izmerah opazne na mestih, kjer je zaradi lokacij stojišč in morfologije skenirane površine prihajalo do odsotnosti odboja laserskega žarka ter na robovih območja. S primerjavo vseh uporabljenih metod sem ugotovila, da so vse našteje metode uporabne v inženirski geologiji, saj dosegajo zadovoljivo natančnost ob upoštevanju priporočil stroke za zajem podatkov. Uporabimo jih lahko kot podlogo za izvedbo meritev glavnih parametrov diskontinuitet, kot so orientacija, dolžina raztezanja in gostota med diskontinuitetami.

Analize vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka sem izvedla za določitev litologije, stopnje preperevanja in stopnje vlažnosti na izdanku ali izkopnem čelu v tankoplastnatem flišu. Iz rezultatov analize sledi, da so razlike med izbranimi razredi, pri čemer sem lahko zagotovo določila posamezne litološke enote za plasti debeline nad 6 cm, lahko pa tudi razlikujemo med vlažnimi in mokrimi območji hribine. Kljub temu, da se histogrami rezultatov med sabo delno prekrivajo, so vse skupine med sabo statistično značilne. Predstavljen pristop zato lahko vključimo v geološki popis izdanka in izkopnega čela v tankoplastnati heterogeni hribini.

Analizo določitve geometrije diskontinuitet sem izvedla na lidarskih in fotogrametričnih oblakih točk in na fotogrametričnem 3D modelu. Za analizo sem uporabila dostopne računalniške programe, ki izvajajo delno avtomatizirane analize: ShapeMetriX 3D (Gaich et al., 2006), Facets (Dewez et al., 2016) ter DSE (Riquelme et al., 2014). Polavtomatsko lahko zanesljivo določimo vpad za diskontinuitete, ki so večje od 20 cm, s podrobnejšo analizo pa tudi ploskve diskontinuitet, ki so večje od 6 cm. V primeru ploskev diskontinuitet, ki so manjše od 6 cm so rezultati nezanesljivi predvsem zaradi nepravilnosti, ki ne predstavljajo diskontinuitet, vendar jih programi vključijo v analizo. Največji izziv je pri geometrijski analizi diskontinuitet predstavljala določitev vpada diskontinuitet, ki so na čelu orientirane tako, da so vidne kot linije in so v flišu večinoma vezane na plastnatost. Določitev vpada ni možna iz oblaka točk, lahko pa jih izločimo iz fotogrametričnega 3D modela. Podobni izziv predstavlja tudi določitev

odprtosti diskontinuitet, ker je praviloma manjša od 1 cm. Za določitev parametra potrebujemo detajlno skeniranje, kar pa zahteva daljši čas snemanja, ki je pri geološki spremljavi aktivnih izkopov omejen. Uporabljeni pristop in računalniške programe lahko vključimo v geološko spremljavo v tankoplastnatem flišu, vendar je zaradi določenih omejitev pri obeh tehnologijah priporočljiva kombinacija terestričnega laserskega skeniranja in bližnjelikovne fotogrametrije.

V sklopu disertacije sem ovrednotila uporabnost analiz pri klasifikaciji hribine s sistemom RMR (Bieniawski, 1989) na podlagi opravljenih meritev. Za parametre, ki so vezani na litološke značilnosti (enoosna tlačna trdnost, stopnja preperevanja in dotoki vode) sem uporabila rezultate analiz intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka v odvisnosti od litologije, stopnje preperevanja in stopnje vlažnosti. Pri vrednotenju geometrijskih parametrov sem vključila rezultate geometrijske analize diskontinuitet. Izračunane vrednosti RMR so bile primerljive z ročnimi popisi, zato lahko bližnjelikovno fotogrametrijo in terestrično lasersko skeniranje vključimo v proces geološkega kartiranja in geološke spremljave izkopnih del.

Pri karakterizaciji fliša s sistemom klasifikacije RMR in uporabljenimi podatki iz rezultatov bližnjelikovne fotogrametrije in terestričnega laserskega skeniranja ugotavljam, da predstavljata pomemben doprinos v smeri objektivne inženirsko-geološke spremljave, saj omogočata hitre in natančne meritve izdankov in izkopnih čel. Obenem so meritve bolj varne v primeru oddaljenih izdankov in aktivnih izkopnih čel. Rezultati disertacije predstavljajo tudi osnovo pri podpori določanja tehničnih specifikacij, pri čemer so pomembni dobro zastavljeni cilji, na podlagi katerih je odvisna uspešnost detekcije zajetih podatkov Namreč, projektiranje, ki se navezuje na merjene podatke iz terena, je bolj realno od vnaprej določenih analitičnih rešitev.

IZJAVA

Spodaj podpisana **TINA ŽIVEC**, izjavljam, da je doktorska disertacija z naslovom **KARAKTERIZACIJA INŽENIRSKO-GEOLOŠKIH LASTNOSTI FLIŠA Z UPORABO TERESTRIČNEGA LASERSKEGA SKENIRANJA IN BLIŽNJESLIKOVNE FOTOGRAMETRIJE** rezultat mojega raziskovalnega dela.

Podpis doktorandke

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Namen, raziskovalni cilji in hipoteza disertacije	3
1.2	Struktura doktorske disertacije	4
2	TEORETIČNI DEL	5
2.1	Geografski pregled območja	5
2.2	Geološke značilnosti obravnavanega območja	6
2.3	Inženirsko-geološke lastnosti fliša	9
3	PREGLED IN OPIS METOD	13
3.1	Ročni zajem podatkov diskontinuitet in litologije	13
3.1.1.1	Litološka sestava	15
3.1.1.2	Stopnja preperevanja kamnine	16
3.1.2	Opis diskontinuitet	17
3.1.2.1	Orientacija diskontinuitet	18
3.1.2.2	Gostota razpokanosti	18
3.1.2.3	Dolžina diskontinuitet v prostoru	19
3.1.2.4	Hrapavost diskontinuitet	20
3.1.2.5	Odprtost diskontinuitet	21
3.1.2.6	Polnitev odprtih diskontinuitet	22
3.1.2.7	Trdnost sten diskontinuitet	22
3.1.2.8	Dotoki vode	22
3.1.3	Karakterizacija in klasifikacija hribin	23
3.1.3.1	Klasifikacija hribinskih pritiskov po Terzaghiju	25
3.1.3.2	Sistem klasifikacije NATM	25
3.1.3.3	Indeks RQD	25
3.1.3.4	Sistem klasifikacije Q	27

3.1.3.5	Orodje GSI	27
3.1.3.6	RMR klasifikacija hribin	31
3.1.4	Karakterizacija heterogenih hribin	33
3.2	Bližnjelikovna fotogrametrija	36
3.2.1	Stereofotogrametrija	41
3.2.1.1	Metode zajema in registracije podatkov v stereofotogrametriji	41
3.2.1.1.1	Zajem podatkov	41
3.2.1.1.2	Izvor napak	43
3.2.1.1.3	Načrtovanje zajema	44
3.2.1.2	Georeferenciranje	46
3.2.1.3	Obdelava podatkov in izdelava 3D modela	46
3.2.1.3.1	ShapeMetriX 3D	47
3.2.2	SfM fotogrametrija	49
3.2.2.1	Metode zajema in registracije podatkov v SfM fotogrametriji	51
3.2.2.1.1	Zajem podatkov	51
3.2.2.1.2	Izvor napak	53
3.2.2.1.3	Načrtovanje zajema	54
3.2.2.2	Georeferenciranje	55
3.2.2.3	Obdelava podatkov in izdelava 3D modela	56
3.2.2.4	Program Agisoft Metashape	58
3.2.2.4.1	Zajem podatkov in priprava fotografij	58
3.2.2.4.2	Izdelava redkega oblaka točk	58
3.2.2.4.3	Izdelava gostega oblaka točk	59
3.2.3	Uporaba bližnjelikovne fotogrametrije v inženirski geologiji	60
3.3	Terestrično lasersko skeniranje	64
3.3.1	Metode zajema in registracije podatkov v TLS	65
3.3.1.1	Zajem podatkov	65
3.3.1.2	Načrtovanje zajema s TLS	68
3.3.2	Georeferenciranje	72

3.3.3	Obdelava podatkov	73
3.3.4	Intenziteta odboja laserskega žarka	75
3.3.5	Uporaba TLS v inženirski geologiji	77
4	REZULTATI IN RAZPRAVA.....	83
4.1	Detajlno skeniranje vzorcev s TLS	84
4.1.1	Odvisnost intenzitete odboja laserskega žarka od litologije in razdalje.....	87
4.1.2	Odvisnost intenzitete odboja laserskega žarka od litologije, stopnje vlažnosti in razdalje	90
4.1.3	Odvisnost intenzitete odboja laserskega žarka od litologije, stopnje preperevanja in razdalje	93
4.2	Testiranje tarč za uporabo v SfM fotogrametriji	96
4.3	Geometrična analiza uporabljenih meritev	102
4.3.1	SfM fotogrametrija.....	105
4.3.2	Zajem podatkov s pametnim telefonom.....	109
4.3.3	Terestrično lasersko skeniranje s TLS skenerjem Riegl VZ-400.....	111
4.3.4	3D laserski skener Leica BLK360	113
4.3.5	Izmera razdalj z laserskim razdaljemerom Leica DISTO S910	115
4.4	Kamnolom Elerji.....	118
4.4.1	Uporabljene metode.....	119
4.4.2	Pregled obravnavanega območja.....	121
4.4.3	Rezultati.....	121
4.4.4	Popis izdanka in litološki profil	121
4.4.5	Terestrično lasersko skeniranje (TLS).....	122
4.4.6	Analiza lidarskega oblaka točk (Riegl) glede na litološko sestavo in stopnjo vlažnosti.....	124
4.4.7	Mineraloška in sedimentološka analiza fliša.....	128
4.4.8	Korelacija med vrednostmi intenzitete odboja ter litologijo in stopnjo vlažnosti	132
4.4.9	Določitev geometrije diskontinuitet.....	135
4.4.10	Karakterizacija fliša po sistemu klasifikacije RMR	148

4.4.11	Razprava – kamnolom Elerji	149
4.4.11.1	Določitev litologije, stopnje preperevanja in stopnje vlažnosti.....	149
4.4.11.2	Določitev geometrije diskontinuitet	150
4.4.11.3	Karakterizacija fliša po sistemu klasifikacije RMR	151
4.5	Podzemna garaža Park San Giusto	152
4.5.1	Uporabljene metode.....	153
4.5.2	Pregled obravnavanega območja.....	154
4.5.3	Izvedba meritev in rezultati	155
4.5.4	Popis izkopnega čela	157
4.5.5	Analiza oblaka točk glede na litološko sestavo in stopnjo vlažnost.....	158
4.5.6	Analiza geometrije diskontinuitet.....	166
4.5.7	Karakterizacija fliša po sistemu klasifikacije RMR	170
4.5.8	Razprava	172
4.5.8.1	Določitev litologije, stopnje preperevanja in stopnje vlažnosti.....	172
4.5.8.2	Določitev geometrije diskontinuitet	173
4.5.8.3	Karakterizacija fliša po sistemu klasifikacije RMR	174
4.6	Predor Markovec	176
4.6.1	Pregled metod	177
4.6.2	Pregled obravnavanega območja.....	179
4.6.3	Izvedba meritev in rezultati	180
4.6.4	Popis izkopnega čela	182
4.6.5	Analiza oblaka točk glede na litološko sestavo.....	182
4.6.6	Analiza geometrije diskontinuitet.....	187
4.6.7	Karakterizacija fliša po sistemu klasifikacije RMR	189
4.6.8	Razprava	190
4.6.8.1	Določitev litologije, stopnje preperevanja in stopnje vlažnosti.....	190
4.6.8.2	Določitev geometrije diskontinuitet	191
4.6.8.3	Karakterizacija fliša po sistemu klasifikacije RMR	192

4.7	Vključevanje bližnjelikovne fotogrametrije in terestričnega laserskega skeniranja v proces inženirsko-geološke spremljave.....	193
5	ZAKLJUČKI	197
6	SUMMARY	204
7	VIRI	212

SEZNAM SLIK

Slika 2.1: Geološka karta obravnavanega območja z lokacijami izvedenih meritev (predor Markovec, kamnolom Elerji, garaža Park San Giusto) in označenim profilom E-E': al – aluvij kvartarja; 3E_2 – menjavanje peščenjaka in laporovca z vložki apnenega konglomerata in breče - fliš; Pc, E – foraminiferni apnenec: miliolidni, alveolinski in numulitni apnenec; K_2^2 – temno siv apnenec v menjavi z rudistnim apnencem (po OGK, Pleničar, Polšak in Šikić, 1969).	6
Slika 2.2: Pogled na izkopno čelo leve cevi predora Markovec v flišu, z menjavanjem laporovca in peščenjaka v zgornjem delu ter megaplastjo kalkarenita v spodnjem delu (stacionaža km 0+109,70).	8
Slika 2.3: Različni deleži peščenjaka in meljevca v laboratorijskih in terenskih pogojih (Tziallas et al., 2013, 82).	10
Slika 2.4: Primeri fliša z različnimi deleži peščenjaka in laporovca: sveža hribina (a in b), preperela hribina (c in d).	11
Slika 3.1: Geološki popis izdanka fliša v dolini reke Glinščice (a) ter izkopnega čela v predoru Markovec (b).	15
Slika 3.2: Osnovne značilnosti diskontinuitet v hribini (prirejeno po Hudson, 1989).	17
Slika 3.3: Predstavitev problematike cenzuriranja zaradi meje območja vzorčenja in pokritega dela izdanka (po Zeeb et al., 2013, 1547)	20
Slika 3.4: Sestavni deli klasifikacije in karakterizacije hribine (po Milne, 2007, str. 112).	24
Slika 3.5: Izkopno čelo v flišu (predor Markovec, Koper); določena vrednost RMR: 50 (zadovoljiva hribina), GSI: 43-47 (V).	35
Slika 3.6: Izkopno čelo v flišu (predor Markovec, Koper); določena vrednost RMR: 38-44 (slaba do zadovoljiva hribina), GSI: 37-43 (IV).	35
Slika 3.7: Izračun modula merila fotografije (prirejeno po Luhmann et al., 2014, str. 8).	37
Slika 3.8: Skica centralne projekcije s predstavitvijo zunanje orientacije in projekcije slike: O' - projekcijski center (X_o, Y_o, Z_o), c – goriščna razdalja oziroma konstanta kamere, H' – glavna točka posnetka (x_o, y_o), P – točka objekta v naravi (X, Y, Z), P' – točka objekta na sliki (x', y'), R – rotacijska matrika (ω, φ, κ); (prirejeno po Luhmann et al., 2014, str. 258).	38
Slika 3.9: Metode za izračun parametrov zunanje orientacije (po Luhmann et al., 2014, str. 293). Krajši opis metod je predstavljen v besedilu.	40
Slika 3.10: Zajem dveh fotografij izkopnega čela predora za izdelavo stereopara.	42

Slika 3.11: Zajem podatkov s ShapeMetriX 3D, v sklopu katerega postavimo tri tarče, iz razdalje do izkopnega čela pa izračunamo snemalno bazo.....	48
Slika 3.12: Digitalni geološki popis izdanka v ShapeMetriX 3D: a. Rezultat geološke analize na rekonstruiranem 3D modelu izkopnega čela s ShapeMetriX 3D. Določene so bile ploskve in linije diskontinuitet, na podlagi katerih smo določili glavne sisteme diskontinuitet, njihovo orientacijo, gostoto in dolžino; b. Primer stereografske analize v ShapeMetriX 3D z določenimi sistemi diskontinuitet.....	49
Slika 3.13: Večslikovna fotogrametrična triangulacija bloka (prirejeno po Luhmann et al., 2014, str. 323).....	50
Slika 3.14: Priporočljiv postopek fotografiranja izdanka s SfM fotogrametrijo, ki združuje čelno fotografiranje in konvergenčno fotografiranje na robovih.....	52
Slika 3.15: Primera kodiranih tarč (a in b) iz programa Agisoft Metashape z enako velikostjo polmera središčnega kroga ter obročem, ki je razdeljen na bele in črne segmente.	52
Slika 3.16: Terestrično lasersko skeniranje: a. Sestavni deli TLS Riegl VZ-400 in potovanje laserskega žarka (prirejeno po Riegl LMS GmbH, 2011); b. Potovanje in odboj signala od površinskega izdanka ter značilnosti skeniranja.....	66
Slika 3.17: Problem okluzije: a. Skica okluzije in potencialne napake orientacije (prirejeno po Sturzenegger in Stead, 2009, str. 170); b. Primer razlike v gostoti oblaka točk, ki je posledica prestrmega kota skeniranja. Ploskve, ki so v vidnem polju snopa laserskega žarka, imajo večjo gostoto kot ploskve, ki jih laserski žarek ne doseže.	71
Slika 3.18: Primera odsevnih merskih tarč za potrebe terestričnega laserskega skeniranja: a. Odsevna merska tarča, ki se uporablja predvsem v rudarstvu in predorogradnji; b. Primer registrirane odsevne merske tarče v oblaku točk TLS; c. Odsevni valj, ki se uporablja pri terestričnem laserskem skeniranju; d. Primer registriranega odsevnega valja.....	73
Slika 3.19: Ponazoritev metod za segmentacijo oblaka točk: a. Osmiško drevo; b. Kd drevo. Kd drevo se bolje prilagaja podatkom kot osmiško drevo (po Vosselman in Maas, 2010, str. 62).....	75
Slika 3.20: Vrste odboja signala: a. Zrcalni odboj; b. Razpršeni odboj; c. Kombinirani odboj (po Heritage in Large, 2009).....	76
Slika 3.21: Prikaz jakosti odbite svetlobe v odvisnosti od vpadnega kota po Lambertovem kosinusnem zakonu. Večji kot je vpadni kot, manjša je jakost odbite svetlobe. Posledično je površina manj svetla.	77
Slika 4.1: Detajlno terestrično lasersko skeniranje vzorcev kamnin fliša: a. Pogled na izbrane vzorce peščenjaka (PE-01 do PE-04) in laporovca (LE-01 in LE-02), odvzetih v	

kamnolomu Elerji; b. Posnetek laserskega skeniranja vzorcev. Vzorci so bili skenirani na razdaljah 5 m, 10 m, 20 m in 25 m, v suhem, vlažnem in mokrem stanju. Skeniranje se je izvedlo s skenerjem Riegl VZ-400.....85

Slika 4.2: Izbrani vzorec peščenjaka PE-02 iz kamnoloma Elerji. Vzorce smo skenirali v suhem (a), vlažnem in mokrem (b) stanju, pri analizi oblaka točk pa smo nadalje ločeno izbrali odseke sveže in preperela kamnine (c). Tako analizo oblaka točk smo izvedli za vsako izbrano razdaljo: 5 m, 10 m, 20 m in 25 m.....87

Slika 4.3: Histogram (a) in škatlasti diagram (b) porazdelitve vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW v odvisnosti od litologije (peščenjaka in laporovca) in razdalje skeniranja; c. Škatlasti diagram (angl. *box plot*) na izbranih razdaljah TLS: 5 m, 10 m, 20 m in 25 m. Okvir škatlastega diagrama predstavlja 1. in 3. kvartil, z vmesno vrednostjo mediane. Izven okvirja ležijo vrednosti nad tretjim kvartilom in pod prvim kvartilom.88

Slika 4.4: Primerjava vrednosti mediane intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka v odvisnosti od razdalje za izbrane vzorce laporovca in peščenjaka.90

Slika 4.5: Histogram (a) in škatlasti diagram (b) porazdelitve vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW v odvisnosti od litologije (peščenjaka in laporovca), stopnje vlažnosti (I – suh, II – vlažen, III – moker) ter izbranih razdalj TLS; c. Škatlasti diagram na izbranih razdaljah TLS: 5 m in 20 m. Okvir škatle predstavlja 1. in 3. kvartil, z vmesno vrednostjo mediane. Izven okvirja ležijo vrednosti nad tretjim kvartilom in pod prvim kvartilom.91

Slika 4.6: Histogram (a) in škatlasti diagram (b) porazdelitve vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW v odvisnosti od litologije (peščenjak in laporovec), stopnje preperevanja (W1 – sveža, W2 – preperela, W3 – močno preperela kamnina do preperina) ter izbrane razdalje TLS; c. Škatlasti diagram na izbranih razdaljah TLS: 5 m, 10 m, 20 m in 25 m. Okvir škatle predstavlja 1. in 3. kvartil, z vmesno vrednostjo mediane. Izven okvirja ležijo vrednosti nad tretjim kvartilom in pod prvim kvartilom.95

Slika 4.7: Pogled na detajl testnega čela v kamnolomu Elerji s postavljenimi kodiranimi tarčami različnih velikosti (a) ter avtomatsko prepoznane kodirane tarče v programu Metashape (b).....99

Slika 4.8: Pogled na obravnavano območje izkopnega čela v kamnolomu Elerji. Območje smo razdelili na 5 profilov (P1 do P5) skupne velikosti ok. 19 m x 8 m (turkizen kvadrat). Znotraj smo določili manjše območje za detajlni zajem podatkov (P1 do P3), velikosti ok. 6 m x 4 m (rdeči kvadrat).102

Slika 4.9: Pregled uporabljenih instrumentov za zajem izkopnega čela v kamnolomu Elerji pri geometrični analizi. Opisi (a–f) so predstavljeni v besedilu.....104

- Slika 4.10: Primerjava fotogrametričnega oblaka točk (fotoaparata) iz SfM fotogrametrije z referenčnim oblakom točk iz tahimetra Leica MS50. Fotografiranje se je izvedlo frontalno v horizontalni smeri in s konvergenčnim fotografiranjem na skrajnih stojiščih. Oddaljenost od izkopnega čela je bila med 4 m in 6 m. Razlike med njima se gibljejo med -4 mm in +2 mm. Večje razlike (do +/-5 mm) so bile zabeležene predvsem na območjih, kjer zaradi morfologije skenirane površine ne prihaja do odboja laserskega žarka ter v levem delu izbranega območja.....107
- Slika 4.11: Primerjava fotogrametričnega oblaka točk (fotoaparata) iz SfM fotogrametrije z referenčnim oblakom točk iz tahimetra Leica MS50. Fotografiranje se je izvedlo iz več stojišč v različni horizontalni in vertikalni smeri. Oddaljenost od izkopnega čela je bila 5 m, 7 m in 10 m. Razlike med njima se gibljejo do +/-2 mm. Podobno so bile izmerjene večje razlike (do +/-4 mm) na območjih okluzije ter na desni strani izbranega območja.....108
- Slika 4.12: Primerjava fotogrametričnega oblaka točk iz pametnega telefona z referenčnim lidarskim oblakom točk iz tahimetra Leica MS50. Fotografije sem zajela frontalno v horizontalni smeri in konvergenčno na skrajnih stojiščih, in sicer na razdaljah 4 m in 6 m. Razlike med oblakoma točk se gibljejo do +/-8 mm, večje razlike (do +/-10 mm) so bile zabeležene predvsem na območjih, kjer zaradi morfologije skenirane površine ne prihaja do odboja laserskega žarka.110
- Slika 4.13: Primerjava lidarskega oblaka točk iz TLS Riegl VZ-400 z referenčnim oblakom točk iz tahimetra Leica MS50, skeniranih iz enakega stojišča. Prevladujejo razlike med oblakoma točk do +/- 4 mm, večje razlike (do +/- 20 mm) so bile zabeležene predvsem na robovih ter na ploskvah, kjer zaradi pogleda in vpadnega kota skeniranja ne prihaja do odboja laserskega žarka.112
- Slika 4.14: Primerjava lidarskega oblaka točk iz Leica BLK360 z referenčnim lidarskim oblakom točk iz tahimetra Leica MS50. Skeniranje se je izvedlo frontalno, na oddaljenosti ok. 5 m od izkopnega čela. Razlike med njima so do +/-15 mm in se povečujejo proti robovom skeniranega območja. Večje razlike (do +/-20 mm) so bile zabeležene predvsem na območjih, kjer zaradi morfologije skenirane površine ne prihaja do odboja laserskega žarka.114
- Slika 4.15: Primerjava fotografij določitev središča tarče z laserskim razdaljmerom Leica DISTO S910: nenatančna določitev središča tarče (levo) in razmeroma natančna določitev središča tarče (desno).116
- Slika 4.16: Primerjava razlik v izmerjenih razdaljah med tarčami: a. pri izmeri s tahimetrom in laserskim razdaljmerom; b. pri dveh izmerah z laserskim razdaljmerom; c. pri izmeri s tahimetrom in TLS; e. pri izmeri s tahimetrom in na fotogrametričnem

modelu; f. pri izmeri s tahimetrom in georeferenciranim fotogrametričnim modelom.	117
Slika 4.17: Prikaz lokacije kamnoloma Elerji pri Škofijah.	118
Slika 4.18: Pogled na fliš v kamnolomu Elerji pri Škofijah.	120
Slika 4.19: Posnetek obravnavanega izkopnega čela v kamnolomu Elerji s poudarjenim detajlnim profilom. Višina profila je bila 930 cm. Zaradi nedostopnosti in možnosti krušenja materiala iz zgornjih delov kamnoloma, smo zgornji del profila popisali na desni strani izkopnega čela kamnoloma (Živec et al., 2019, str. 1633).	122
Slika 4.20: Skeniranje izkopnega čela kamnoloma s terestričnim laserskim skenerjem Riegl VZ400 z nameščenim DSLR (zrcalno refleksnim) fotoaparatom Nikon D700 (Živec et al., 2019, str. 1634).	123
Slika 4.21: Postopek ročnega izbora analiziranih odsekov (npr. litologija, stopnja vlažnosti, stopnja preperelosti). Pri analizi smo uporabili samo izbrane segmente notranjega dela posameznih plasti oblaka točk. Na fotografiji sta prikazana segmenta laporovca (vijolične barve) ter peščenjaka (turkizne barve). Podobno smo izbrali segmente glede na stopnjo vlažnosti in preperevanja (Živec et al., 2019, str. 1635).	123
Slika 4.22: a Histogram porazdelitve TLS-RAW vrednosti intenzitete odboja za laporovce z mediano 0,047 (rdeča črtkana črta) in peščenjake z mediano 0,050 (modra črtkana črta), izločenih iz opazovanega profila. b Porazdelitev TLS-RAW vrednosti intenzitete odboja za laporovce (levo) in peščenjake (desno) s škatlastim (angl. box plot) diagramom. Pravokotna škatla predstavlja razpon med spodnjim in zgornjim kvartilom skupaj z mediano (Živec et al., 2019, str. 1636).	126
Slika 4.23: a Histogram porazdelitve TLS-RAW vrednosti intenzitete odboja za laporovce in peščenjake glede na stopnjo vlažnosti, izločene iz opazovanega litološkega profila, s poudarjeno mediano za: suhe (I) laporovce (rdeča črta), vlažne (II) laporovce (modra črta) ter suhe (I) peščenjake (zelena črta) in vlažne (II) peščenjake (rumena črta). b Porazdelitev vrednosti intenzitete odboja s škatlastim (box plot) diagramom. Pravokotna škatla predstavlja razpon med spodnjim in zgornjim kvartilom skupaj z mediano (Živec et al., 2019, str. 1637).	127
Slika 4.24: Mineralna sestava vzorcev peščenjakov (P1 do P5) in laporovcev (L1 do L5) (Živec et al., 2019, str. 1638).	128
Slika 4.25: Korelacija vrednosti intenzitete odboja (I) ter rdečega (R), zelenega (G) in modrega (B) kanala z vsebnostjo kalcita in kremenca. Zaradi majhnega števila podatkov ter dejstva, da plasti nimajo enake sestave, so podatki razpršeni. Dodatno smo na podlagi mineraloške analize združili vzorce v isti litološki razred. Prileganje krivulje zato ni dobro. a. Korelacija I, R, G in B s kalcitom in kremenom tako v vzorcih	

- peščenjaka kot laporovca. b. Korelacija v peščenjakih za vsebnost kalcita. c. Korelacija v peščenjakih za vsebnost kremena. d. Korelacija v peščenjakih za vsebnost kalcita in kremena (Živec et al., 2019, str. 1639). 131
- Slika 4.26: Detajlna analiza izbranega litološkega profila: a Fotografija skeniranega odseka. b Litološki profil. c Porazdelitev vrednosti intenzitete odboja vzdolž profila (Živec et al., 2019, str. 1640). 133
- Slika 4.27: Izbrano izkopno čelo kamnoloma za preverbo intervalov posameznih litoloških enot. a Obarvan lidarski oblak točk (Riegl) izkopnega čela kamnoloma, s tanko plastnatim flišem; b Vrednosti Intenzitete odboja TLS-RAW izbranega izkopnega čela. c Izločene plasti peščenjaka v svetlo modri-rumeni-rdeči barvi (razpon vrednosti intenzitete odboja med 0,048 in 0,051) ter plasti laporovca v temno modri barvi. Vzdolž plasti peščenjaka so opazni segmenti z nizkimi vrednostmi intenzitete odboja, kar se lahko navezuje na sveže (nepreperene) dele peščenjaka (okno 1) ali akumulacijo preperine (okno 2), (Živec et al., 2019, str. 1640). 134
- Slika 4.28: Analiza vpadov diskontinuitet v kamnolomu Elerji, s predstavljenimi poli diskontinuitet: a. Na podlagi geološkega popisa izkopnega čela v programu Dips. Določen je bil vpad plasti SS (295/04) in dva sistema razpok: J1 (223/89 oz. 043/89) in J2 (150/89 oz. 330/89); b. Na podlagi analize fotogrametričnega oblaka točk iz SfM fotogrametrije v programu DES. Določena sta bila dva sistema razpok: J1 (237/89) in J4 (164/88). Diskontinuiteta J2 je najverjetneje vezana na preperino, ki se kopiči na zgornjem delu plasti..... 136
- Slika 4.29: Analiza fotogrametričnega oblaka točk (fotoaparata) izkopnega čela kamnoloma Elerji v programu DSE (Riquelme et al., 2014), ki klasificira oblak točk v glavne sisteme diskontinuitet. Iz klasificiranega oblaka točk sta razvidna predvsem dva glavna sistema diskontinuitet, obarvana s temno modro in rumeno barvo..... 137
- Slika 4.30: Analiza fotogrametričnega oblaka točk (fotoaparata) v vtičniku Facets programa CloudCompare: a. Ravni poligoni, združeni v skupino s podobnim vpadom (barva poligonov se navezuje na orientacijo); b. Stereografska analiza vpadov ravnih poligonov iz vtičnika Facets, izvedena v programu Dips..... 138
- Slika 4.31: Analiza detajla lidarskega oblaka točk (Riegl) v vtičniku Facets programa CloudCompare izkopnega čela v kamnolomu Elerji: a. Obarvan lidarski oblak točk z RGB; b. Rezultat analize z majhnimi ravnimi poligoni, ki so združeni v ravnine s podobnim vpadom, na podlagi katerega so obarvani. Vidne so jasno definirane diskontinuitete na plasteh debeline okoli 6 cm; c. Stereografska analiza izločenih poligonov: plastnatost SS (330/02), prvi sistem razpok J1 (060/84) in drugi sistem razpok J2 (165/86). 139

- Slika 4.32: Določitev geometrije diskontinuitet iz lidarskega oblaka točk (BLK): a. Analiza v programu DES, z izločenimi tremi sistemi diskontinuitet: J1 (055/87,5), J2 (164/88) ter J3 (315/04). Slednji se navezuje na sistem plastnatosti. b. Analiza v vtičniku Facets programa CloudCompare, z izločenimi poligoni, ki se navezujejo na dva glavna sistema zelo strmih diskontinuitet: J1 (055/81) označene z rumeno barvo oz. J1 (235/83) označene z modro barvo ter J2 (354/75) označene z rdečo barvo oz. J2 (175/79) označene s turkizno barvo. c. Stereografska analiza izločenih poligonov. 140
- Slika 4.33: Analiza fotogrametričnega oblaka točk (pametni telefon) v programu DSE (Riquelme et al., 2014): a. Stereografska analiza z izločenimi tremi glavnimi sistemi diskontinuitet: J1 (059/88) oz. J2 (214/83), J3 (314/03) ter J4 (170/89) oz. J5 (016/88). b. Klasificiran oblak točk v glavne sisteme diskontinuitet, iz katerega sta razvidna predvsem dva, ki sta obarvana s temno in svetlo modro. 141
- Slika 4.34: Analiza fotogrametričnega oblaka točk (a) in fotogrametričnega 3D modela (b) (pametni telefon) izvedena v vtičniku Facets programa CloudCompare. Izločeni so bili trije glavni sistemi diskontinuitet: J1 (060/85 oz. 240/85) predstavljeni z rumeno oz. modro barvo, J2 (340/75) predstavljeni z rdečo barvo ter sistem subhorizontalnih diskontinuitet, predstavljeni s temno rumeno barvo. 142
- Slika 4.35: Analizirani 3D model izbranega izkopnega čela kamnoloma Elerji v programu ShapeMetriX 3D: a. Digitalni vektorski geološki popis izkopnega čela s popisanimi diskontinuitetami, ki predstavljajo plastnatost in dva sistema razpok; b. Stereografska analiza s predstavljenimi poli diskontinuitet, na podlagi katere določimo glavne sisteme diskontinuitet in njihove orientacije. Z zeleno barvo so predstavljeni poli plastnatosti, z rdečo in modro pa poli dveh sistemov razpok. Program omogoča tudi statistično analizo diskontinuitet, na podlagi katere ocenimo njihove razmike in dolžine. 143
- Slika 4.36: Primerjava stereografske analize izločenih glavnih sistemov diskontinuitet z uporabo različnih metod (Preglednica 4.9) in ročnih meritev: a. Skupne meritve; b. Ločitev po načinu snemanja (lidarski in fotogrametrični zajem podatkov); c. Ločitev po uporabljenem instrumentu (fotoaparati, pametni telefon, TLS Riegl VZ-400, Leica BLK360); c. Ločitev po uporabljenem programu (program DSE, vtičnik Facets, ShapeMetriX 3D). 147
- Slika 4.37: Prikaz lokacije podzemne garaže Park San Giusto v Trstu (Italiji). 152
- Slika 4.38: Pogled na izkopno čelo v flišu desne kaverne podzemne garaže Park San Giusto na stacionaži m 111,36. 154
- Slika 4.39: Primer analize vpadov plastnatosti v desni kaverni podzemne garaže Park San Giusto (stacionaža 111,36 m): a. Na podlagi geološkega popisa izkopnega čela v

programu Dips; b. Na podlagi analize stereo fotogrametrije v programu ShapeMetriX 3D. V obeh primerih prevladuje položna plastnatost proti SV (030-050/05-30), določena sta bila tudi enaka sistema razpok z vpadom proti JZ (200-220/50-60), pri preostalih diskontinuitetah pa so opazne določene razlike, predvsem zaradi večjega števila meritev.....157

Slika 4.40: Fotografija primera jedra vrtine v tankoplastnatem flišu, z nejasno izraženimi plastmi, znotraj katerih peščenjak postopno prehaja v laporovec (fotografija iz arhiva avtorice). 159

Slika 4.41: a Histogram porazdelitve TLS-RAW vrednosti intenzitete odboja za izbrano izkopno čelo Park San Giusto za laporovce z mediano 0,039 (rdeča črtna črta), peščene laporovce z mediano 0,040 (zelena črtna črta) in peščenjake z mediano 0,040 (modra črtna črta). b. Porazdelitev vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW za laporovce (levo), peščene laporovce (sredina) in peščenjake (desno) s škatlastim diagramom. Pravokotna škatla predstavlja razpon med spodnjim in zgornjim kvartilom skupaj z mediano, osamelci (najmanjša in največja vrednost) pa razpon celotne množice podatkov..... 161

Slika 4.42: a. Histogram porazdelitve TLS-RAW vrednosti intenzitete odboja za izbrano izkopno čelo Park San Giusto, v odvisnosti od litologije in stopnje vlažnosti (I - suh, II – vlažen) in poudarjeno mediano: suhi laporovci (rdeča črta), peščeni laporovci (vijolična črta), peščenjaki (rumena črta) ter vlažni laporovci (zelena črta), peščeni laporovci (turkizna črta) in peščenjaki (modra črta). b Porazdelitev analiziranih vrednosti intenzitete odboja s škatlastim diagramom. Pravokotna škatla predstavlja razpon med spodnjim in zgornjim kvartilom skupaj z mediano, osamelci (najmanjša in največja vrednost) pa razpon celotne množice podatkov..... 163

Slika 4.43: Primer analize oblaka točk izkopnega čela desne kaverne podzemne garaže Park San Giusto (stacionaža 111,36 m): a. Pogled na izkopno čelo; b. Lidarski oblak točk z določenimi vrednostmi Intenzitete odboja TLS-RAW za suhi peščenjak (0,042 do 0,045), pri čemer so plasti peščenjaka slabo vidne, opazne pa so sledi izkopa s predorskim bagrom, ki so svetle in imajo zato visoke vrednosti intenzitete odboja; c. Fotografija izbranega detajla, koder je razvidna debelejša plast peščenjaka ter tanjše plasti peščenega laporovca. Osrednji del detajla seka prelom, vzdolž katerega je hribina pretrta, opazno je tudi izcejanje vode; d. Oblak točk detajla z vrednostmi Intenzitete odboja TLS-RAW za suhi peščenjak (0,042 do 0,045)... 165

Slika 4.44: Primer analize oblaka točk izkopnega čela desne kaverne podzemne garaže Park San Giusto (stacionaža 111,36 m): a. Pogled na izkopno čelo; b. Lidarski oblak točk z določenimi vrednostmi intenzitete odboja TLS-RAW za vlažen peščenjak (0,035 do 0,038); c. Fotografija izbranega detajla heterogene hribine z debelejšo plastjo

- peščenjaka in tanjšimi plastmi peščenega laporovca. Osrednji del detajla seka prelom, vzdolž katerega je hribina pretrta, opazno je tudi izcejanje vode; d. Oblak točk detajla z vrednostmi intenzitete odboja TLS-RAW za vlažen peščenjak (0,035 do 0,038)..... 166
- Slika 4.45: Analiza oblaka točk izkopnega čela desne kaverne v vtičniku Facets programa CloudCompare: a. Izločene fasete (ravnih ploskve), ki so bile omejene z največjim kotom 20° ter največjo relativno dolžino stranice 20 cm; b. Stereografska analiza primera (a) s predstavljenimi poli diskontinuitet, na podlagi katerih določimo glavne sisteme diskontinuitet in njihove orientacije; c. Izločene fasete (ravne ploskve), ki so bile omejene z največjim kotom 20° ter največjo dolžino stranice 60 cm; d. Stereografska analiza primera (b) s predstavljenimi poli diskontinuitet, na podlagi katerih določimo glavne sisteme diskontinuitet in njihove orientacije. 168
- Slika 4.46: Analiziran 3D model izkopnega čela desne kaverne podzemne garaže Park San Giusto (stacionaža 111,36 m) v programu ShapeMetriX 3D: a. Digitalni popis izkopnega čela z označenimi diskontinuitetami, ki predstavljajo plastnatost (odtenki zelene), prelomne ploskve (odtenki rdeče, oranžne in vijolične) ter razpoke (odtenki rožnate); b. Statistična analiza diskontinuitet, na podlagi katerih ocenimo značilni razmik med diskontinuitetami in njihovo dolžino za določitev parametrov RMR. 170
- Slika 4.47: Prikaz poteka trase predora Markovec med Kopro in Izolo. 176
- Slika 4.48: Pogled na skeniranje izkopnega čela v predoru Markovec s TLS Riegl VZ-400. Na izkopnem čelu so vidne temno sive plasti laporovca in svetlo sive plasti peščenjaka. V zgornjem delu poteka izrazita plast peščenjaka, ki je močno preperela in oksidirana (oranžne barve)..... 178
- Slika 4.49: Pogled na izkopno čelo v flišu leve predorske cevi predora Markovec na stacionaži km 0+252,4. Na izkopnem čelu so vidne plasti temno sivega laporovca in svetlo sivega peščenjaka. Nekatere debelejšje plasti peščenjaka so zmerno močno preperele in oksidirane..... 179
- Slika 4.50: Izbrana primera analize vpadov plastnatosti v levi cevi vzhodnega portala predora Markovec (stacionaža km 0+843,7): a. Na podlagi geološkega popisa izkopnega čela v programu Dips je bil izračunan povprečni vpad 034/05; b. Na podlagi analize stereo fotogrametrije v programu ShapeMetriX 3D je bil izračunan povprečni vpad 040/07. Rezultata obeh meritev sta primerljiva. 182
- Slika 4.51: Primer analize oblaka točk izkopnega čela iz leve cevi vzhodnega portala predora Markovec (stacionaža km 0+746,2): a. Obarvan lidarski oblak točk z RGB vrednostmi izkopnega čela; b. Oblak točk izkopnega čela, predstavljen z vrednostmi intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka in izbranim območjem za analizo; c. Obarvan oblak detajla; d. Oblak točk detajla z vrednostmi Intenzitete

odboja TLS-RAW; e. Izločene plasti peščenjaka v rdeči barvi (razpon vrednosti intenzitete odboja med 0,038 in 0,040) ter plasti laporovca v modri barvi. V spodnjem delu detajla so vidne napake pri izločitvi plasti peščenjaka, ki je posledica načina izkopa. Zaradi rezkanja je hribina spraskana in prava površina litologije ni vidna. Predel ni bil omočen, zato so višje vrednosti intenzitete vezane na sledi rezkanja (navpične sledi).....184

Slika 4.52: Predstavitev porazdelitve vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka: a Histogram porazdelitve na izbranem izkopnem čelu v predoru Markovec za laporovce z mediano 0,036 (rdeča črtkana črta) in peščenjake z mediano 0,038 (modra črtkana črta), ovrednotenih iz opazovanega profila; b Porazdelitev vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW za laporovce (levo) in peščenjake (desno) s škatlastim diagramom. Pravokotna škatla predstavlja razpon med spodnjim in zgornjim kvartilom skupaj z mediano, osamelci (najmanjša in največja vrednost) pa razpon celotne množice podatkov.....186

Slika 4.53: Analiziran 3D model izkopnega čela leve cevi vzhodnega portala predora Markovec (stacionaža km 0+843,7) v programu ShapeMetriX 3D: a. Digitalni popis izkopnega čela z označenimi diskontinuitetami, ki predstavljajo plastnatost; b. Geometrijska analiza diskontinuitet, na podlagi katerih se oceni značilni razmik med diskontinuitetami in njihovo dolžino. Dobljene podatke lahko uporabimo pri oceni parametrov za sistem klasifikacije RMR.188

Slika 4.54: Razlike med ročnim in digitalnim zajemom geoloških podatkov glede na zmožnost nadzora in vplivanja nanje v sklopu inženirsko-geološkega dela. Iz krivulje je razvidna pomembnost dela na podatkih v zgodnjih fazah načrtovanja, ko so še možne spremembe.195

SEZNAM PREGLEDNIC

Preglednica 3.1: Razmiki med diskontinuitetami po standardu SIST EN ISO 14689-1:2004.	19
Preglednica 3.2: Opis odprtosti diskontinuitet po standardu SIST EN ISO 14689-1:2004.	21
Preglednica 3.3: Pregled sistemov klasifikacije hribin v splošni uporabi (prirejeno po Palmstrøm, 1995).	26
Preglednica 3.4: Splošna GSI klasifikacija (prirejeno po Marinos in Hoek, 2000, str. 4).	29
Preglednica 3.5: Nova GSI klasifikacija za heterogene hribine, podobne flišu (prirejeno po Marinos et al., 2007, str.91).	30
Preglednica 3.6: Pregledna geomehanska klasifikacija RMR (Bieniawski, 1989, 54-55).	32
Preglednica 3.7: Tehnične specifikacije terestričnega laserskega skenerja Riegl VZ-400.	69
Preglednica 3.8: Priporočljive oddaljenosti TLS od objekta za doseganje želene natančnosti in ločljivosti (prirejeno po Setnikarju, 2007, str. 148).	70
Preglednica 4.1: Pregled atmosferskih pogojev ter ločljivosti skeniranja pri različnih sklopih detajlnega skeniranja izbranih vzorcev peščenjaka in laporovca iz kamnoloma Elerji. Detajlno skeniranje se je izvajalo pri treh različnih stopnjah vlažnosti: suho, vlažno in mokro stanje, na razdaljah 5 m, 10 m, 20 m in 25 m.	86
Preglednica 4.2: Tehnične specifikacije fotoaparata Olympus OM-D E-M1 Mark II.	97
Preglednica 4.3: Tehnične specifikacije objektivov	97
Preglednica 4.4: Rezultati testa prepoznavanja velikosti kodiranih tarč za objektiv 15 mm (a) in 12-100 mm (b) v odvisnosti od oddaljenosti od izkopnega čela, izvedenega v programu Agisoft Metashape. Tarče, ki jih je program samodejno prepoznal, so označena s krogom v zelenem polju, tarče, ki jih program ni prepoznal, pa so označene z x v rdečem polju. V prvih dveh primerih (a) so bile fotografije presvetle zaradi neustrezne nastavitve zaslonke, kar bi lahko vplivalo na avtomatsko prepoznavanje tarč.	100
Preglednica 4.5: Rezultati testa prepoznavanja velikosti kodiranih tarč za objektiv 25 mm (a) in 45 mm (b) v odvisnosti od oddaljenosti od izkopnega čela, izvedenega v programu Agisoft Metashape. Zelena polja s krogom prikazujejo tarče, ki jih je program samodejno prepoznal, rdeča polja z x pa tarče, katerih program ni samodejno prepoznal.	101
Preglednica 4.6: Tehnične specifikacije pametnega telefona Huawei P20 Pro.	109
Preglednica 4.7: Tehnične specifikacije prenosnega skenerja Leica BLK360.	113

- Preglednica 4.8: Pregled izvedenih meritev v kamnolomu Elerji: ročni zajem, terestrično lasersko skeniranje (TLS) ter stereo fotogrametrija in fotogrametrija SfM (PG). 119
- Preglednica 4.9: Koeficienti korelacije za intenziteto odboja ter tri barvne kanale (rdeča, zelena, modra) z mineralno sestavo (kalcit, kremen, njuna vsota). Številke v **krepkem** tisku nakazujejo statistično pomembne korelacije, število zvezdic pa statistično raven (*95 %, **99 %, ***99,9 %). Število zvezdic se navadno uporablja za raven statistične pomembnosti. V okviru rezultatov, sta v preglednici prikazani samo ravni 95 % in 99,9 %, medtem ko raven 99 % ni prikazana (Živec et al., 2019, str. 1638)..... 129
- Preglednica 4.10: Pregled izločenih glavnih sistemov diskontinuitet glede na uporabljene metode ter razlika glede na referenčni vpod ročne izmere. 146
- Preglednica 4.11: Primerjava karakterizacije hribine na izkopnem čelu kamnoloma Elerji na podlagi sistema klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989) iz ročnega popisa ter digitalnega popisa s pomočjo programa ShapeMetriX 3D. 148
- Preglednica 4.12: Pregled izvedenih meritev v podzemni garaži Park San Giusto (Trst, Italija) s predstavljenimi lokacijami meritev v južni kaverni (Cav_S). Izkopno čelo smo ročno in digitalno inženirsko-geološko popisali, skenirali s terestričnim laserskim skenerjem (TLS) ter stereo fotogrametrično fotografirali (PG) z opremo ShapeMetriX 3D. Enega skeniranja zaradi tehničnih težav s skenerjem nismo mogli izvesti..... 153
- Preglednica 4.13: Pregled inženirsko geoloških lastnosti fliša, določenih v podzemni garaži Park San Giusto (Mecasol, iC GmbH, 2006). Inženirsko-geološke enote (GT) so določene na podlagi značilnega razmerja med peščenjakom in laporovcem na območju vzpetine San Giusto, ki vpliva na vrednosti geomehanskih parametrov. 156
- Preglednica 4.14: Primerjava karakterizacije hribine na izkopnem čelu desne kaverne Park San Giusto (stacionaža 111,36 m) na podlagi sistema klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989) iz ročnega popisa ter digitalnega popisa s pomočjo programa ShapeMetriX 3D..... 171
- Preglednica 4.15: Pregled izvedenih meritev v predoru Markovec s predstavljenimi lokacijami meritev: desna predorska cev na vzhodnem portalu (DCE); desna predorska cev na zahodnem portalu (DCW); leva predorska cev na vzhodnem portalu (LCE); leva predorska cev na zahodnem portalu (LCW). Izkopno čelo smo ročno inženirsko-geološko popisali, skenirali s terestričnim laserskim skenerjem (TLS) ter stereo fotogrametrično fotografirali (PG) z opremo ShapeMetriX 3D. Zelena polja s krogom prikazujejo izvedene meritve, rdeča polja z x pa neizvedene meritve. 177

Preglednica 4.16: Pregled inženirsko geoloških lastnosti fliša, določenih na predoru Markovec (Beguš et al., 2013). Inženirsko-geološke enote (GT) so določene na podlagi značilnega razmerja med peščenjakom in laporovcem na območju Markovca, ki vpliva na vrednosti geomehanskih parametrov.....	181
Preglednica 4.17: Primerjava karakterizacije hribine na izkopnem leve cevi vzhodnega portala predora Markovec (stacionaža km 0+843,7) na podlagi sistema klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989) iz ročnega popisa ter digitalnega popisa s pomočjo programa ShapeMetriX 3D.....	189

SEZNAM OKRAJŠAV IN POSEBNIH SIMBOLOV

Kratica	Slovenski izraz	Angleški izraz
DMR	Digitalni Model Reliefa	Digital Terrain Model
DSE	Program za iz vrednotenje sistemov diskontinuitet	Discontinuity Set Extractor
F	Prelom	Fault
GNSS	Globalni navigacijski satelitski sistem	Global Navigation Satellite System
GSI	Geološki indeks trdnosti	Geological Strength Index
ISRM	Mednarodni institut za mehaniko kamnin	International Society for Rock Mechanics
J	Razpoka	Joint
M-RMR	Modificirana ocena hribine	Modified Rock Mass Rating
NATM	Nova avstrijska metoda predorogradnje	New Austrian Tunnelling Method
RGB	Rdeča-Zelena-Modra	Red-Green-Blue
RMi	Indeks hribine	Rock Mass index
RMR	RMR faktor (ocena hribine)	Rock Mass Rating
RMQR	Ocena kvalitete hribine	Rock Mass Quality Rating System
RQD	RQD indeks (določitev kvalitete kamnine)	Rock Quality Designation
RSR	RSR faktor (ocena strukture kamnine)	Rock Structure Rating
SfM	Struktura iz gibanja kamere	Structure from Motion
SMR	Klasifikacija hribin za brežine	Slope Mass Rating
SS	Ploskev plastnatosti	Bedding plane
TLS	Terestrični laserski skener	Terrestrial Laser Scanner

1 UVOD

Pri geotehničnem projektiranju objektov v hribinah (predori, podporne konstrukcije, zelo velike in nenavadne konstrukcije) ima pomembno vlogo karakterizacija hribine, s katero predstavimo inženirsko-geološke razmere obravnavanega območja. Za karakterizacijo hribine je pomembno poznavanje geomehanskih lastnosti tako intaktne kamnine kot tudi diskontinuitet, ki so odločilne za obravnavani objekt. Iz umestitve objekta v obravnavano območje je odvisno geotehnično obnašanje hribine v času izkopa in obratovanja, pri čemer imajo različni geomehanski parametri različen vpliv. S pomočjo klasifikacije hribin podajamo v inženirski geologiji razmere hribin, predvidimo njihovo geotehnično obnašanje in predlagamo potrebne podporne ukrepe, pri vrednotenju geomehanskih lastnosti pa so jim raziskovalci dajali različno pomembnost. V Sloveniji so se za njihovo karakterizacijo uveljavili sistemi klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989) in Q (Barton et al., 1974) ter orodje GSI (Marinos & Hoek, 2000).

Litološke in strukturne značilnosti (plastnatost, prelome, razpoke, idr.) hribine določamo z geološkim popisom izdanka ali izkopnega čela. Litološki opis kamnine izvajamo na podlagi standarda SIST EN ISO 14689-1:2004, opis diskontinuitet (tip, orientacija, hrapavost, gostota, ipd.) pa po priporočilih ISRM (Barton, 1978) in standarda SIST EN ISO 14689-1:2004. Postopek zajemanja podatkov je uveljavljen in se na terenu izvaja predvsem ročno, kar pa vpliva na količino zajetih podatkov in njihovo kakovost. Pri geološkem popisu mora biti inženirski geolog hiter in natančen, dostop do izdanka ali izkopnega čela pa je velikokrat omejen zaradi nedostopnosti in vprašljive stabilnosti, kar privede do subjektivnih geoloških popisov. Na področju inženirske geologije je iz naštetih razlogov težnja po hitrem in natančnem zajemu in obdelavi pridobljenih podatkov velika, zato so se raziskave usmerile tudi v vključevanje bližnjelikovne fotogrametrije (Kemeny & Post, 2003; Gaich et al., 2006; Sturzenegger, 2010; Umili et al., 2013; Verma in Bourke, 2019) in terestričnega laserskega skeniranja (Sturzenegger et al., 2007; Lato et al., 2009; Telling et al., 2017). Raziskave o uporabi terestričnega laserskega skeniranja v inženirski geologiji so se delile na dve področji: na določanje geometrijskih lastnosti diskontinuitet v hribinah (Slob et al., 2002; Sturzenegger in Stead, 2009; Riquelme et al., 2014; Wang et al., 2017; Drews et al., 2018) in na analizo intenzitete odboja laserskega žarka z namenom določanja litološke sestave hribine (Pesci et al., 2008; Pfeifer et al., 2007; Franceschi et al., 2009; Burton et al., 2011).

Razumevanje obnašanja hribine je pri geotehničnem projektiranju ključno v heterogenih hribinah, kot je fliš, ki se nahaja v jugozahodni Sloveniji. Opišemo ga kot ciklično menjavanje laporovca in peščenjaka v različnih razmerjih, ki imajo različne geomehanske lastnosti. Za fliš je značilno, da je tankoplastnat, s prevladujočimi plastmi debeline od 2 cm do 60 cm, kar

dodatno vpliva na omejeno celovito količino in kakovost zajetih podatkov pri ročnem geološkem popisu. Zaradi pojavljanja posameznih kamnin v različnih razmerjih pa je nezanesljiva tudi karakterizacija fliša s sistemi klasifikacije RMR in Q, saj nepopolno določata značilnosti plastnatih hribin. Ob pregledu objav uporabe bližnjleslikovne fotogrametrije in terestričnega laserskega skeniranja sem ugotovila, da so se raziskave večinoma izvajale na masivnih in debeloplastnatih kamninah ter diskontinuitetah z jasno izraženimi ploskvami, kar se bistveno razlikuje od lastnosti tankoplastnatega fliša.

V doktorski disertaciji sem se zato usmerila v možnosti uporabe bližnjleslikovne fotogrametrije in terestričnega laserskega skeniranja pri karakterizaciji predvsem tankoplastnatega fliša, s pomočjo katerih bi lahko hitro in natančno določila tako razmerje med posameznimi kamninami kot tudi lastnosti diskontinuitet. Z zajetimi podatki sem želela združiti dognanja predhodnih raziskav, ki so ločeno analizirale geometrijske lastnosti hribine (karakterizacija diskontinuitet) in možnost določanja litološke sestave hribine iz vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka s TLS. S podobnimi analizami so se ukvarjali Humair et al. (2015) in Matasci et al. (2015), vendar na primerih debeloplastnatih in heterogenih kamnin različne litološke sestave. Raziskave so izvajali v okviru regionalne in strukturne geologije, ne na področju inženirske geologije z namenom klasifikacije po sistemu RMR.

V sklopu doktorske disertacije sem izvedla meritve na treh izbranih izkopih, ki so potekali v flišu: v predoru Markovec med Kopro in Izolo, v podzemni garaži Park San Giusto v Trstu in v kamnolomu Elerji pri Škofijah. Na vseh treh izbranih lokacijah sem izvedla ročni zajem podatkov, terestrično lasersko skeniranje, bližnjleslikovno stereofotogrametrijo in bližnjleslikovno SfM fotogrametrijo. Zajete podatke sem obdelala in preverila možnost določanja tako geometrijskih lastnosti diskontinuitet kot tudi litologije. V sklopu analize sem preverila možnost avtomatskega določanja parametrov diskontinuitet, kot so orientacija, gostota in dolžina diskontinuitet in pri tem uporabila tudi v zadnjih letih razvite računalniške programe, ki bi jih lahko uporabili v inženirski geologiji. Pri analizi oblaka točk pa sem preverjala razlike vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka v odvisnosti od litološke sestave, stopnje preperevanja in stopnje vlažnosti, ki vplivajo na geotehnično obnašanje heterogene hribine. Rezultate sem empirično preverila na izkopsnem čelu ter primerjala z ročnim geološkim popisom izkopa.

Rezultate zajetih podatkov sem uporabila pri vrednotenju parametrov za karakterizacijo fliša s sistemom klasifikacije RMR, saj so kategorije vrednotenih parametrov podobne mednarodnim priporočilom ISRM (Barton, 1978) in standardu SIST EN ISO 14689-1:2004. Na podlagi rezultatov sem lahko ovrednotila možnosti vključevanja bližnjleslikovne fotogrametrije in

terestričnega laserskega skeniranja v potek dela inženirskega geologa pri geološkem popisu izdankov in izkopnih čel.

1.1 Namen, raziskovalni cilji in hipoteza disertacije

Namen doktorske disertacije je preverba možnosti vključevanja bližnjleslikovne fotogrametrije in terrestričnega laserskega skeniranja v geološko spremljavo umeščanja objektov v heterogeno hribino, kot je tankoplastnati fliš. Zaradi heterogene sestave in tankih plastnatosti je pomembno poznavanje deleža posamezne kamnine in geometrijskih lastnosti diskontinuitet, ki vplivajo na geotehnično obnašanje fliša. Pri geološkem kartiranju in geološki spremljavi heterogene hribine ima inženirski geolog nemalokrat omejen dostop in čas, kar vpliva na količino in kakovost meritev, posledično pa so tudi zajeti podatki subjektivni in ne izkazujejo realnega stanja hribine.

Hipoteza doktorske disertacije:

Uveljavljeno geološko kartiranje se z uporabo bližnjleslikovne fotogrametrije in terrestričnega laserskega skeniranja lahko kvantitativno nadgradi v smislu delne avtomatizacije in večje objektivnosti postopkov. Iz tako pridobljenih rezultatov kartiranja se lahko določi inženirsko-geološke lastnosti fliša, predvsem parametre diskontinuitet in litološke opredelitve.

Dodatni raziskovalni cilji doktorske disertacije so bili:

- dopolniti sistem klasifikacije hribine po sistemu RMR (Bieniawski, 1989) na podlagi podatkov iz TLS ter bližnjleslikovne fotogrametrije v primeru površinskih izdankov ter podzemnih izkopnih čel v flišu, s poudarkom na predpostavki, da je uporaben kot geotehnično orodje za nadaljnjo analizo in geotehnične izračune,
- optimizirati, nadgraditi, izboljšati natančnost in digitalizirati geološko kartiranje na terenu ter pri izkopih geotehničnih objektov (predori, jaški, gradbene jame, idr.),
- pripraviti 3D podatkovne baze ter foto dokumentacijo izmerjenih diskontinuitet,
- ugotoviti omejitve bližnjleslikovne fotogrametrije in terrestričnega laserskega skeniranja pri geološki spremljavi ter navesti priporočila za hiter, natančen in učinkovit zajem podatkov tako površinskih izdankov kot tudi izkopnih čel, kjer imamo omejen časovni okvir in slabše razmere za delo (večja obremenjenost s trdnimi delci, omejena osvetlitev in dostop),
- preveriti možnosti zajema podatkov in kakovost podatkov, zajetih z nemerskimi fotoaparati, pametnimi telefoni in cenovno ugodnejšimi instrumenti za lasersko skeniranje, ki bi jih lahko vključili v geološko spremljavo izkopa,

- preveriti računalniške programe, ki so bili razviti v zadnjih letih in omogočajo polavtomatsko analizo zajetih podatkov (oblaka točk, 3D modelov), ki bi jih lahko v vključili v geološko kartiranje in geološko spremljavo.

1.2 Struktura doktorske disertacije

Doktorska disertacija ima pet poglavij. V prvem poglavju so predstavljeni uvod, namen disertacije ter hipoteza z dodatnimi raziskovalnimi cilji.

V drugem poglavju so predstavljene teoretične osnove geološke zgradbe jugozahodne Slovenije in vzhodne Italije s poudarkom na litoloških in inženirsko-geoloških značilnosti fliša, ki so pomembne za nadaljnje razumevanje problematike geotehničnega projektiranja v heterogenih hribinah.

V tretjem poglavju o metodah je opisan ročni zajem, ki je uveljavljen pri geološkem popisu ter podane njegove prednosti in pomanjkljivosti. Sledi predstavitev geometrijskih lastnosti diskontinuitet, ki jih navajajo smernice ISRM in standard SIST EN ISO 14689-1:2004 ter so bile uporabljene pri analizah. Pri bližnjeliskovni fotogrametriji sta ločeno opisani stereofotogrametrija in SfM fotogrametrija, njune zahteve za učinkovit zajem podatkov in pregled dosedanjih raziskav na področju inženirske geologije. Poglavje se zaključi s terestričnim laserskim skeniranjem, omejitvam in zahtevam pri načrtovanju zajema podatkov s pregledom dosedanjih raziskav pri vključevanju terestričnega laserskega skeniranja v inženirsko geologijo.

Četrto poglavje vključuje rezultate meritev z razpravo. Najprej so predstavljene preliminarne raziskave, ki so pripomogle k učinkovitejšemu načrtovanju zajema podatkov in nadaljnji analizi. V nadaljevanju so ločeno predstavljene izbrane lokacije meritev v predoru Markovec, podzemni garaži Park San Giusto ter v kamnolomu Elerji.

Zadnje poglavje povzema ugotovitve, ovrednoti predstavljeno hipotezo ter podaja predloge za nadaljnje delo.

2 TEORETIČNI DEL

V inženirski geologiji opišemo fliš kot heterogeno hribino, z značilnim cikličnim menjavanjem drobnozrnatih in debelozrnatih klastičnih kamnin, z vmesnimi možnimi plastmi apnencev. Heterogena zgradba je posledica nastanka pri turbiditni sedimentaciji. Pri umeščanju geotehničnih objektov v heterogeno hribino privede menjavanje trdnih in šibkih kamnin do anizotropnega obnašanja. Pri geotehničnem projektiranju je zato ključno razumevanje geomehanskega obnašanja heterogene hribine, ki je odvisno od deleža posameznih kamnin in strukturnih značilnosti (plastnatost, razpoke, prelomi ter njihovih geometrijskih in geomehanskih lastnosti).

Omenjeno problematiko se izpostavlja pri umeščanju konstrukcij in obravnavi stabilnosti pobočij v flišu jugozahodne Slovenije in zahodne Italije. V naslednjih poglavjih zato najprej predstavljam obravnavano območje jugozahodne Slovenije. Sledi opis nastanka fliša, na podlagi katerega podrobneje opišem sestavo laporovcev in peščenjakov, glavnih gradnikov fliša. Teoretični del zaključim s poglavjem o inženirsko-geoloških lastnosti fliša, ki je pomembno za razumevanje in poznavanje njegovega geotehničnega obnašanja, in tudi predstavlja povod za izbiro teme disertacije.

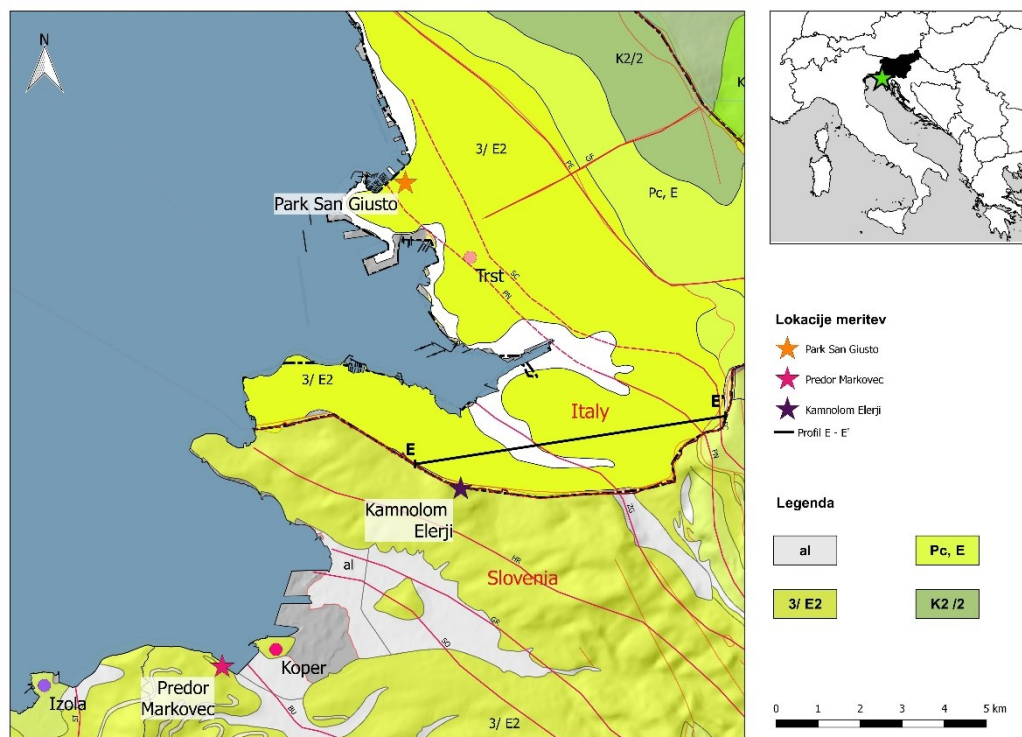
2.1 Geografski pregled območja

Področje jugozahodne Slovenije in zahodne Italije leži ob Tržaškem zalivu (Slika 2.1). Slovensko primorje predstavlja severni del polotoka Istre in meji na severu z Italijo, na jugu pa vzdolž reke Dragonje, s Hrvaško. Na vzhodu poteka območje Slovenskega primorja do Čičarije, od katere jo loči geomorfološka stopnja Kraškega roba (Placer, 2007). Polotok Istra se proti severu razprostira do Osapske doline, višje pa sledimo Krasu, ki poteka na zahodu do tržaške obale, vključno z mestom Trst.

Za območje Slovenskega in Tržaškega primorja je značilno obalno submediteransko podnebje, saj predstavljajo obalni deli Tržaškega zaliva do nadmorske višine 300 m, najtoplejšo pokrajino Slovenije. Posebnost obravnavanega področja je padavinski režim, saj so padavine relativno enakomerno razporejene čez vse leto. Povprečna temperatura najhladnejšega meseca je nad 4°C, najtoplejšega meseca pa nad 22°C, medtem ko je povprečna letna količina padavin med 1000 in 1200 mm (Ogrin, 1996).

2.2 Geološke značilnosti obravnavanega območja

V disertaciji obravnavano območje leži na jugozahodu Slovenije, in sicer na severozahodnem delu polotoka Istre (Slika 2.1).



Slika 2.1: Geološka karta obravnavanega območja z lokacijami izvedenih meritev (predor Markovec, kamnolom Elerji, garaža Park San Giusto) in označenim profilom E-E': al – aluvij kvartarja; 3E_2 – menjavanje peščenjaka in laporovca z vložki apnenega konglomerata in breče - fliš; Pc, E – foraminiferni apnenec: miliolidni, alveolinski in numulitni apnenec; K_2^2 – temno siv apnenec v menjavi z rudistnim apnencem (po OGK, Pleničar, Polšak in Šikić, 1969).

Figure 2.1: Geological setting of the investigated area with locations (Markovec tunnel, Elerji quarry, underground parking garage Park San Giusto) with profile E-E': al – Quaternary alluvium, 3E_2 – Sandstone and marlstone with intercalations of limy conglomerates and breccias – flysch, Pc, E – Foraminifera limestone: Miliolida, Alveolina and Nummulites limestones, K_2^2 – Dark grey limestone in alternation with rudists limestone (after OGK, Pleničar, Polšak and Šikić, 1969).

V strukturnem smislu pripada severni del Istre Istrsko-furlanski podrivni coni, ki je del Zunanjedinarskega naluskanega pasu, nastalega kot posledica nariva Zunanjedinarskega narivnega pasu na jadranski segment mezozojske Jadransko – Dinarske karbonatne platforme (Placer et al., 2010). Na obalni del sta vplivali dve obsežnejši fazi krčenja v tercijarju, in sicer eocensko-oligocensko narivanje Zunanjih Dinaridov v smeri JZ ter podrivanje Jadranske mikroplošče proti SV pod Dinaride in Južne Alpe. Slednje poteka v današnjem času v smeri proti SZ (Vrabec in Jordanova, 2017; Weber et al., 2010). Narivi so na obravnavanem območju usmerjeni proti JZ, sukcesivno nižje narivne ploskve pa so posledično vedno bolj položne. Zaradi mehanizma gubanja ob napredujočih prelomih, premik ob posameznih prelomih bočno

zamira in preide v gubo napredujočega preloma, ki tudi nadalje bočno zamre (Celarc et al., 2012).

Na širšem obravnavanem območju je med juro in eocenom potekala karbonatna sedimentacija na Jadransko-Dinarski karbonatni platformi, in sicer z zaključno litostratigrafsko enoto alveolinsko-numulitnih apnencev. V končni fazi poglobljanja je območje predizbokline prešlo v osrednji del fleksurnega bazena, v sklopu katerega so se na karbonatni platformi odlagale prehodne karbonatno-laporaste in klastične plasti, z značilnimi konglomerati, laporovci, lapornimi apnenci in apnenci. Z nadaljnjim poglobljanjem se je na prehodne plasti odlagal globokomorski klastični fliš, za katerega je značilno menjavanje laporovca in distalnih siliciklastičnih turbiditov, z vmesnimi prekinitvami izstopajočih plasti kalciturbiditov (Slika 2.2).

Laporovci so sivi do zelenkasto sivi, pogosto bioturbirani. Plasti laporovcev so bile odložene delno s turbiditnimi tokovi, delno pa z normalno sedimentacijo v hemipelagičnem okolju. Turbiditni laporovci so trdnejši, svetlejši in imajo večjo vsebnost karbonata. Debeline plasti laporovcev se menjavajo od 1 cm do več 10 cm. Peščenjaki predstavljajo siliciklastične turbidite, ki so večinoma drobnozrnati in tankoplastnati. Njihova sestava je razmeroma monotona, saj prevladujeta predvsem monokristalni kremen in mikritni klasti, ki so lahko litoklasti, peloidi in deloma mikritizirani drobcji rdečih alg. Poleg se pojavljajo še sparitni drobcji, večinoma bioklasti, terigena zrna (npr. polikristalni kremen, roženec, sljude, klasti laporovcev ali muljevcev, pirit, ortoklaz, plagioklaz ter glavkonit) in rastlinski ostanki. Vezivo je večinoma sericitna glinena osnova, medtem ko je v bolj debelozrnatih peščenjakih sparitni cement. Debelina plasti peščenjakov se giblje pod 1 cm do 1,5 m. Plasti so gradirane, z ostrimi spodnjimi mejami ter občasno razvitimi tokovnimi odlitki in sledovi vtiskanja. Razmerje debeline plasti med peščenjaki in laporovci se spreminja, prav tako se spreminja tudi debelina znotraj posameznih litoloških enot. V flišu so popolno ali le delno razvite Boumve sekvence turbiditnih tokov. Sedimentacija pelagičnih laporovcev ter posebno siliciklastičnega fliša je bila periodično prekinjena s sedimentacijo karbonatnih turbiditov.



Slika 2.2: Pogled na izkopno čelo leve cevi predora Markovec v flišu, z menjavanjem laporovca in peščenjaka v zgornjem delu ter megaplastjo kalkarenita v spodnjem delu (stacionaža km 0+109,70).

Figure 2.2: The excavated face of the Markovec left tunnel tube in flysch, with typical alternation of marlstone and sandstone in the upper part and a megabed of calcarenite in the lower part (chainage km 0+109,70).

V flišnih sekvencah se tako mestoma pojavljajo debelejšje plasti oz. megaplasti kalciturbiditov, ki jih v spodnjem delu gradijo plasti apnenca s kapo apnenega laporovca. Debelozrnati kalciturbiditi so tipa rudstone do packstone, ki jih sestavljajo predvsem velike bentoške foraminifere, fragmentirane rdeče alge ter ehinodermske ploščice. Podrejeno se pojavljajo še klasti apnenca z nerazpoznavnim biogenim drobirjem, ostrakode, planktonske foraminifere ter redkeje rdeče alge. Drobnozrnate kalkarenite sestavljajo še planktonske foraminifere in terigena zrna. Vezivo kalciturbiditov je večinoma mikrit z veliko biogenega drobirja. Debeline plasti kalkarenita dosežejo do 3,5 m, pokrov laporovca pa do 4,0 m (Otoničar, 2007; Pavšič in Peckmann, 1996; Rožič et al., 2014).

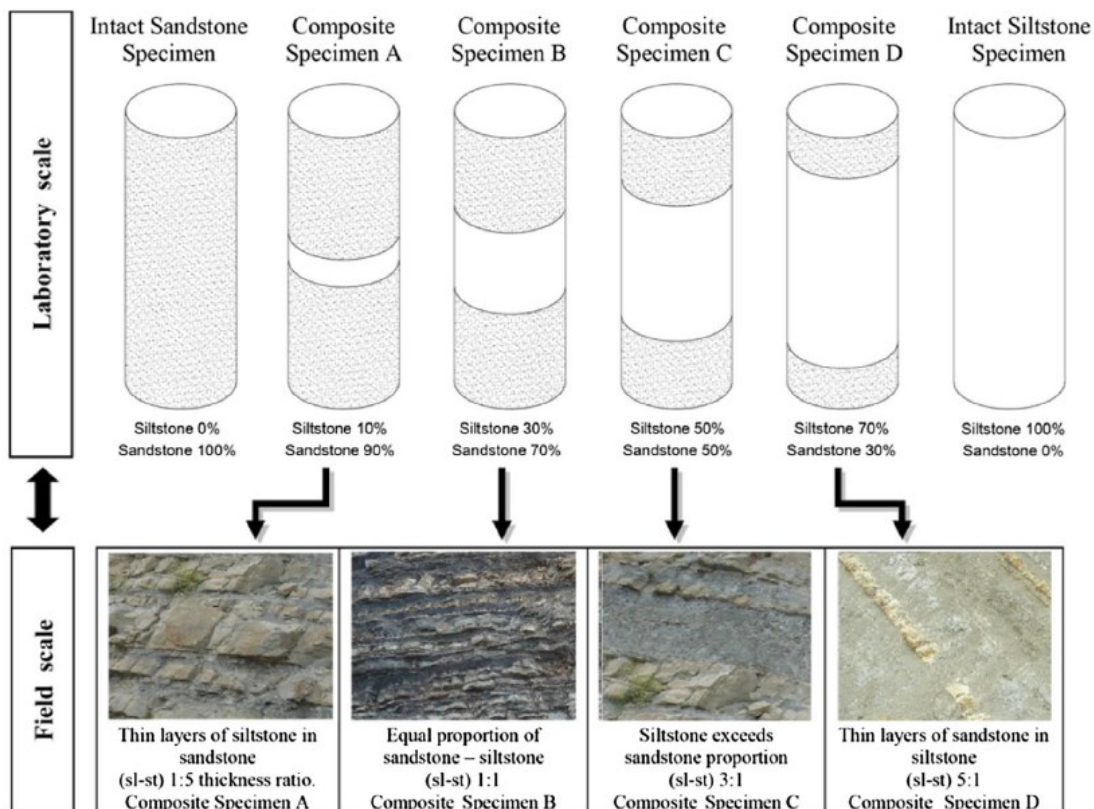
Področje med Trstom in Izolo, kjer sem izvedla meritve v okviru disertacije, pripada več zaporednim naravnim enotam, ki potekajo v dinarski smeri SZ – JV (Placer, 2005; Placer et al., 2010; Lizzi et al., 2008). Tektonsko je deformirano predvsem na obrobju obravnavanega območja, tako da pripada delu dinarskega predgorja z značilnim nepoškodovanim zaledjem fliša (Placer, 2005; Placer et al., 2010, 2004). Plasti vpadajo bolj ali manj subhorizontalno do blago proti SV oz. proti Z - SZ (Slika 2.2).

2.3 Inženirsko-geološke lastnosti fliša

Pri flišu prevladujejo med drobnozrnatimi kamninami meljevci, glinavci in laporovci, medtem ko so najpogostejše debelozrnate klastične kamnine peščenjaki, mestoma pa se lahko pojavljajo tudi konglomerati. Karakteriziramo ga kot heterogeno hribino, pri čemer imajo posamezne litološke enote različne geomehanske parametre, kar se odraža pri geotehničnem obnašanju fliša, saj je le-ta odvisen od deleža posameznih litoloških enot.

V sklopu umeščanja geotehničnih objektov v heterogeno hribino je že Goodman (1993) poudaril, da predstavlja več kot ena litološka enota, ki izkazuje različne lastnosti, zapleten geotehnični problem. Zaradi anizotropnega obnašanja, ki je posledica menjavanja trdnih in šibkih kamnin, nesorazmerno naraščata tako inženirska negotovost kot tveganje, kar privede do preveč konzervativne inženirske presoje in posledično nemalokrat do predragih projektnih rešitev. Trdnost heterogenih hribin je odvisna od deleža posameznih litoloških enot na obravnavanem območju, zato je določitev mehanskih lastnosti intaktne kamnine na podlagi laboratorijskih preiskav (enoosne in triosne tlačne trdnosti) pomembna pri izboru karakterističnih vrednosti za namen projektiranja (Saroglou, 2013; Tziallas et al., 2013). Odvzem in laboratorijska analiza vzorcev tankoplastnate heterogene hribine je precej zahteven postopek, kljub visoko kvalitetnemu vrtnanju. Zainab et al. (2007), Tziallas et al. (2013) in Berisavljević et al. (2018) so zato izvedli laboratorijske preiskave na kompozitih vzorcev peščenjaka in meljevca v različnih razmerjih (Slika 2.3), pri čemer je bilo ugotovljeno, da enoosna tlačna trdnost eksponentno pada z naraščanjem deleža meljevca do ok. 40–60 %, nato pa je enaka meljevcu. Podobno je od deleža meljevca odvisen tudi tip porušitve. V primeru, da je delež meljevca pod 20 %, poteka porušitev na členih peščenjaka, in sicer v kombinaciji strižne in tenzijske porušitve. Pri deležu meljevca med 20 in 45 % zajema strižna porušitev celotni vzorec, medtem ko pri vzorcih s prevladujočim deležem meljevca (nad 45 %) pride na člen meljevca do tenzijske porušitve.

Podobno so Tziallas et al. (2013) na podlagi triosne preiskave ugotovili, da je deformabilnost hribine odvisna od deleža meljevca, vendar se Youngov deformacijski modul postopno zmanjšuje v primerjavi z enoosno tlačno trdnostjo, saj je odvisen od deformabilnosti celotnega vzorca med obremenitvijo.

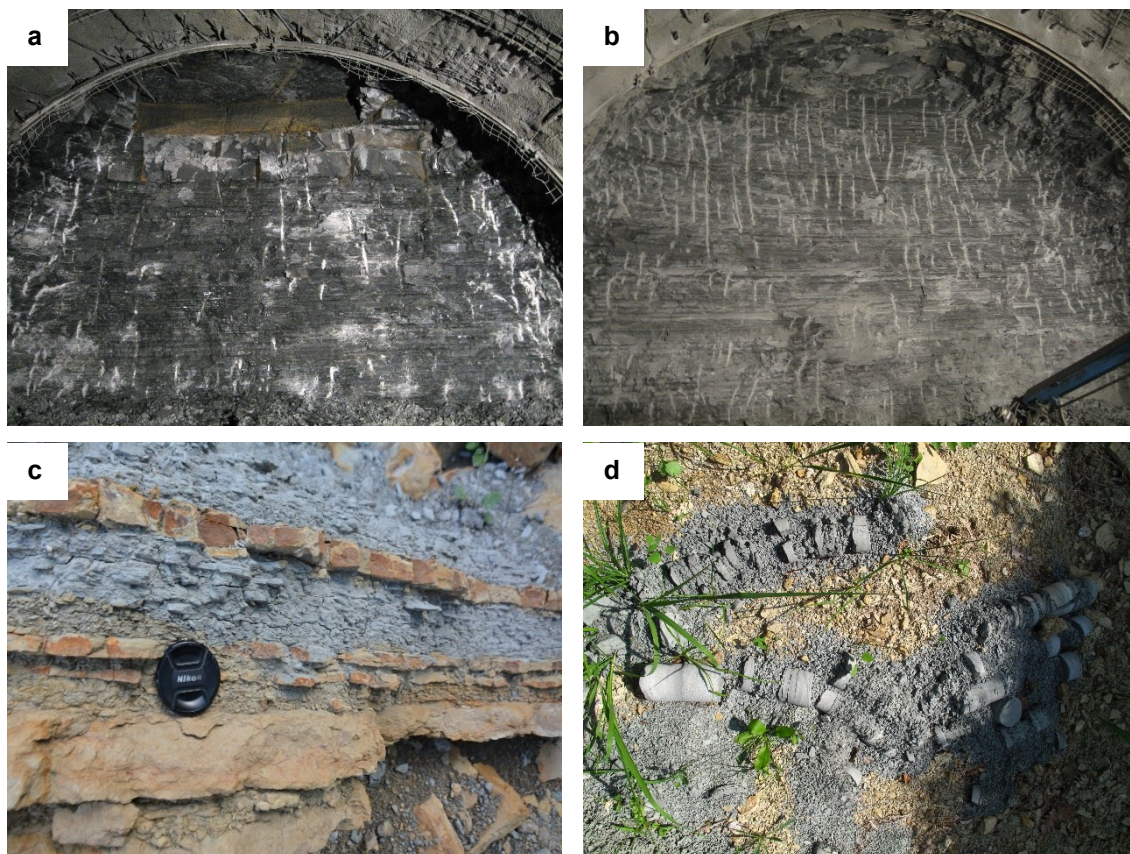


Slika 2.3: Različni deleži peščenjaka in meljevca v laboratorijskih in terenskih pogojih (Tziallas et al., 2013, 82).

Figure 2.3: Different proportions of sandstone and siltstone in laboratory and field conditions (Tziallas et al., 2013, 82).

Poleg različne trdnosti, vpliva na mehanske lastnosti posameznih komponent intaktne kamnine tudi podzemna voda, vendar predvsem na drobnozrnate kamnine (kot npr. meljevce, laporovce), ki so dovzetne na spremembe v vsebnosti vlage (Slika 2.4) in pri atmosferskih pogojih zato hitro razpadejo (Marinos in Hoek, 2001). V sklopu ugotavljanja mehanizmov, ki vplivajo na stabilnost pobočij v heterogenih hribinah, je zato pomembno prepoznavanje izpostavljenih litoloških enot, ki izkazujejo različne lastnosti in odpornost proti preperevanju, njihovo razmerje ter debelina posameznih plasti. Obenem je pomembna tudi geometrijska odvisnost pobočij in diskontinuitet (Pepe et al., 2015).

Pri karakterizaciji heterogene hribine je pomembno terensko prepoznavanje posameznih litoloških enot, ki gradijo heterogeno hribino, določitev razmerja med trdnimi in šibkimi kamninami ter njihove sestave. Na podlagi trdnostnih in deformabilnostnih značilnosti posamezne intaktne kamnine in njihovega razmerja v heterogeni hribini, lahko ocenimo obnašanje hribine pri gradbenih posegih (Pepe et al., 2015).



Slika 2.4: Primeri fliša z različnimi deleži peščenjaka in laporovca: sveža hribina (a in b), preperela hribina (c in d).

Figure 2.4: Flysch with different percentage of sandstone and marlstone: fresh rock mass (a and b), weathered rock mass (c and d).

Predstavljene ugotovitve so bile osnova pri izboru teme doktorske disertacije, v sklopu katere sem želela določiti tako razmerje med trdnimi in šibkimi kamninami fliša JZ Slovenije, kot tudi strukturne značilnosti, ki skupaj s sestavo vplivajo na obnašanje heterogene hribine. Inženirski geolog določa litološke in strukturne značilnosti pri geološkem popisu izdanka ter izkopnega čela, vendar je zajem reprezentativnih podatkov za analizo z uveljavljenimi ročnimi metodami omejen z obsegom in dostopom izdanka ter časom. Cenovna dostopnost in razvoj daljinskega zaznavanja s terestričnim laserskim skenerjem in bližnjeliskovno fotogrametrijo odpirata nove možnosti uporabe v inženirski geologiji. V nadaljevanju zato podajam pregled metod, ki pomembno prispevajo k terenskemu prepoznavanju in interpretaciji geoloških značilnosti hribin.

(Stran je namenoma prazna)

3 PREGLED IN OPIS METOD

Geološki popis izdanka ali izkopnega čela je v inženirski geologiji pomemben za razumevanje litološke sestave in strukturnih značilnosti heterogene hribine, iz katerega predvidimo geomehansko obnašanje ob izkopu ter pripomoremo k uspešnemu geotehničnemu projektiranju objektov. Poleg litološke sestave obravnavane hribine se posebna pozornost posveča meritvam diskontinuitet oz. nezveznostim, ki delijo hribino na bloke intaktne kamnine. Uveljavljena metoda zajema podatkov se še vedno izvaja ročno, zato je težnja po hitrem in natančnem zajemu ter obdelavi pridobljenih podatkov velika. V inženirski geologiji se zato uveljavljata bližnjelikovna fotogrametrija in terestrično lasersko skeniranje.

V poglavjih, ki sledijo, bom najprej predstavila ročni zajem podatkov, ki je uveljavljen na področju inženirske geologije. Sledi predstavitev diskontinuitet ter njihovih geometrijskih in geomehanskih značilnosti, ki so pomembni pri geomehanskem obnašanju hribine. Litologija in značilnosti diskontinuitet predstavljajo vhodne podatke v sistemih klasifikacije hribine, s katerimi opišemo inženirsko-geološke razmere na obravnavanem območju in bodo predstavljeni v posebnem poglavju, s poudarkom na njihovi uporabi pri karakterizaciji heterogene hribine. V drugem delu bom predstavila tehnologiji terestričnega daljinskega zaznavanja, ki se uveljavljata na področju inženirske geologije. Začela bom s poglavjem o bližnjelikovni fotogrametriji, uporabljenih pristopih ter zahtevah za njihovo vključitev v geološki popis. Zaključila pa bom s poglavjem o terestričnem laserskem skeniranju in njegovi podpori pri določanju geometrijskih lastnosti diskontinuitet ter razlikovanju med različnimi kamninami, ki gradijo heterogeno hribino.

3.1 Ročni zajem podatkov diskontinuitet in litologije

Zajem geoloških podatkov v inženirski geologiji je uveljavljen in ga v splošnem izvajamo v dveh fazah: začetni in glavni fazi. Namen inženirsko geoloških meritev je predvsem zagotavljanje ustreznih podatkov o prostorski legi, strukturi in površinskem stanju diskontinuitet ter registracija vseh sprememb v litološki zgradbi, stopnji tektonske poškodovanosti in vpliva erozijskih procesov (Ocepek, 2004).

V začetni fazi pregledamo obstoječe podatke predhodnih raziskav in projektne dokumentacije ter ovrednotimo morfologijo terena. Na podlagi začetne faze pripravimo program nadaljnjih terenskih in laboratorijskih raziskav, ki so pomembni za razumevanje geoloških in geotehničnih pogojev znotraj območja projekta. Obseg raziskav je odvisen od stopnje predhodne raziskanosti terena, zasnove, velikosti in pomembnosti objekta, predvidenih obremenitev tal

ter sestave tal. V sklopu terenskih raziskav izvajamo geološko kartiranje, geofizikalne in hidrogeološke preiskave, sondažne razkope in/ali vrtine ter geotehnične meritve.

Terenske raziskave izvajamo z namenom ocene geoloških pogojev tal obravnavanega območja, pred izvajanjem gradbenih del. Njihov cilj se spreminja glede na velikost in naravo predlaganih gradbenih del ter načeloma podaja:

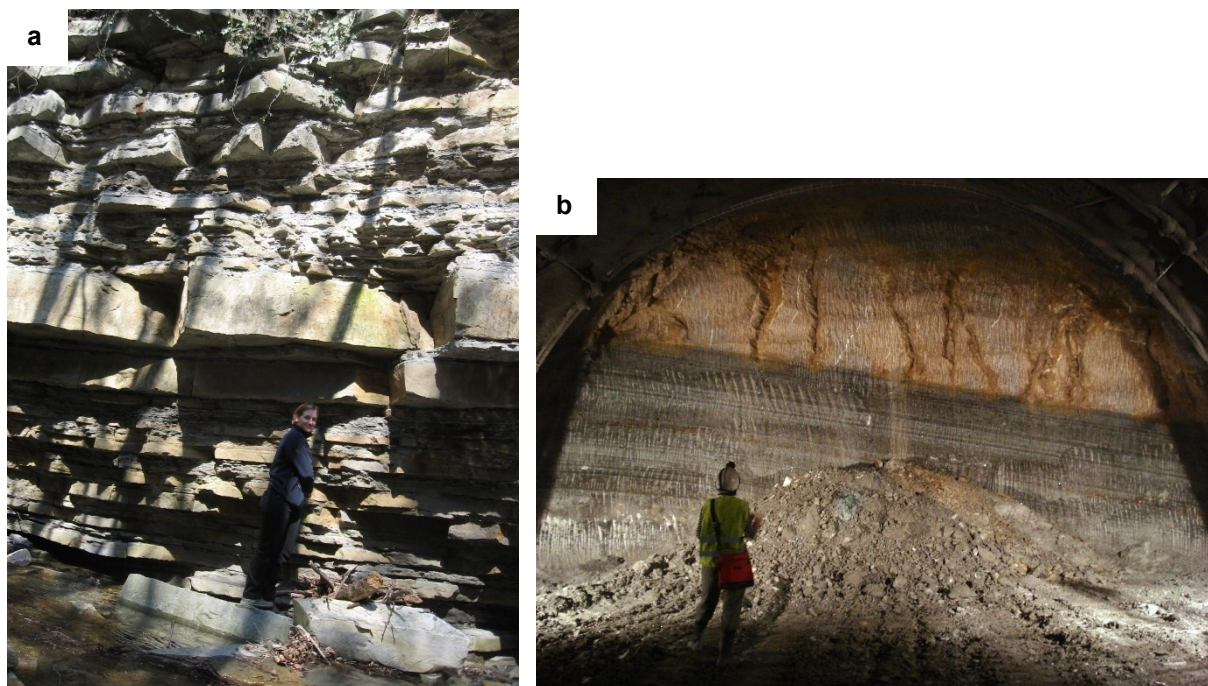
- primernost terena predlaganega projekta,
- pogoje na obravnavanem območju ter lastnosti tal,
- potencialne probleme tal in/ali nestabilnosti,
- geomehanske podatke tal za nadaljnje izračune (Waltham, 2009).

Geološko kartiranje predstavlja postopek zajemanja geoloških podatkov obravnavanega območja na samem terenu. Geološki podatki, ki so pomembni za razumevanje ozemlja, so predvsem:

- litološka sestava,
- geomorfološke značilnosti
- strukturne značilnosti (plastnatost, prelomi, razpoke, gube, idr.),
- inženirsko-geološke lastnosti,
- hidrogeološke lastnosti.
- lastnosti obstoječih vkopov,
- pojavi nestabilnosti območja ter
- ostale lastnosti ozemlja.

Postopek zajemanja izvajamo na terenu predvsem ročno. Osnovna oprema geologa pri geološkem kartiranju je zemljevid, geološki kompas, geološko kladio, meter, podloga za pisanje ter, v primeru pojavljanja zemljinskega materiala, ročni penetrometer in krilna sonda. Na podlagi geološkega kartiranja potrdimo ali dopolnimo nadaljnji program terenskih raziskav z geofizikalnimi in geotehničnimi meritvami.

Med geološkim kartiranjem se osredotočamo na zajem čim večjega števila podatkov obravnavanega območja. Geološko kartiranje že dlje časa ni več izključno ročni zajem geoloških podatkov, saj si med procesom pomagamo s pripomočki, ki geologu olajšajo delo in omogočajo natančnejše lociranje površinskih izdankov (GNSS, digitalni fotoaparati, ipd.).



Slika 3.1: Geološki popis izdanka fliša v dolini reke Glinščice (a) ter izkopnega čela v predoru Markovec (b).

Figure 3.1: Geological outcrop logging of flysch in Glinščica valley (a) and excavated tunnel face in the Markovec tunnel (b).

3.1.1.1 Litološka sestava

V sklopu popisa izdanka ali izkopnega čela podamo litološko sestavo opazovane kamnine ter ocenimo trdnost in stopnjo preperevanja. Trdnost kamnine predstavlja njena enoosna tlačna trdnost. Na trdnost vplivata stopnja preperevanja in precejanje vode. Na terenu lahko ocenimo trdnost kamnine s pomočjo terenskega orodja in geološkega kladiva, oziroma s Schmidtovim kladivom, s katerim na podlagi odbojne trdote preračunamo enoosno tlačno trdnost. V priporočilih ISRM (Barton, 1978) in standardu SIST EN ISO 14689-1:2004 so podani opisi za terensko oceno trdnosti kamnine, na podlagi katere lahko ocenimo enoosno tlačno trdnost. Za natančno določitev geomehanskih parametrov je potrebno odvzeti vzorce za laboratorijske preiskave. V primeru heterogenih hribin, kot je fliš, ocenimo trdnost za posamezno litološko enoto, nato na podlagi deleža še skupno trdnost hribine.

3.1.1.2 Stopnja preperevanja kamnine

Preperevanje hribine bi se opiše s porazdelitvijo in relativnim razmerjem nepreperete kamnine ter razbarvane in razpadle kamnine, skupaj z njegovim vplivom na diskontinuitete. Preperevanje sčasoma spremeni kamnino v zemljino. Pri opisu lastnosti diskontinuitet vključimo stopnjo preperevanja, saj namiguje na dolžino izpostavljenosti površine kamnine atmosferskim vplivom, zato lahko na podlagi stopnje preperevanja določimo okvirno starost skalnih podorov. Opis stopenj preperevanja je vključen v ISRM (Barton, 1978), dopolnjene opise pa najdemo v standardih SIST EN ISO 14689-1:2004 in ASTM D5878-08. Pri določanju stopnje preperevanja vzdolž diskontinuitet, poudarjamo predvsem razbarvanost in stanje kamnine na površini diskontinuitet.

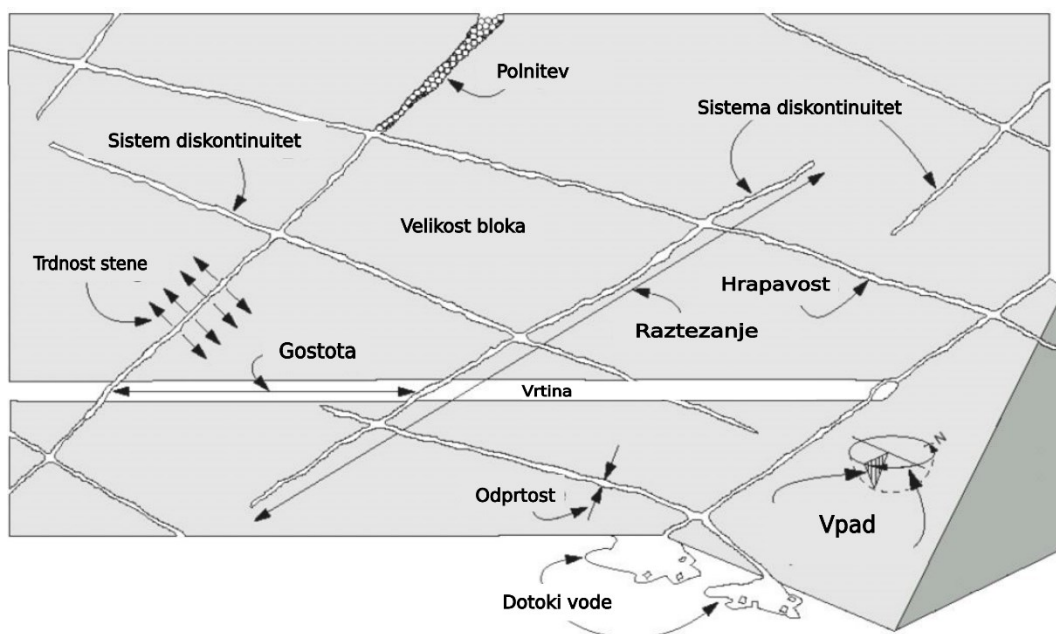
Stopnje preperevanja tako kamnine kot diskontinuitet določamo na podlagi terenskega opisa po priporočilih ISRM (Barton, 1978) in standarda SIST EN ISO 14689-1:2004. Razdeljene so v šest kategorij, od nepreperete kamnine (W1) do preperine (W6). Pri določanju uporabljamo geološko kladivo in žepni nož.

Pri popisovanju površinskih izdankov ter površinskih in podzemnih izkopnih čel, nas poleg litološke sestave zanimajo tudi strukturne značilnosti hribine obravnavanega območja. Prisotnost diskontinuitet v hribini namreč zmanjšuje njeno trdnost in homogenost ter igra pomembno vlogo pri nestabilnosti pobočij. Analize stabilnosti vključujejo kinematične analize, metode mejnega ravnovesja in numerično modeliranje, zato je pomembno razumevanje medsebojnega vpliva med diskontinuitetami in morfologijo pobočja. Omenjene analize temeljijo na razumevanju strukturne geologije obravnavanega območja ter na natančnih meritvah parametrov diskontinuitet (Sturzenegger, 2010).

Ročni zajem podatkov ima tako prednosti kot slabosti za nadaljnjo analizo in pripravo geološkega modela območja predvidene izgradnje. Na terenu si geolog prostorsko predstavi zgradbo obravnavanega območja, na katere naveže litološke, strukturne in geomehanske lastnosti kamnin ter na podlagi izkušenj oceni obnašanje hribine v času izgradnje in po njej. Žal pa ima ročni zajem geoloških podatkov pri kartiranju tudi pomanjkljivosti, tako kvantitativne kot tudi kvalitativne. Kvantitativne pomanjkljivosti so predvsem majhno število meritev geoloških ploskev oz. diskontinuitet (vpadi, dolžine, razmiki med sistemi diskontinuitet, idr.), med kvalitativne pomanjkljivosti pa štejemo predvsem subjektivnost geoloških popisov tako površinskih izdankov kot podzemnih izkopov ter manjša možnost preverjanja, ki se odraža predvsem pri spremljavi podzemnih izkopov.

3.1.2 Opis diskontinuitet

Diskontinuiteta predstavlja vsako mehansko diskontinuiteto v hribini z nizko natezno trdnostjo ali brez natezne trdnosti. Izraz se uporablja za več vrst strukturnih elementov, kot so razpoke, prelomi, plastnatost ter ostalih nezveznostih v različnih smereh šibkosti. Na področju inženirske geologije in geotehnike so ga uvedli z namenom splošnega opisa nezveznosti in območij šibkosti v hribinah. Pri gradbenih posegih v hribino se le-ta obnaša nezvezno (ang. discontinuum), na njeno mehansko obnašanje izrazito vplivajo diskontinuitete (Barton, 1978).



Slika 3.2: Osnovne značilnosti diskontinuitet v hribini (prirejeno po Hudson, 1989).

Figure 3.2: Main characteristics of discontinuities in rock mass (modified after Hudson, 1989).

Na površinskih izdankih in izkopnih čelih se diskontinuitete pojavljajo tako v obliki sledi kot izpostavljenih površin, pri čemer je navadno celotna površina diskontinuitete najmanj delno skrita znotraj hribine ali erodirana (Sturzenegger, 2010). Na podlagi večletnih izkušenj geološke spremljave površinskih in podzemnih izkopov so inženirski geologi preučili glavne značilnosti diskontinuitet (Slika 3.2), ki vplivajo na mehansko obnašanje hribine. Leta 1978 so predlagali metode za zajem in kvantitativni opis glavnih parametrov diskontinuitet, ki bi pripomogli k enotnemu opisu diskontinuitet v hribini ter pomagali pri komunikaciji med geologi in inženirji (Barton, 1978). Pri razvoju klasifikacije hribine so se nekateri avtorji opirali tudi na ISRM priporočila (Barton, 1978) za kvantitativni opis diskontinuitet (Bieniawski, 1989; Marinos et al., 2005). Dopolnjene opise pa najdemo tudi v standardu SIST EN ISO 14689-1:2004, ki se poleg ISRM priporočil uporablja v Sloveniji. Pri opisu diskontinuitet moramo zabeležiti tip diskontinuitet, orientacijo, gostoto razpokanosti, dolžino diskontinuitet, hrapavost površine,

odprtost in zapolnitev ter dotoke vode. Na podlagi določenih značilnosti diskontinuitet moramo podamo še število sistemov diskontinuitet ter velikost blokov.

3.1.2.1 Orientacija diskontinuitet

Orientacija diskontinuitete v prostoru je ena izmed najpomembnejših parametrov diskontinuitet, ker njena orientacija relativno na inženirsko strukturo kontrolira v veliki meri možnost nestabilnih pogojev ali razvoj prekomernih deformacij. Njen pomen se poveča ob prisotnosti ostalih pogojev, ki povzročajo deformacije, kot npr. nizka strižna trdnost in zadostno število diskontinuitet ali sistemov razpok, ki lahko povzročijo zdrs (Barton, 1978). Orientacijo diskontinuitete v prostoru izmerimo z geološkim kompasom in opišemo z azimutom (odklon od severa v smeri urinega kazalca, izražen s kotom med 0° in 360°) ter naklonom (linijo najbolj strme deklinacije, merjene od horizontalne ravnine, izraženo s kotom med 0° in 90°).

Meritve orientacije diskontinuitet se morajo izvajati v čim večjem številu, da jih lahko statistično obdelamo in s tem določimo karakteristične sisteme diskontinuitet v prostoru. Na natančnost meritev pa vplivajo številni faktorji: naravni (pojav lokalnih magnetnih anomalij, težka dostopnost površinskih izdankov oz. izkopnega čela) in človeški (npr. nenatančnost, otežene meritve zaradi nedostopnosti). Zbrane izmerjene vpade vnesemo na krogelno projekcijo, s pomočjo katere določimo orientacije geoloških struktur in opredelimo glavne sisteme diskontinuitet (skupine diskontinuitet, ki so si med seboj vzporedne in približno enako oddaljene), ki vplivajo na mehansko obnašanje hribin (Barton, 1978).

3.1.2.2 Gostota razpakanosti

Gostota razpakanosti (angl. *spacing*) opisuje razdaljo med dvema diskontinuitetama istega sistema in pomembno vpliva na velikost posameznih blokov intaktne hribine. Načeloma se navezuje na povprečne razmike znotraj sistema razpok. Številni sistemi z večjo gostoto razpakanosti znotraj istega sistema pogojujejo nastanek mase z nižjo kohezijsko trdnostjo. Podobno kot pri orientaciji se pomen razmikov povečuje ob prisotnosti pogojev za deformacije (nizka strižna trdnost ter zadostno število sistemov diskontinuitet za nastanek zdrsa). Gostota razpakanosti ima direkten vpliv na prepustnost hribine (Barton, 1978).

Na terenu merimo razmike med diskontinuitetami z merskim trakom in geološkim kompasom tako, da je merski trak pravokoten na slemenitev površine. Meritve so velikokrat težko izvedljive zaradi nedostopnosti izdankov. Pri analizi vpliva gostote razpok na geotehnično obnašanje hribine so avtorji ugotovili, da se hribina geotehnično enako obnaša v določenem

razponu. V priporočilih ISRM so značilni razponi razdalj med diskontinuitetami združeni v sedem kategorij, v standardu SIST EN ISO 14689-1:2004 pa v šest kategorij (Preglednica 3.1).

Preglednica 3.1: Razmiki med diskontinuitetami po standardu SIST EN ISO 14689-1:2004.

Table 3.1: Description of discontinuity spacing based on SIST EN ISO 14689-1:2004 standard.

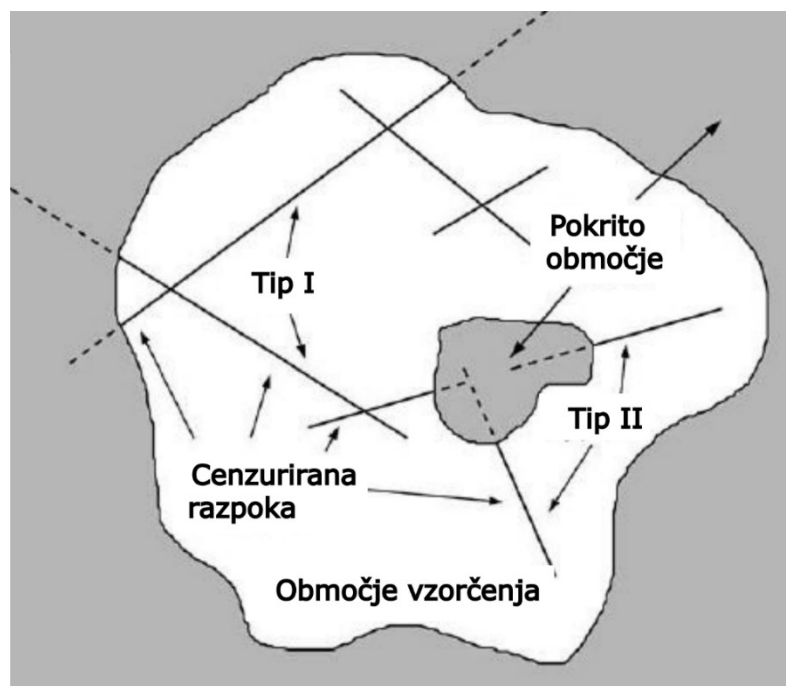
Opis	Razmik med diskontinuitetami [mm]
Zelo širok	> 2000
Širok	600 - 2000
Srednje širok	200 - 600
Majhen	60 - 200
Zelo majhen	20 - 60
Ekstremno majhen	< 20

3.1.2.3 Dolžina diskontinuitet v prostoru

Z dolžino (angl. *persistence*) opišemo obseg oz. velikost ploskve diskontinuitete ter jo izmerimo kot 1D dolžino sledi na izpostavljeni površini izdanka ali izkopnega čela. Predstavlja enega pomembnejših hribinskih parametrov, obenem pa tudi enega težje določljivih (Barton, 1978). Določitev obsega diskontinuitete je pomembna tudi po standardu SIST EN ISO 14689-1:2004. Dolžina mora biti izmerjena v dveh do treh pravokotnih smereh. Določitev dolžine diskontinuitete je problematično, ker se diskontinuitete raztezajo v prostoru, medtem ko je na izkopnem čelu viden le njihov del. Pri meritvah se pojavljata značilni napaki, ki vplivata na precenjeno ali podcenjeno oceno dolžine: cenzuriranje (angl. *censoring bias*) in krajšanje (angl. *truncation*). Pri cenzuriranju se diskontinuiteta razteza preko opazovalnega okna v eni ali obeh smereh (Slika 3.3). Vezana je na omejeno velikost izdanka, na neenakomerno površino izdanka ali na pokrit del izdanka (Zeeb et al., 2013). Krajšanje povzroči omejena ločljivost, ki je odvisna od uporabljenega instrumenta ter kontrasta med kamnino in razpoko. Napaka nastane, ker nekaterih parametrov, kot na primer velikosti razpoke, ni mogoče zaznati pod določenim merilom (Zeeb et al., 2013).

Meritve dolžine diskontinuitet so pomembni pri analizi stabilnosti in pričakovanih porušitev na kamnitih pobočjih, pri temeljenju jezov ter predorogradnji. Pri meritvah je pomembno pridobiti stopnjo raztezanja diskontinuitet z neugodno orientacijo za stabilnost. Stopnja, pri kateri se diskontinuitete raztezajo pod sosednjimi kamnitimi bloki brez zaključka v trdni kamnini ali proti drugim diskontinuitetam, določa stopnjo, pri kateri lahko pride do porušitve intaktne hribine. Pri

opredelitvi dolžine diskontinuitet moramo upoštevati tudi namen raziskav ter velikost načrtovanega objekta (Barton, 1978).



Slika 3.3: Predstavitev problematike cenzuriranja zaradi meje območja vzorčenja in pokritega dela izdanka (po Zeeb et al., 2013, 1547)

Figure 3.3: Censoring bias caused by the boundaries of a sampling area and covered parts of an outcrop (after Zeeb et al., 2013, 1547)

3.1.2.4 Hrapavost diskontinuitet

Hrapavost površine diskontinuitete (angl. *roughness*) je pomembna komponenta zaradi njene strižne trdnosti, posebno pri zaprtih diskontinuitetah, ki niso zapolnjene z materialom. Pomen hrapavosti površine diskontinuitete pada, če se povečuje odprtost med dvema ploskvama diskontinuitete, povečuje debelina zapolnitve ali stopnja predhodnih pomikov. Hrapavost površine diskontinuitet delimo na valovitost, ki je pomembna pri večjih premikih (med strižnimi premiki na kontaktih povzroča dilatacijo) ter na drobno hrapavost, ki je pomembna pri manjših premikih. Valovitost vpliva na začetno smer strižnega premika relativno na srednjo ploskev diskontinuitete, drobna hrapavost pa vpliva na strižno trdnost, ki bi jo drugače testirali v laboratoriju (Barton, 1978).

Ročne meritve hrapavosti površine diskontinuitet lahko izvajamo na dva načina: z linearnim profiliranjem ali z uporabo diskov. Pri linearnem profiliranju uporabljamo 2 m dolgo letev z milimetrsko oznako, kompas, kovinski trak in najlon z vrstico z oznako. Valovitost ocenjujemo z določanjem kota i , ki predstavlja kot med letvijo in srednjo vrednostjo izvedenih meritev

odstopanja valovitosti od povprečnega nagiba (Barton, 1978). Meritve z diski pa izvajamo s pomočjo aluminijastih plošč različnih radijev (5 cm, 10 cm, 20 cm in 40 cm) na katere pritrdimo kompas. Posamezne velikosti diskov polagamo na valovito površino ploskve potencialnega zdrsa ter jih večkrat premaknemo ter izmerimo vpad diska oz. plošče. Kote i merimo od vodoravne ravnine, rezultate meritev pa združimo na enotni Schmidtovi mreži (Barton, 1978).

Pri inženirsko geološkem popisu izdankov in izkopnih čel sta izvedbi linearnih meritev ter meritev z diski težko izvedljivi, zato uporabljamo predvsem opisne metode po standardu SIST EN ISO 14689-1:2004, kjer opišemo površino diskontinuitete glede na merilo opazovanja:

- majhno merilo (nekaj milimetrov): hrapava ali gladka;
- srednje merilo (nekaj centimetrov): ravna, stopničasta ali valovita;
- veliko merilo (nekaj metrov): valovita, ukrivljena ali ravna.

3.1.2.5 Odprtost diskontinuitet

Odprtost diskontinuitete (angl. *aperture*) opišemo kot razdaljo med sosednjima ploskvama diskontinuitete, katere vmesni prostor zapolnjuje zrak, voda ali zapolnitev. Odprtost je lahko posledica strižnega premika diskontinuitet s precejšnjo hrapavostjo, tenzijskega razpiranja, izpiranja materiala zapolnitve ali njegovega raztapljanja (Barton, 1978).

Odprtost diskontinuitet izvajamo z milimetrskimi ravnilni, klinastim ravnilom, s pomočjo šablon ali z opremo za izpiranje izpostavljene kamnine (Barton, 1978) ter jo ocenimo na osnovi standarda SIST EN ISO 14689-1:2004 (Preglednica 3.2).

Preglednica 3.2: Opis odprtosti diskontinuitet po standardu SIST EN ISO 14689-1:2004.

Table 3.2: Description of discontinuity aperture based on standard SIST EN ISO 14689-1: 2004.

Opis odprtosti diskontinuitete	Odprtost diskontinuitet
Zelo tesna	< 0,1 mm
Tesna	0,1 – 0,25 mm
Delno odprta	0,25 – 0,5 mm
Odprta	0,5 – 2,5 mm
Zmerno široka	2,5 – 10 mm
Široka	1 – 10 cm
Zelo široka	10 – 100 cm
Ekstremno široka	> 100 cm

3.1.2.6 Polnitev odprtih diskontinuitet

Po priporočilih ISRM (Barton, 1978) in standardu SIST EN ISO 14689-1:2004 opišemo polnitev (angl. *filling*) kot material, ki loči sosednji ploskvi diskontinuitete kamnine. Najpogosteje se kot polnitev pojavljajo kalcit, kremen, glina, melj, klorit, tektonski zdrob, ipd. Pravokotna razdalja med sosednjima ploskvama diskontinuitet predstavlja debelino zapolnjene diskontinuitete in je nasprotje odprtosti, značilne za odprte diskontinuitete. Različne polnitve diskontinuitet vplivajo na obnašanje kamnine, predvsem na strižno trdnost vzdolž diskontinuitet ter na prepustnost. Za določanje debeline in sestave polnitve diskontinuitet, uporabljamo merski trak minimalne dolžine 3 m z milimetrsko oznako, včasih potrebujemo tudi geološko kladivo in oster nož (Barton, 1978). Vsak sistem diskontinuitet, ki se razlikuje po polnitvi, obdelamo posebej, posebno se moramo posvetiti izrazitejšim tipom diskontinuitet, kot so prelomi in strižne razpoke. Za določitev sestave polnilnega materiala odvzamemo njegov vzorec za mineraloško in petrološko analizo. V primeru glinastega polnila potrebujemo preizkus nabrekanja v geomehanskem laboratoriju (Barton, 1989).

3.1.2.7 Trdnost sten diskontinuitet

Trdnost sten diskontinuitet predstavlja enoosno tlačno trdnost kamnine, kjer poteka diskontinuiteta. Na terenu lahko ocenimo trdnost kamnine s pomočjo terenskega orodja in geološkega kladiva, oziroma s Schmidtovim kladivom, s katerim na podlagi odbojne trdote preračunamo enoosno tlačno trdnost. V priporočilih ISRM (Barton, 1978) in v standardu SIST EN ISO 14689-1:2004 so podani opisi za terensko oceno trdnosti kamnine, na podlagi katere lahko ocenimo enoosno tlačno trdnost.

3.1.2.8 Dotoki vode

Precejanje vode in stopnjo vlažnosti lahko ocenimo vzdolž posamezne diskontinuitete, ki je lahko odprta in nezapolnjena ali zapolnjena. Pri geološkem kartiranju in spremljavi izkopa je velikokrat določitev dotoka vode oteženo. Standard SIST EN ISO 14689-1:2004 je zato poenostavil določitev tega parametra. Vidno pronicanje vode na površini hribine ali diskontinuitete opišemo kot »vlažna površina kamnine« in »kapljanje vode«. V primeru večjega dotoka vode pa dotok izmerimo in podamo njegovo vrednost.

Ročni zajem značilnosti diskontinuitet na terenu ima prednosti in slabosti. Čeprav je ročni zajem podatkov zamudno delo z včasih pomanjkljivimi podatki (predvsem s stališča količine podatkov za nadaljnjo analizo), je sestavni del pregleda obravnavanega območja za nadaljnje

projektiranje, saj dobi geolog vpogled v morfologijo področja, litološko sestavo in strukturne značilnosti ter obnašanje hribine. Daljinsko zaznavanje postaja vedno bolj nepogrešljiv dodatek geološkemu kartiranju, saj so podatki natančnejši in količinsko bogatejši, kar je pomembno za nadaljnjo obdelavo podatkov in analizo geotehničnega obnašanja hribine pri gradbenih posegih.

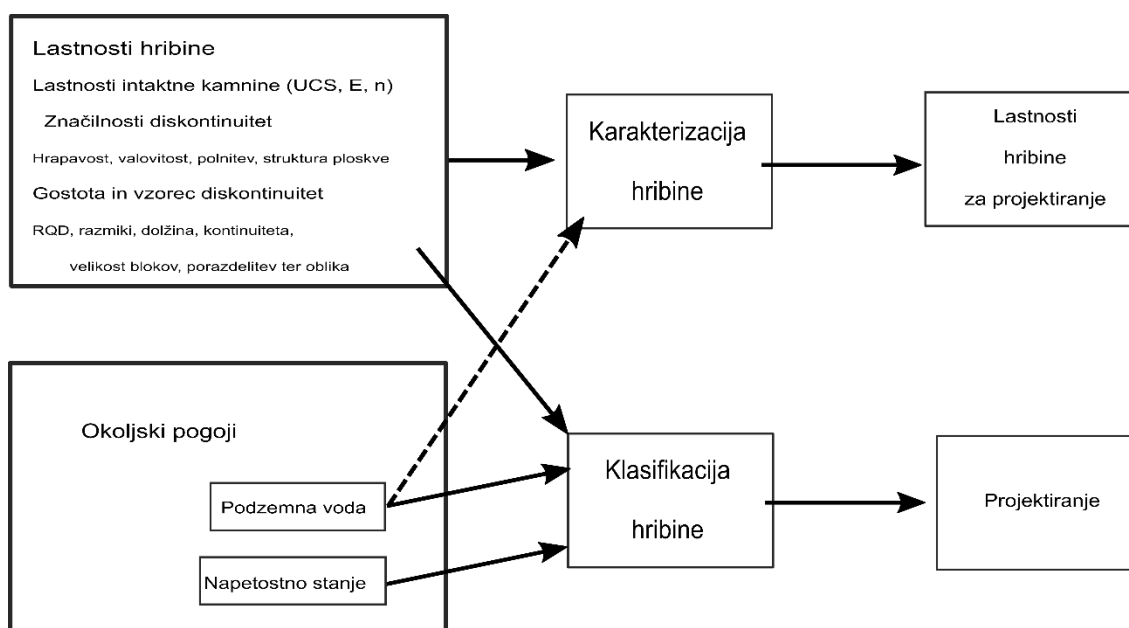
3.1.3 Karakterizacija in klasifikacija hribin

»Z inženirskega stališča je lahko poznavanje tipa in intenzivnosti nepravilnosti v kamnini velikokrat pomembnejše od samega tipa kamnine, ki se bo pojavljala.« (Terzaghi, 1946)

Pri projektiranju geotehničnih objektov v hribinah (npr. predorov, brežin) je pomembna karakterizacija hribine, s katero opišemo inženirsko geološke razmere, ki se pojavljajo na obravnavanem območju. Poleg opisa hribine vključuje določitev vrednosti pomembnim značilnostim, ki jih hribine izkazujejo in so relevantne za obravnavani projekt ter vplivajo na njihovo obnašanje. Pri tem upoštevamo tako lastnosti intaktne kamnine kot diskontinuitet (gostota in vzorec diskontinuitet ter njihove karakteristike), ki vplivajo na mehansko obnašanje hribin (Slika 3.4). Obtežbe ter okoljske faktorje (napetosti, orientacija diskontinuitet, idr.) nadalje upoštevamo v fazi projektiranja (Milne, 2007).

Projektanti se pri projektiranju, kjer je pomembna mehanika hribin, srečujejo s kompleksnimi hribinami in posledično s specifičnimi geomehanskimi parametri. Na podlagi številnih opazovanj, terenskih in laboratorijskih preiskav se je baza geomehanskih parametrov povečala, kar je bilo sicer dobrodošlo, vendar je obenem zaradi velike količine podatkov postala nepregledna. S klasifikacijo hribin so tako želeli urediti do tedaj uveljavljene postopke terenskih preiskav ter podati nujno potrebne pristope in smernice za projektiranje podzemnih izkopov. Klasifikacija hribin temelji na mehaniki hribin in predstavlja celovit paket za projektiranje v geotehniko in predorogradnjo (Slika 3.4). Glede na to, da se izkopi izvajajo v različnih kamninah in pod različnimi napetostnimi pogoji, ki so med drugim odvisni tudi od višine nadkritja, so se številni projektanti in raziskovalci sicer ukvarjali s podobno tematiko, vendar so na podlagi teh razlik podali različne uteži posameznim parametrom. Kot rezultat obstajajo različni sistemi klasifikacije, ki se med sabo ločijo glede na vrsto vhodnih podatkov ter namen uporabe (kvalitativni in kvantitativni sistemi klasifikacije). V primeru opisnega podajanja razmer hribine lahko predvidimo njeno obnašanje med izkopom in nadalje priporočene podporne ukrepe, medtem ko določimo pri numeričnih oblikah vhodnih podatkov

vrednosti glede na njihove karakteristike. Na podlagi namena uporabe ločimo splošne sisteme klasifikacije, ki podajo generalno karakterizacijo hribine, drugi sistemi pa so namenjeni specifični podpori projektiranja predorov oz. na splošno geotehničnih objektov (npr. predorov, brežin, temeljenj). Inženirsko geološke meritve zagotavljajo ustrezne podatke o prostorski legi, strukturi in površinskem stanju plasti in razpok ter registrirajo vse spremembe v litološki zgradbi, stopnji tektonske poškodovanosti, ali poškodb zaradi erozijskih procesov (Ocepek, 2004). Vsi ti parametri so pomembni pri klasifikaciji hribine, katera predstavlja pomemben del pri inženirsko geoloških popisih površinskih izdankov ter izkopnih čel.



1 V splošnem se diskretni pojavi, kot npr. prelomi in strižne ploskve ne ocenjujejo pri klasifikaciji hribin.

2 Podzemna voda je bila upoštevana tako kot lastnost hribine kot okoljski pogoj oz. obtežba.

Slika 3.4: Sestavni deli klasifikacije in karakterizacije hribine (po Milne, 2007, str. 112).

Figure 3.4: Components of rock classification and characterization (after Milne, 2007, pp. 112).

V preglednici 3.3 so predstavljeni sistemi klasifikacije hribin, ki so najbolj uveljavljeni na področju inženirske geologije, geotehnike in predorogradnje. Podan je njihov glavni namen ter uporabnost pri obravnavanju heterogenih hribin. V nadaljevanju podajam pregled glavnih sistemov klasifikacij, ki jih uporabljamo v Sloveniji. Klasifikacija heterogene hribine, kot je fliš JZ Slovenije, je na podlagi uveljavljenih sistemov klasifikacije nezanesljiva, ker je hribina obravnavana kot homogen material, ki ga razpoke razdelijo v manjše bloke in ne predvidevajo pojavov različnih litoloških enot z različnim geomehanskim obnašanjem. Pri klasifikaciji heterogenih hribin sta se zato najbolj uveljavila orodje GSI (Marinos et al., 2007) ter sistem klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989). Na slednjega sem se navezala v sklopu disertacije.

3.1.3.1 Klasifikacija hribinskih pritiskov po Terzaghiju

Pomen klasifikacije hribin, kot podpora projektantom pri projektiranju podpornih ukrepov v predorogradnji, je med prvimi predstavil Terzaghi (1946). Pri klasifikaciji hribin je posebno pozornost namenil tistim karakteristikam, ki prevladujejo pri obnašanju hribine. Klasifikacija je opisna in temelji na oceni hribinskih pritiskov, katere prevzamejo jekleni podporni ukrepi. Glede na to, da upošteva starejše metode predorogradnje, ni več v uporabi.

3.1.3.2 Sistem klasifikacije NATM

Klasifikacijski sistem NATM (Nova avstrijska metoda predorogradnje) podobno ovrednoti hribino kvalitativno, vendar ga moramo razumeti predvsem v kontekstu njegove uporabe v predorogradnji. Metodo so razvili Rabcewicz, Müller in Pacher (1958–1964) kot podporo pri izkopu predorov v šibkih hribinah, oz. kjer potrebuje okoliška hribina podporne ukrepe, ker je le-ta slabo nosilna (Rabcewicz, 1965; Pacher, 1975; Müller, 1978; Palmstrøm, 1995). S klasifikacijo so želeli pridobiti značilnosti hribin, ki se pojavljajo vzdolž predvidene trase predora in s tem oceniti pogoje med izgradnjo ter z njo povezanega terminskega plana in stroške. Za NATM je značilno, da predvidene geološke razmere in klasifikacijo hribin preverjamo med izkopom in jih dopolnjujemo.

3.1.3.3 Indeks RQD

Indeks RQD (*Rock Quality Designation*) so razvili Deere et al. (1967) za in-situ kvantitativno oceno kvalitete hribine, kot je predstavljena v enačbi (1). Določamo ga iz jeder vrtine in predstavlja delež kosov jedra vrtine L_i (cm), daljših od 10 cm glede na dolžino jedrovanega odseka L (cm).

$$RQD = \frac{\sum L_i}{L} * 100 \quad (1)$$

S pomočjo indeksa RQD določamo stopnjo razpokanosti hribine, vendar je vrednost odvisna od smeri vrtanja. Pri določevanju indeksa RQD ne upoštevamo značilnosti diskontinuitet. Uporabo RQD za oceno potrebnih podpornih ukrepov v predorogradnji je sicer podal Merritt (1972), vendar se je uveljavil predvsem kot vplivni parameter pri sistemih klasifikacije RMR ter Q, saj se z enostavnimi klasifikacijami težko zajame kompleksne lastnosti hribine, ki se lahko pojavijo.

Preglednica 3.3: Pregled sistemov klasifikacije hribin v splošni uporabi (prirejeno po Palmstrøm, 1995).

Table 3.3: Overview of generally used classification systems for rock mass (modified after Palmstrøm, 1995).

Izbrani sistemi klasifikacije hribin				
Naziv klasifikacije	Opis	Glavni namen	Uporabnost pri heterogenih hribinah	Vir
Klasifikacija hribinskih pritiskov po Terzaghiju (Terzaghi's rock load classification system)	Pozornost karakteristikam, ki prevladujejo pri obnašanju hribine	Projektiranje jeklenih podpornih ukrepov v predorogradnji	Upošteva plastnate kamnine	Terzaghi (1946)
NATM (Nova avstrijska metoda predorogradnje) (New Austrian Tunnelling Method)	Vključuje več metod za določitev količine in časovnega okvirja vgradnje podpornih ukrepov, korakov izgradnje, idr.	Izkop ter projektiranje v nekompetentnih prenapetih tleh	Uporabi v okviru določitve tipa obnašanja hribine	Rabcewicz, Müller in Pacher (1958-64)
RQD indeks (določitev kvalitete hribine) (Rock Quality Designation)	Podajanje kvantitativne ocene kvalitete hribina na podlagi jeder vrtin	Temelji na jedrih vrtine Uporaba v ostalih sistemih klasifikacije	Omejena	Deere et al. (1967)
RSR faktor (ocena strukture kamnine) (Rock Structure Rating)	Kvantitativna metoda za opis kvalitete hribine in izbor ustreznih podpornih ukrepov	Projektiranje predvsem jeklenih podpornih ukrepov v predorogradnji	Ni podatkov	Wickham et al. (1972)
* RMR faktor (ocena hribine) (Rock Mass Rating)	Ugotavljanje in primerjanje geotehničnih razmer pri posegih v hribine	Pri projektiranju v predorogradnji, rudnikih, in temeljenj	Omejena z uporabo odsekov oz. uteženega povprečja	Bieniawski (1973, 1989)
SMR (Klasifikacija hribin za brežine) (Slope Mass Rating)	Predhodna ocena stabilnosti brežine in potrebnih podpornih ukrepov	Nadgradnja RMR	Ni podatkov	Romana (1985)
Q klasifikacija (indeks kvalitete predorogradnje v hribini)	Določitev karakteristik hribine in zahtev za podporne ukrepe	Pri projektiranju podpornih ukrepov podzemnih izkopov	Omejena	Barton et al. (1974)
Orodje GSI (geološki indeks trdnosti)	Trdnostne in deformabilne lastnosti hribine pri uporabi Hoek-Brownovega kriterija	Pri projektiranju podpornih ukrepov podzemnih izkopov in brežin	Prirejena tabela GSI za heterogene hribine	Hoek (1994)
RMi (indeks hribine)	Volumetrični parameter za oceno enoosne tlačne trdnosti hribine	Ocena podpornih ukrepov ter ostalih metod v hribinskem inženirstvu	Ni podatkov	Palmstrøm (1995)
RMQR (ocena kvalitete hribine) (Rock Mass Quality Rating System)	Kvantificira stanje hribine in oceni njihove geomehanske lastnosti	Uporablja pri projektiranju podpornih ukrepov podzemnih izkopov	Ni podatkov	Aydan et al. (2014)

* Uporabljen sistem klasifikacije v doktorski disertaciji / Classification system applied in the thesis

3.1.3.4 Sistem klasifikacije Q

Sistem klasifikacije hribin Q (angl. *Tunnelling Quality Index*) je bil razvit na podlagi številnih analiz podzemnih gradenj na območju Skandinavije, z namenom določanja potrebnih podpornih ukrepov v predorogradnji, glede na značilnosti hribin, ki se pojavljajo vzdolž trase predora. Razvit je bil s strani Barton et al. (1974) in predstavlja kvantitativni sistem klasifikacije, ki temelji na numerični oceni kvalitete hribine, opisane s pomočjo šestih parametrov, ki podajajo velikost blokov, medblokovno strižno trdnost ter aktivne napetosti, ne upošteva pa orientacije diskontinuitet.

3.1.3.5 Orodje GSI

Hoek in Brown (1980) sta v svojih raziskavah na podlagi pridobljenih informacij o trdnosti intaktnih kamnin predstavila empirični kriterij porušitve. Pri projektiranju podzemnih prostorov predstavlja eden izmed večjih problemov ocena trdnosti in deformabilnosti hribine obravnavanega območja, posebno razpokane hribine. V kolikor želi inženirski geolog razumeti obnašanje razpokane hribine, mora upoštevati tako lastnosti intaktne kamnine kot značilnosti površine diskontinuitet, saj se bo na podlagi števila, orientacije in lastnosti diskontinuitet, ki delijo intaktno kamnino, hribina pod pritiski različno obnašala (Hoek, 1994). Izračun Hoek Brownovega kriterija porušitve po enačbi (2) vključuje enoosno tlačno trdnost intaktne kamnine σ_{ci} (MPa), efektivni napetosti σ'_1 (MPa) in σ'_3 (MPa) ter konstante, ki opisujejo sestavo m_b in značilnosti hribine s in a :

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} + s \right)^a \quad (2)$$

Empirična Hoek Brownova konstanta m_b je brezdimenzijska in predstavlja zmanjšano vrednost konstante intaktne kamnine m_i , katero lahko določimo samo na podlagi triosne laboratorijske preiskave vzorcev jeder oz. ocenjenih iz kvalitativnega opisa kamnine (Hoek in Brown, 1997). Opisuje sestavo hribine, odvisna pa je od vrednosti GSI in stopnje poškodovanosti D , kateri je bila hribina podvržena z miniranjem in sprostitve napetosti. Podobno sta od karakteristik hribine odvisni tudi konstanti s in a . Pri oceni konstant sta predlagala uporabo sistema klasifikacije RMR (Bieniawski, 1976), vendar sta obenem ugotovila, da se kriterij lahko uporablja pri intaktnih kamninah ali pri močno razpokanih hribinah, katere lahko obravnavamo kot homogene in anizotropne. Izbrani pristop ni prišel v poštev pri šibkih hribinah ter pri močno skrjavih hribinah, kjer so porušitve kontrolirane z enim sistemom diskontinuitet (Hoek, 1994).

Z uvedbo novega indeksa za oceno trdnosti hribine GSI (*Geological Strength Index*) sta želela premagati to pomanjkljivost in omogočiti povezavo med konstantami kriterija porušitve z meritvami in opazovanji na terenu. Orodje za oceno trdnosti hribine GSI upošteva v veliki meri geološke omejitve, ki se pojavljajo v naravi ter se odražajo v geološki informaciji. S kombinacijo dveh osnovnih parametrov geoloških procesov, tvorjenja blokov hribine in lastnosti razpok, odraža glavne pogoje geološke formacije. Za razliko od sistemov klasifikacije RMR in Q, na podlagi katerih lahko ocenimo potrebne podporne ukrepe pri podzemni gradnji, je glavni namen indeksa GSI oceniti lastnosti hribin. Le-te predstavljajo pomembne vhodne podatke pri numeričnih analizah v predorogradnji, stabilnosti brežin in temeljenja v hribinah (Marinos, 2005). Indeks GSI se je razvijal tekom let v sodelovanju s strokovnjaki iz področja inženirske geologije. Posebno pozornost so namenili natančni porazdelitvi vsakega okna ter relativni teži, dodeljeni posamezni kombinaciji strukturnih in površinskih pogojev, z namenom spoštovanja geoloških pogojev, ki se pojavljajo v naravi (Marinos in Hoek, 2000). Pri kartiranju površinskih izdankov in izkopnega čela določimo indeks s primerjavo strukture, ki so prikazane na slikah posebnih preglednic, kot sta preglednici 3.4 in 3.5. Posebej je potrebno poudariti, da brez podrobnih meritev diskontinuitet (prostorske lege, števila sistemov razpok, velikosti blokov, površinskega stanja razpok z upoštevanjem hrapavosti, polnitev in stopnje preperelosti ter tektonske poškodovanosti), primerjava s preglednicami ni možna (Ocepek, 2004).

Marinos in Hoek sta na podlagi izkušenj izkopov predorov v Grčiji, ki so potekali v heterogenih in močno tektonsko poškodovanih hribinah ugotovila, da je kvantitativni izračun s sistemoma klasifikacije RMR in Q v primeru šibkih in heterogenih hribin brez pomena (Marinos et al., 2005). Na podlagi dognanj sta osnovni diagram GSI (Preglednica 3.5) razširila za uporabo v heterogenih hribinah (Marinos in Hoek, 2001; Marinos et al., 2007). Glede na delež posameznih litoloških enot, ki sestavljajo izbrano območje, sta predlagala uporabo utežnega povprečja za nadaljnjo oceno intaktnih trdnostnih karakteristik heterogene hribine. S poznavanjem trdnostnih parametrov in vrednosti GSI hribine nadalje ocenimo mehanske lastnosti obravnavane hribine.

Orodje GSI temelji na predpostavki, da hribino seka zadostno številno naključno orientiranih sistemov diskontinuitet. Na podlagi te predpostavke je Marinos et al. (2005) predlagal previdno uporabo orodja GSI v primeru hribin s prevladujočo orientacijo struktur v anizotropnih hribinah s prevladujočim enim ali dvema sistemoma diskontinuitet, v primeru hribin, pri katerih sta trdnost in deformabilnost odvisna od odprtosti in zapolnitve diskontinuitet ter pri podzemni gradnji, ki poteka v trdni hribini z visokim nadkritjem, ko se obnašanje hribine približa intaktni kamnini. Posebna pozornost pri uporabi GSI je potrebna tudi v hribinah, pri katerih lahko voda

negativno vpliva na diskontinuitete oz. materiale, ki diskontinuitete zapolnjujejo ter v preperelih hribinah.

Preglednica 3.4: Splošna GSI klasifikacija (prirejeno po Marinós in Hoek, 2000, str. 4).

Table 3.4: General GSI classification chart (modified after Marinós in Hoek, 2000, pp. 4).

GEOLOŠKI INDEKS TRDNOSTI ZA RAZPOKANE KAMNINE (Hoek & Marinós, 2000)		STANJE POVRŠIN PLOSKEV DISKONTINUITET	ZELO DOBRO – Zelo hrapave, sveže, nepreperete površine	DOBRO – Hrapave, rahlo preperete površine, možni železovi oprhi	ZMIERNO – Gladke, zmerno preperete in spremenjene površine	SLABO – Zglajene, močno preperete površine s kompaktnimi prevlekami/ zapointitvami z oglatimi delci	ZELO SLABO – Zglajene, močno prep. površine z mehkiimi glinenimi prevlekami ali zapointitvami
Na podlagi opisa litologije, strukture in stanja površine ploskev diskontinuitet, oceni povprečno vrednost GSI. Ne poskušaj biti preveč natančen, saj je bolj realno ovrednotiti interval vrednosti od 33 do 37, kot podati GSI = 35. Upoštevaj, da se tabela ne sklicuje na strukturno kontrolirane zruške. Koder so prisotne šibke planarne diskontinuitete, ki so glede na izkopno čelo neugodno orientirane, bodo le-te prevladale pri obnašanju hribine. Strižna trdnost površine diskontinuitet v kamninah, ki so podvržene poslabšanju v primeru spremembe vlažnosti, se bo znižala ob prisotnosti vode. Pri delu z zadovoljivimi do zelo slabimi hribinami, je potrebno pri mokrih pogojih pomik v desno. Vodni pritisk se obravnava z analizo efektivnih napetosti.							
STRUKTURA		ZMANJŠANJE KVALITETE POVRŠINE PLOSKEV RAZPOK ➔					
	INTAKTNA ALI MASIVNA - intaktni vzorci kamnine ali masivne in situ kamnine z nekaj široko razmaknjenimi diskontinuitetami	ZMANJŠANJE SPRIJETOSTI KOSOV KAMNINE ⬇	90			N/A	N/A
	BLOKOVNA - malo razpokana, nepoškodovana hribina kubičnih blokov, omejenih s 3 sistemi razpok		80				
	MOČNO BLOKOVNA - razpokana, delno poškodovana hribina z večstraničnimi nepravilnimi bloki, omejenimi s 4 ali več sistemi razpok		70				
	BLOKOVNA/POŠKODOVANA/NAGUBANA - nagubana in tektonsko poškodovana z nepravilnimi bloki, omejenimi z več sistemi razpok		60				
	ZDROBLJENA - zelo razpokana, močno tekt. poškodovana hribina z mešanico nepravilnih in zaobljenih kosov hribine		50				
	LAMINIRANA/STRIŽNO DEFORMIRANA - pomanjkanje strukture blokov zaradi majhnih razmikov pri šibki skrnavosti ali strižnimi ploskvami.		40				
					30		
						20	
							10
			N/A	N/A			

Preglednica 3.5: Nova GSI klasifikacija za heterogene hribine, podobne flišu (prirejeno po Marinis et al., 2007, str.91).

Table 3.5: New classification chart for heterogeneous rock mass, as flysch (modified after Marinis et al., 2007, pp. 91).

Klasifikacija GSI za heterogene hribine, kot npr. fliš (V. Marinis, 2007)		STANJE POVRŠINE DISKONTINUITET (Prevladujoče površine plasti)	ZMANJŠANJE KVALITETE DISKONTINUITET				
<p>Za heterogene hribine je značilno menjavanje plasti različne litoške sestave, z različnimi trdnostnimi lastnostmi. V primeru fliša se menjavajo peščenjaki in meljevci, včasih se lahko pojavljajo tudi skrilavi glinavci. Na podlagi opisa lito logije, strukture in stanja površine diskontinuitet (posebno plasti), izberi okno v tabeli. Izbor strukture naj bi temeljil na stojnici tektonske poškodovanosti (nepoškodovan, rahlo tektonsko poškodovan, močno tekt. poškodovan - porušen/razpadel, strižno deformiran), deleži meljevca napram peščenjaku ter glede na izraženo stratifikacijo oz. brez stratifikacije znotraj plasti meljevcev. V primeru tipa IV in V, ko so plasti peščenjakov debelejšje od 50 cm, je priporočljivo povečati vrednost GSI za 5. Od tipa IV dalje, so ploskve plastnatosti/stratifikacije zaznavne znotraj meljevcev.</p> <p>Položaj lociraj v oknu, ki ustreza pogojem diskontinuitet ter o ceni povprečno vrednost GSI iz kontur. Ne poskušaj biti natančen, saj je bolj realno ovrednotiti interval vrednosti od 33 do 37, kot podati GSI = 35. Upoštevaj, da se Hoek-Brownov kriterij ne sklicuje na strukturno kontrolirane zruške. Koder so prisotne šibke planarne diskontinuitete, ki so glede na izkono čelo neugodno orientirane, bodo le-te prevladale pri obnašanju hribine. Trdnost nekaterih hribin se zmanjša ob prisotnosti vode. Pri delu z zadovoljivimi do zelo slabimi hribinami v mokrih razmerah, je potrebno vrednost GSI pomakniti v desno ter jo znižati. Vodni tlak sicer ne vpliva na vrednost GSI in se obravnava z uporabo analize efektivne napetosti.</p>			ZELO DOBRO – Zelo hrapave, sveže, neprepreke površine	DOBRO – Hrapave, rahlo prepreke površine	ZMERNO – Gladke, zmerno prepreke in spremenjene površine	SLABO – Zelo gladke, občasno tekt. zglijane površine s kompaktnimi plaščji/zapolnitvami z oglatimi delci	ZELO SLABO – zelo gladke, tekt. zglijane/močno prep. površine z melkimi glinenimi plaščji ali zapolnitvami
STRUKTURA IN SESTAVA			80	I	II	N/A	N/A
<p>TIP I. Tekt. nepoškodovan, debelo do srednje debelo plastnat peščenjak z občasnimi tanjšimi meljevca. Pri plitvih predorih ali brežinah, kjer so slabe omejitve, ima porušitev kinematske značilnosti, kontrolirane s plastnatostjo, zato je določitev GSI brez pomena.</p> <p>TIP II. Tekt. nepoškodovan masivni meljavec (plastnatost je neopazna) z občasnimi v mesnimi tanjšimi plastmi peščenjaka.</p> <p>TIP III. Srednje močno tekt. poškodovan peščenjak z v mesnimi tanjšimi polami meljevca.</p> <p>TIP IV. Srednje močno tekt. poškodovana hribina s plastmi peščenjaka in meljevca v podobnih razmerjih.</p> <p>TIP V. Srednje močno tekt. poškodovan meljavec z v mesnimi plastmi peščenjaka.</p> <p>TIP VI. Srednje močno tekt. poškodovan meljavec z redkimi v mesnimi plastmi peščenjaka.</p> <p>TIP VII. Močno tekt. poškodovana in nagubana hribina z ohranjeno strukturo ter plastmi peščenjaka in meljevca v podobnih razmerjih.</p> <p>TIP VIII. Močno tekt. poškodovana in nagubana hribina z v mesnimi plastmi meljevca in peščenjaka. Struktura je ohranjena, deformacija - strig ni močna.</p> <p>TIP IX. Razpadla hribina, ki se lahko pojavlja znotraj širokih prelomnih in/ali močno preperelih con. Znotraj tega tipa se pojavlja predvsem zdrobljen material z redkimi kosi poškodovane meljevca.</p> <p>TIP X. Tektonsko poškodovan ter intenzivno naguban/prett meljavec ali skrilavi glinavec z zlomljenimi in deformiranimi plastmi peščenjaka, ki ustvarijo skoraj kaotično strukturo.</p> <p>TIP XI. Tektonsko močno pregnet meljavec ali skrilavi glinavec, ki ustvari kaotično strukturo z žepi gline. Tanke plasti peščenjaka so spremenjene v majhne kose. Na koncu je obnašanje podobno zemljini.</p>			70	III	IV	V	VI
		<p>Debelina plasti peščenjaka > 50 cm</p>	60	50			N/A
			N/A	40		VII	VIII
		N/A	30		IX	X	
		N/A	N/A	20		XI	
		N/A	N/A	10		XI	
N/A		Predstavlja geološko nemogočo kombinacijo. V nesenčenih območjih je pojav takšnih hribin manj mogoč.					
		Smerni tektonski poškodovanosti in deformacije ekvivalentne litologije hribine					

3.1.3.6 RMR klasifikacija hribin

RMR (angl. *Rock Mass Rating*) klasifikacijo hribin je razvil Bieniawski (1973, 1974) na podlagi izbranih primerov iz gradbeništva. Predstavlja geomehansko klasifikacijo, s pomočjo katere lahko ocenimo lastnosti hribine (npr. deformacijski modul, vplivne faktorje pri Hoek Brownovem porušitvenem kriteriju, trdnost hribine) na obravnavanem območju (Bieniawski, 1989; Serafim in Pereira, 1983; Wood, 1991). Sistem je bil skozi leta večkrat modificiran (Bieniawski, 1976, 1989), trenutno je še vedno v uporabi različica iz leta 1989.

Pri klasifikaciji hribine s sistemom klasifikacije RMR uporabimo preglednico 3.6, na podlagi katere dodelimo vrednosti šestim parametrom, ki vplivajo na obnašanje hribine pri izkopu:

- enosno tlačno trdnost kamnine *A1*,
- vrednost RQD *A2*,
- razmike med diskontinuitetami *A3*,
- lastnosti diskontinuitet *A4*,
- razmere podzemne vode *A5*,
- orientacijo diskontinuitet glede na usmerjenost objekta *B*.

Glede na to, da se hribina lahko obnaša različno pri različnih geotehničnih posegih, je Bieniawski za posamezne posege določil negativne korekcije za primer projektiranja predora oz. rudnika, brežine ali temelja *B*. Vrednost RMR dobimo z vsoto vseh parametrov in korekcije po enačbi (3).

$$RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 - B \quad (3)$$

Glede na izračunane vrednosti RMR lahko uvrstimo hribino na obravnavanem območju v pet kategorij, od zelo slabe do zelo dobre hribine (Preglednica 3.6). Na podlagi sistema klasifikacije RMR in dobljenih vrednosti je Bieniawski (1989) podal smernice za oceno dovoljenega časa, ko lahko ostane izkopno čelo nepodprto ter za izbor ustreznih podpornih ukrepov v predorih. Smernice so odvisne od višine nadkritja (primarnih napetosti), geometrije predora ter načina izkopa. Temeljijo na meritvah podpornih ukrepov za podkvasto obliko predora z izkopnim korakom 10 m, vertikalnimi napetostmi pod 25 MPa in s konvencionalnim načinom izkopa s pomočjo miniranja (»drill and blast«).

Preglednica 3.6: Pregledna geomehanska klasifikacija RMR (Bieniawski, 1989, 54-55).

Table 3.6: Geomechanical classification RMR (Bieniawski, 1989, 54-55).

A. PARAMETRI KLASIFIKACIJE IN NJIHOVE OCENE									
PARAMETER			RAZPON VREDNOSTI						
1	Trdnost intaktnih kamnine	Indeks trdnosti pri točkovni obremenitvi	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa			
		Enoosna tlačna trdnost	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
Vrednost			15	12	7	4	2	1	0
2	Kvaliteta vrtnanja na jedro RQD		90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25%		
	Vrednost		20	17	13	8	3		
3	Razdalja med razpokami		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Vrednost		20	15	10	8	5		
4	Stanje razpok (glej E)		Zelo hrapave razpoke; Nevezne stene se stikajo; Nepreperete stene kamnine	Rahlo hrapave površine; Razmik < 1 mm; Delno preperete stene	Rahlo hrapave površine; Razmik < 1 mm; Močno preperete stene	Tektonsko zglajene ploske ali Polnitev < 5 mm ali Razmik 1 - 5 mm; Zvezne razpoke	Mehko polnilo > 5 mm ali Razmik > 5 mm; Zvezne razpoke		
	Vrednost		30	25	20	10	0		
5	Podzemna voda	Dotok vode na 10 m dolžine predora (l/min)	0	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Vodni tlak na razpoko) / (Večja glavna o)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Splošni pogoji	Popolnoma suh	Vlažen	Moker	Kapljanje	Voda teče		
		Vrednost	15	10	7	4	0		
B. POPRAVKI VREDNOSTI ZA VPADNE DISKONTINUITET (Glej F)									
Vpliv vpada diskontinuitet			Zelo ugoden	Ugoden	Zmeren	Neugoden	Zelo neugoden		
Vrednosti	Predori in rudniki		0	-2	-5	-10	-12		
	Temelji		0	-2	-7	-15	-25		
	Brežine		0	-5	-25	-50			
C. RAZDREDI HRIBINE NA PODLAGI VSEH VREDNOSTI									
Vrednost			100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21		
Razred			I	II	III	IV	V		
Opis			Zelo dobra hribina	Dobra hribina	Zadovoljiva hribina	Slaba hribina	Zelo slaba hribina		
D. POMENI HRIBINSKIH RAZREDOV									
Razred			I	II	III	IV	V		
Poprečni čas stojnosti stene			20 let za 15 m razpona	1 leto za 10 m razpona	1 teden za 5 m razpona	10 ur za 2.5 m razpona	30 min za 1 m razpona		
Kohezija hribine (kPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Trenjski kot hribine (stopinja)			> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15		
E. SMERNICE VPLIVA VPADA DISKONTINUITET V PREDORIH**									
1	Dolžina diskontinuitet (raztezanje)		< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
	Vrednost		6	4	2	1	0		
2	Razmik (Odrptost)		0	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
	Vrednost		6	5	4	1	0		
3	Hrapavost		Zelo hrapav	Hrapav	Rahlo hrapav	Gladek	Tektonsko zglajen		
	Vrednost		6	5	3	1	0		
4	Ponitev		Brez	Trdna polnitev < 5 mm	Trdna polnitev > 5 mm	Mehka polnitev < 5 mm	Mehka polnitev > 5 mm		
	Vrednost		6	4	2	2	0		
5	Preperelost		Nepreperelo	Rahlo preperelo	Zmerno preperelo	Močno preperelo	Preperina		
	Vrednost		6	5	3	1	0		
F. VPLIV VPADA DISKONTINUITET V PREDORIH									
Slemenitev pravokotna na predorsko os					Slemenitev vzporedna predorski osi				
Vpad v smeri napredovanja Vpad 45 - 90°			Vpad v smeri napredovanja Vpad 20 - 45°		Vpad 45 - 90°		Vpad 20 - 45°		
Zelo ugodno			Ugodno		Zelo neugodno		Zmerno		
Vpad proti smeri napredovanja Vpad 45 - 90°			Vpad proti smeri napredovanja Vpad 20 - 45°		Vpad 0 - 20° - Vpad neodvisen od slemenitve				
Zmerno			Neugodno		Zmerno				
RMR=A1+A2+A3+A4+A5-B**									
A3* ... E1+E2+E3+E4+E5				B** ... Pri predorih se upošteva vpliv vpada diskontinuitet (točka F); prirejeno po Wickham et al. (1972)					
*** ... Nekateri pogoji se med seboj izključujejo. V primeru prisotnosti zapolnitve, bo hrapavost zasenčil vpliv tektonskega zdroba. V tem primeru se uporablja neposredno A4.									

3.1.4 Karakterizacija heterogenih hribin

Pri določevanju parametrov, ki so osnova za klasifikacijo, morajo biti le-ti enostavno določljivi tako iz površinskih izdankov kot jeder vrtin, med izgradnjo predora pa mora biti enostavno tudi njihovo opazovanje oziroma monitoring. Pri klasifikaciji hribin lahko v praksi uporabimo dva pristopa, in sicer ovrednotenje hribine na podlagi parametrov, ki jih izbrana klasifikacija upošteva ter natančna karakterizacija hribine, kateri naknadno dodamo parametre ocene. Inženirski geologi določajo hribinske tipe pri projektiranju geotehničnih objektov predvsem s pomočjo drugega pristopa. Na podlagi določenih hribinskih tipov se le-tem nato podajo vrednosti glede na izbrane sisteme klasifikacij hribine. V procesu karakterizacije hribine sta se najbolj uveljavila sistema klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989) in Q (Barton et al., 1974) ter orodje za oceno trdnosti hribine GSI (Marinos in Hoek, 2000), ki so uveljavljeni tudi v Sloveniji.

Sistema klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989) in Q (Barton et al., 1974) vključujeta podobne geološke, geometrijske in projektne parametre. Kot rezultat podata oba sistema kvantitativne vrednosti kvalitete hribine, na podlagi katerih lahko nadalje ocenimo lastnosti hribine in potrebne podporne ukrepe. Pri vrednotenju pripisujemo podobnim parametrom različne uteži, zato je izbor različen in sistema nista povsem primerljiva. Posledično so smernice za projektiranje vgradnje podpornih ukrepov na podlagi RMR klasifikacije bolj konzervativne, tako da so pri enakih razredih kvalitete hribine priporočeni obsežnejši podporni ukrepi (npr. skrajšanje izkopnega koraka, izkop čela v več fazah, ipd.). Glede na analize obeh sistemov klasifikacij v primerljivih razredih hribine, je Bieniawski (1976) podal korelacijo med njima.

Po tem, ko so oba sistema klasifikacije uporabljali že dlje časa, so različni avtorji začeli poudarjati njune pomanjkljivosti in zanesljivosti, saj nepopolno določata značilnosti šibkih in stratificiranih hribin (Fookes, 1997; Ranasooriya, 2009; Ünal, 1996). Pomanjkljivosti so se izkazale predvsem v primeru heterogenih hribin (Marinos in Hoek, 2001; Marinos et al., 2005; Nourani et al., 2017; Read et al., 2000), šibkih in zelo šibkih hribin (Osgoui et al., 2010) ter v primeru zakraselih karbonatnih kamnin (Andriani in Parise, 2015, 2017). Na podlagi pomanjkljivosti klasifikacij za določitev geotehničnega obnašanja heterogenih hribin, so jih nekateri avtorji poskusili nadgraditi. Popiolek et al. (1993) je za karakterizacijo podzemnih izkopov v brečastih flišnih kamninah Karpatov predstavil geotehnično klasifikacijo flišnih hribin (KF), ki je temeljila na RMR klasifikaciji. V sklopu karakterizacije šibkih, stratificiranih, anizotropnih in zaglinjenih hribin je Ünal (1996) prilagodil RMR klasifikacijo (M-RMR). Morales et al. (2004) pa je geomehansko klasifikacijo flišnih hribin SV Španije predstavil kot funkcijo geomehanskih indeksov GSI in RMR.

Karakterizacija heterogene hribine je še posebej pomembna pri projektiranju geotehničnih objektov, kot so predori in pri urejanje brežin, saj na geotehnično obnašanje hribin vplivata menjavanje trdnih in mehkih kamnin ter strukturne značilnosti. Žal pa se inženirski geolog pri terenskem delu srečuje s težavami omejenega ali oddaljenega dostopa do površinskih izdankov in izkopnih čel, z omejenim časom za zbiranje podatkov in posledično s premajhnim številom meritev za statistično analizo, kar vodi do subjektivnega geološkega popisa. Slabosti uveljavljenega ročnega geološkega popisa izdankov in izkopnih čel so izrazitejše pri geotehničnih objektih, umeščeni v heterogenih hribinah, kot je fliš, ki se pojavlja predvsem v zahodnem delu Slovenije.

V doktorski disertaciji sem želela na podlagi uporabe bližnjleslikovne fotogrametrije in terestričnega laserskega skeniranja predstaviti in poenostaviti postopek za karakterizacijo inženirsko geoloških lastnosti fliša, značilnih za JZ Slovenijo. S pomočjo terestričnega laserskega skeniranja (TLS) sem natančneje določila delež posameznih litoloških enot, ki sestavljajo heterogeno hribino, medtem ko sem s kombinacijo TLS in bližnjleslikovne fotogrametrije želela omejiti litološke člene ter obenem pridobiti podatke o lastnostih diskontinuitet. Kot je bilo že v prejšnjih poglavjih predstavljeno, sta tako delež posameznih litoloških enot, kot tudi lastnosti diskontinuitet pomembni pri ugotavljanju inženirsko geoloških lastnosti in geotehničnega obnašanja heterogenih hribin pri umeščanju konstrukcij v okolje, ki ga gradijo. Na slikah 3.4 in 3.5 sta predstavljena izkopna čela v flišu, in sicer v flišu s prevladujočim deležem laporovca (Slika 3.5) ter flišu s podobnim razmerjem laporovca in peščenjaka, pri čemer prevladujejo plasti peščenjaka v kroni izkopnega čela (Slika 3.6). Razvidno je, da se hribina ob izkopu različno obnaša v odvisnosti od deleža laporovca in peščenjaka, zato so potrebni različni podporni ukrepi. Pri določanju le-teh se projektanti opirajo tudi na klasifikacijo hribine. V Sloveniji se je tako pri inženirskih geologih kot projektantih, bolj uveljavil sistem RMR. Ne glede na pomanjkljivosti pri klasifikaciji heterogenih hribin, omogoča uporabo uteženega povprečja glede na delež posamezne litološke enote. Pri vrednotenju parametrov sistema klasifikacije RMR, ki se navezujejo na lastnosti diskontinuitet, so kategorije podobne priporočilom ISRM (Barton, 1978) in standardu SIST EN ISO 14689-1:2004, kar je še dodatno pripomoglo k izbiri sistema klasifikacije RMR pri vrednotenju rezultatov iz TLS in bližnjleslikovne fotogrametrije. Na podlagi pomanjkljivosti uporabe večine sistemov klasifikacije v heterogenih hribinah, sem se odločila preveriti uporabo sistema RMR (Bieniawski, 1989) pri klasifikaciji fliša. Izračun vrednosti RMR sem izvedla na podatkih, zajetih z bližnjleslikovno fotogrametrijo in terestričnim skenerjem, ki omogočata zajem izkopnih čel in izdankov iz tal ter jih primerjala z izračunanimi vrednostmi iz ročnih geoloških popisov. Uporabljeni tehnologiji terestričnega daljinskega zaznavanja sta predstavljeni v nadaljevanju.



Slika 3.5: Izkopno čelo v flišu (predor Markovec, Koper); določena vrednost RMR: 50 (zadovoljiva hribina), GSI: 43-47 (V).

Figure 3.5: Excavated face in flysch (Markovec tunnel, Koper); defined RMR value: 50 (fair rock mass), GSI: 43-47 (V).



Slika 3.6: Izkopno čelo v flišu (predor Markovec, Koper); določena vrednost RMR: 38-44 (slaba do zadovoljiva hribina), GSI: 37-43 (IV).

Figure 3.6: Excavated face in flysch (Markovec tunnel, Koper); defined RMR value: 38-44 (weak to fair rock mass), GSI: 37-43 (IV).

3.2 Bližnjleslikovna fotogrametrija

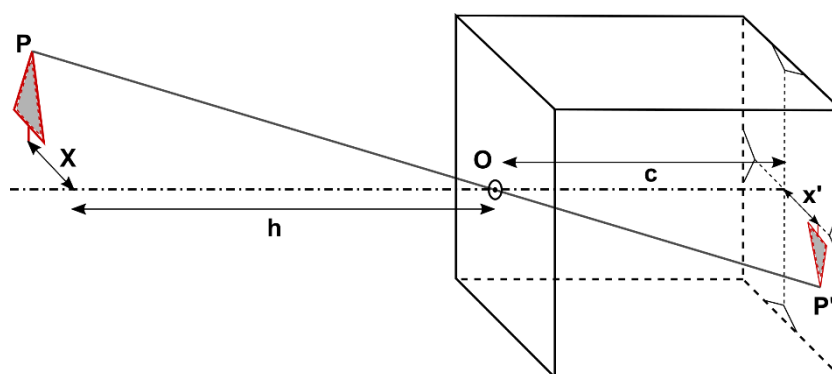
Fotogrametrija predstavlja tehnologijo zajemanja in določanja lokacije, orientacije, oblike in velikosti objektov v prostoru iz fotografij (Kraus, 2007). Podlaga za znanost in tehnologijo fotogrametrije je sposobnost človekovega zaznavanja globine, ki je posledica razmika perspektivnih središč med levim in desnim očesom. S pomočjo fotogrametrije želimo prostorsko rekonstruirati izbrani objekt. Pri tem so pomembne tako prostorske koordinate in geometrijski elementi, kot tudi grafični elementi, kot so fotografije in karte (Luhmann et al., 2014). Začetki fotogrametrije segajo v čas kmalu za izumom fotografije v začetku 19. stoletja, ko sta tako Aimé Laussedat, kot kasneje Albrecht Meydenbauer, fotografije uporabila za kartiranje (prvi za izdelavo vojaških kart, drugi za izdelavo arhitekturnih načrtov) (Kraus, 2007).

Fotogrametrijo delimo glede na položaj fotoaparata med fotografiranjem na aero- in terestrično fotogrametrijo. Pri aerofotogrametriji (angl. *aerial photogrammetry*) je fotoaparat nameščen na letalu in fotografira med letenjem vertikalno navzdol, pri čemer se morajo fotografski posnetki delno prekrivati. Aerofotogrametrija je pomembna predvsem pri izdelavi topografskih kart in beleženju sprememb na površini. V tem primeru govorimo o topografski fotogrametriji. Pri terestrični fotogrametriji se fotografiranje izvaja iz tal. Aplikacije so zelo raznolike, npr. inženirske naloge (merjenje premikov, deformacij), beleženju arheoloških najdišč, izdelava arhitekturnih načrtov in modelov, kartiranje geoloških značilnosti površja ipd. Ker se fotografira običajno od blizu, se uporablja termin bližnjleslikovna fotogrametrija (angl. *close-range photogrammetry*). Glede na uporabljeno tehnologijo zajemanja fotografij in obdelave delimo fotogrametrijo tudi na analogno, analitično in digitalno fotogrametrijo. Pri analogni fotogrametriji uporabimo konvencionalne fotografije, obdelujemo pa jih z optično mehanskimi instrumenti. Fotografije obdelujemo in nadalje analiziramo z računalniškimi programi pri analitični fotogrametriji. Z razvojem digitalnih fotoaparatorov se je uveljavila digitalna fotogrametrija, kjer se svetloba, ki potuje skozi zaslonko objektivu, beleži z elektronskimi detektorji. Pri digitalni fotogrametriji poteka celoten postopek s pomočjo računalnikov, pri čemer vključuje prvine računalniškega vida (Kraus, 2007).

Fotografija predstavlja pri fotogrametriji osnovo za izdelavo fotogrametričnega modela. Za dosego zahtevane končne natančnosti je zato pomembno merilo fotografije (Slika 3.7), katerega izračunamo na podlagi razmerja (enačba 4) med oddaljenostjo od objekta (h) ter konstanto fotoaparata (c), ki določa razdaljo med ravnino slike in perspektivnim centrom O (Luhmann et al., 2014).

$$m = \frac{h}{c} = \frac{X}{x'} \quad (4)$$

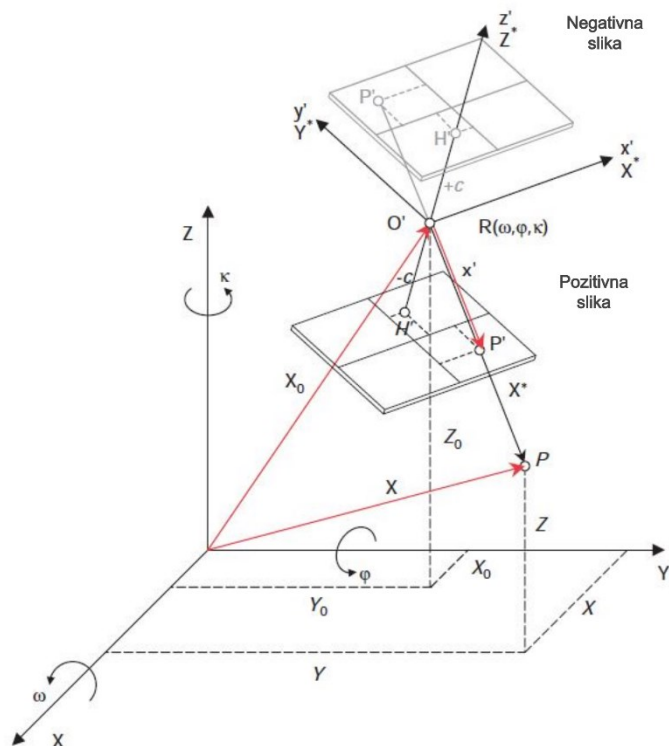
Merilo slike je eden izmed ključnih parametrov v fotogrametriji, na podlagi katerega lahko ločimo podrobnosti slike ter natančnost fotogrametričnih meritev, glede na to, da se vsaka merska napaka na sliki pomnoži v objektivnem prostoru s faktorjem merila (Luhmann et al., 2014). Na podlagi poznavanja lastnosti uporabljenega fotoaparata za zajem podatkov v fotogrametriji, lahko za doseg izbrane natančnosti fotogrametričnega modela, predhodno izračunamo zahtevano oddaljenost od objekta ter velikost snemalne baze.



Slika 3.7: Izračun modula merila fotografije (prirejeno po Luhmann et al., 2014, str. 8).

Figure 3.7: Calculation of the image scale (modified after Luhmann et al., 2014, pp. 8).

Za določitev položaja in rekonstrukcijo oblike obravnavanega objekta iz fotografije moramo poznati geometrijo sistema, ki ustvari sliko. Velja, da ima vsaka točka na obravnavani sliki objekta tudi identično točko na realnem objektu oziroma elementu v naravi (objektni koordinatni sistem), točki pa povezuje žarek (Slika 3.8). Slikovne koordinate so lahko izmerjene tako na analogni sliki kot na digitalni sliki. Pri vseh metodah fotogrametrije velja, da temelji razmerje med slikovno informacijo in geometrijo objekta na parametrih zunanje in notranje orientacije (Kraus, 2007; Luhmann et al., 2014). Zunanja orientacija predstavlja parametre, s katerimi opišemo prostorski položaj in orientacijo fotoaparata med fotografiranjem (odnos med slikovnim in objektivnim koordinatnim sistemom). Zunanjo orientacijo opiše naslednjih šestih parametrov (Slika 3.8): tri koordinate perspektivnega centra $O'(X_0, Y_0, Z_0)$ in trije zasuki slikovnega koordinatnega sistema glede na objektni koordinatni sistem (ω, φ, κ). Slikovni koordinatni sistem vzpostavimo s parametri notranje orientacije, ki jih predstavljajo koordinate glavne točke avtokolimacije $H(x_0, y_0)$ in goriščna razdalja c . Parametre notranje orientacije določimo s postopkom kalibracije fotoaparata (Luhmann et al., 2014).



Slika 3.8: Skica centralne projekcije s predstavitvijo zunanje orientacije in projekcije slike: O' – projekcijski center (X_0, Y_0, Z_0) , c – goriščna razdalja oziroma konstanta kamere, H' – glavna točka posnetka (x_0, y_0) , P – točka objekta v naravi (X, Y, Z) , P' – točka objekta na sliki (x', y') , R – rotacijska matrika $(\omega, \varphi, \kappa)$; (prirejeno po Luhmann et al., 2014, str. 258).

Figure 3.8: Presentation of central projection with exterior orientation and projective imaging: O' – perspective centre (X_0, Y_0, Z_0) , c – principal distance, also referred as camera constant, H' – principal point with coordinates (x_0, y_0) , P – point of the object in nature (X, Y, Z) , P' – point of the object on image (x', y') , R – rotation matrix $(\omega, \varphi, \kappa)$; (modified after Luhmann et al., 2014, pp. 258).

Preslikava objekta z objektnimi koordinatami točke P v slikovni koordinatni sistem točke P' , temelji na osnovni enačbi centralne projekcije (5), ki izhaja iz zakonov opisne geometrije, in je predstavljena na sliki 3.8:

$$x' = x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x' \quad (5)$$

$$y' = y_0 - c \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y'$$

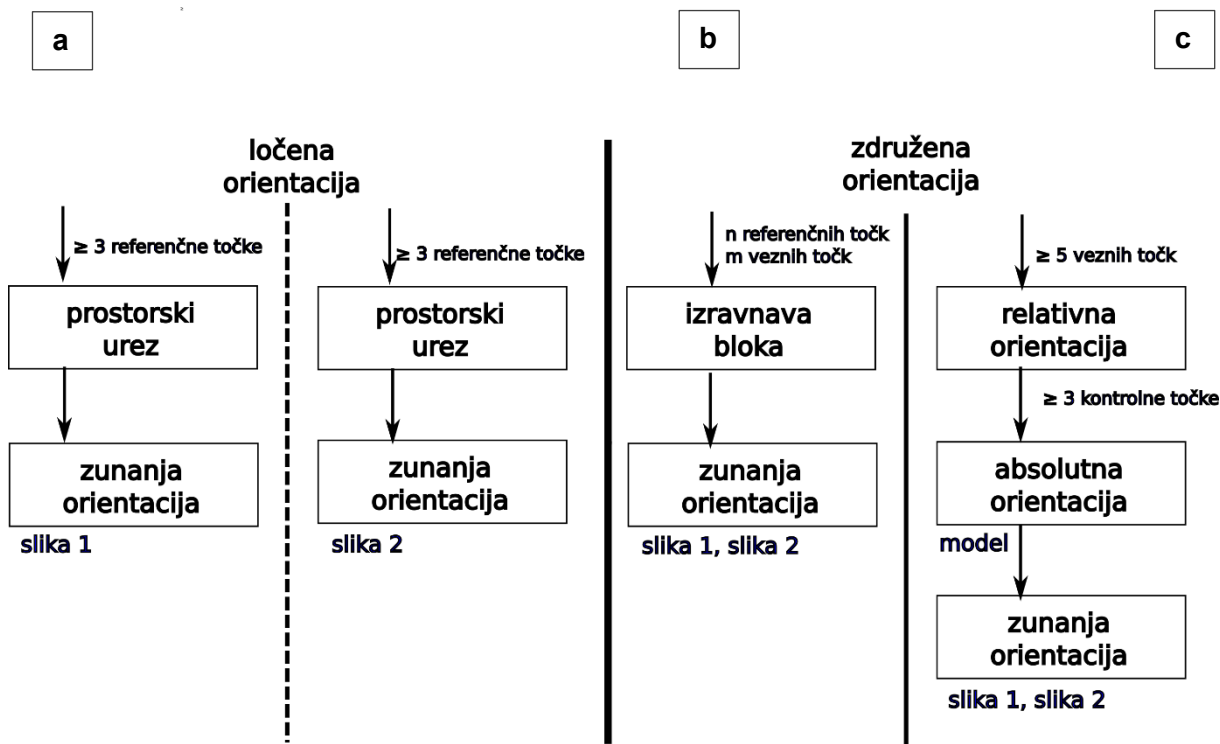
Izhodišče slikovnega koordinatnega sistema opišemo z vektorjem \mathbf{X}_0 , ki poteka od izhodišča objektnega koordinatnega sistema do projekcijskega centra O' . Rotacijska matrika \mathbf{R} določa prostorsko kotno orientacijo, in sicer na podlagi neodvisnih rotacij ω , φ , κ okoli osi X , Y , Z . Smer iz projekcijskega centra O' v točko P pretvorimo na osnovi parametrov zunanje

orientacije v prostorsko orientiran žarek iz projekcijskega centra do točke objekta P (Luhmann et al., 2014).

Po Luhmann et al. (2014, str. 293) lahko izračunamo parametre zunanje orientacije z različnimi metodami, predstavljenimi na sliki 3.9:

- ločeno za posamezno fotografijo z metodo notranjega ureza, pri čemer poznamo točen položaj oslonilnih točk v slikovnem in objektnem koordinatnem sistemu (Slika 3.9 a),
- enostopenjsko, s postopkom izravnave bloka obeh fotografij, in sicer s sočasnim določanjem elementov z uporabo slikovnih koordinat oslonilnih in veznih točk (Slika 3.9 b) ter
- dvostopenjsko za stereopar, kjer najprej določamo relativno in nato absolutno orientacijo (Slika 3.9 c).

Na podlagi števila fotografij, ki v fotogrametrični obdelavi predstavljajo osnovno enoto obravnave, ločimo: enoslikovno fotogrametrijo, stereofotogrametrijo, pri kateri temelji obdelava na paru fotografij, in večslikovno fotogrametrijo. Dokaj novo področje, ki se je razvilo v zadnjih letih, je SfM fotogrametrija (angl. *SfM - Structure from Motion photogrammetry*), pri kateri obdelujemo večje število fotografij naenkrat, ima pa nekoliko drugačne korake obdelave, kot so pri tradicionalnih fotogrametričnih metodah, zato jo obravnavamo ločeno. Stereofotogrametrijo in SfM fotogrametrijo smo uporabili v postopkih doktorske disertacije, zato sta podrobneje predstavljeni v poglavjih 3.2.1 in 3.2.2.



Slika 3.9: Metode za izračun parametrov zunanje orientacije (po Luhmann et al., 2014, str. 293). Krajši opis metod je predstavljen v besedilu.

Figure 3.9: Methods for calculating parameters for external orientation (after Luhmann et al., 2014, pp. 293). A short presentation of methods is in the text.

Eden izmed glavnih nalog inženirskega geologa na terenu je geološko kartiranje, v sklopu katerega popisuje izdanke hribine na površini in izkopna čela v predorogradnji in kamnolomih. Poleg litološke sestave opiše na izdanku strukturne značilnosti, kot na primer plastnatost in razpokanost ter tektonska poškodovanost, na podlagi katerih lahko oceni obnašanje hribine in njeno stabilnost pri gradbenih posegih oziroma izkopih. Izdanki predstavljajo navpične stene, zato je varna ročna izmera struktur omejena na predel pri tleh. Podatki zračnega daljinskega zaznavanja so sicer pomembni pri geološki interpretaciji morfologije površja, vendar inženirskemu geologu ne podajo informacij o navpičnih stenah. Napredek pri razvoju digitalnega terestričnega daljinskega zaznavanja se uveljavlja tudi na področju inženirske geologije. Pri geološkem kartiranju in geološki spremljavi izkopnih del se posebno pozornost namenja bližnjeliskovni fotogrametriji, s pomočjo katere dobimo fotogrametrične 3D modele površinskih izdankov in izkopnih čel s pomočjo digitalnega fotoaparata. Rekonstrukcija 3D modela se izvaja tako s stereofotogrametrijo, kot tudi SfM fotogrametrijo, ki sta predstavljeni v nadaljevanju.

3.2.1 Stereofotogrametrija

Stereofotogrametrija opisuje vizualno ali digitalno obdelavo para fotografij. Temelji na osnovi stereoskopskega opazovanja, oziroma človekovi zmožnosti globinskega zaznavanja. Uporabljamo jo predvsem v sklopu meritev elementov v naravi, za katere je značilna neravna površina. Na področju geologije in inženirske geologije smo stereofotogrametrijo uporabljali predvsem v začetni fazi zajema geoloških podatkov, pri čemer smo pregledovali pare zračnih posnetkov, posnetih s 60 % prekrivanjem vzdolž smeri leta. Iz analize stereoskopskih parov posnetkov smo lahko sklepali na geološke pogoje obravnavanega območja. Z dostopnostjo digitalnega modela reliefa, izdelanega iz lidarskih podatkov, ter računalniških programov za pregledovanje 3D površja, je analizo površja možno narediti iz digitalnih podatkov. Bližnjelikovna fotogrametrija pa je še vedno primerna in uporabna za geološko kartiranje in analizo površinskih izdankov ter izkopnih čel.

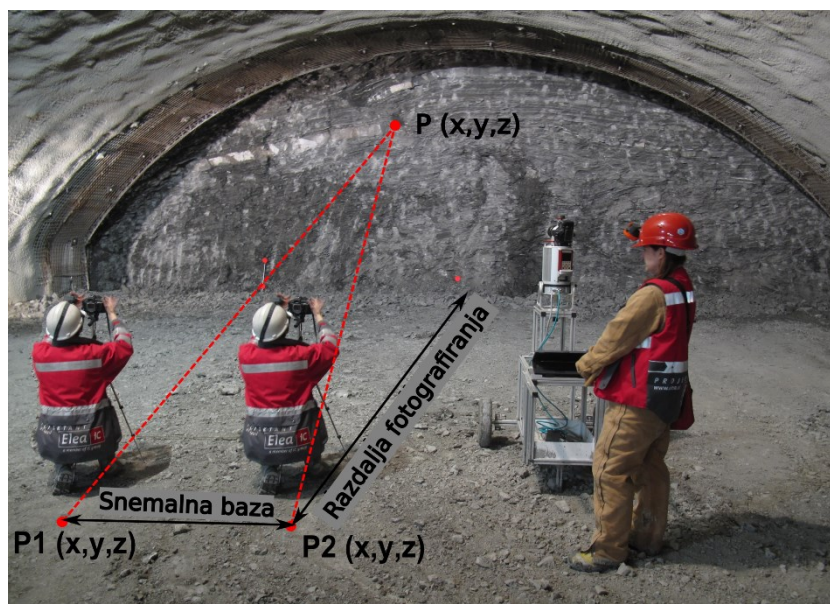
3.2.1.1 Metode zajema in registracije podatkov v stereofotogrametriji

Pri stereofotogrametriji predstavljata dve fotografiji istega objekta v naravi (stereopar), fotografirani iz dveh perspektivno različnih stojišč, osnovni pogoj za prostorsko izmero tega objekta (Luhmann et al., 2014). S pomočjo človekovega zaznavanja globine lahko pri sočasnem opazovanju obeh fotografij iz določene razdalje vidimo prostorski virtualni model fotografiranega objekta. Pri pripravi prostorskega modela, namenjenega stereoskopskemu opazovanju, moramo kljub temu upoštevati določena razmerja, značilna za geometrijo stereopara (Gorjup, 2001).

3.2.1.1.1 Zajem podatkov

Pri zajemu podatkov s stereofotogrametrijo moramo upoštevati, da predstavljata stereopar dve fotografiji, z najmanj 50% prekrivanjem (Slika 3.10). Za nadaljnjo rekonstrukcijo prostorskega modela na podlagi stereopara je potrebno izmeriti paralakso posnetka v smeri x in y. Pri paralaksi x je fotografija zamaknjena v smeri x, torej v bočni smeri fotografiranja in jo zato lažje popravimo s približevanjem ali oddaljevanjem fotografij. V primeru paralakse y pa je fotografija bodisi bližje ali dlje od obravnavanega objekta v naravi (Luhmann et al., 2014), kar vpliva na izračun centralne projekcije. V kolikor se fotografiji vsaj 50% prekrivata in sta fotografirani vzporedno, se posledično tudi enačbe za izračun parametrov centralne projekcije poenostavijo. Ocena natančnosti objektnih koordinat v smeri pogleda predstavlja funkcijo, ki je odvisna od natančnosti izmere paralakse, velikosti slike (razmerja med razdaljo do objekta in goriščno razdaljo) ter razmerja med razdaljo do objekta in snemalno bazo. Glede na to, da

sta snemalna baza in goriščna razdalja konstantni za vsak sklop meritev, pada natančnost izračunanih koordinat s kvadratom razdalje, razmerje med njima pa opisuje geometrijo presečišča. Natančnost koordinat v smeri pogleda je posledično slaba, če je snemalna baza premajhna glede na razdaljo do objekta (Luhmann et al., 2014).



Slika 3.10: Zajem dveh fotografij izkopnega čela predora za izdelavo stereopara.

Figure 3.10: Acquisition of two tunnel face photographs for creating a stereo pair.

Stereofotogrametrija deluje po principu človekovega zaznavanja globine z omejenim konvergenčnim kotom, zato moramo podatke zajeti na način, da bosta fotografiji stereopara posneti s čim bolj vzporednimi snemalnimi osmi (Luhmann et al., 2014), kot prikazuje slika 3.9. Zajem podatkov pri bližnjleslikovni fotogrametriji se izvaja s fotoaparatom. Rekonstrukcija objekta iz fotografij poteka na podlagi matematičnih izračunov in znanih parametrov notranje in zunanje orientacije. Notranja orientacija fotoaparata matematično opiše slikovni model znotraj fotoaparata (Luhmann et al., 2014). Parametri notranje orientacije fotoaparata določajo položaj projekcijskega centra glede na sliko, goriščno razdaljo objektiva in položaj glavne točke, s katero definiramo izhodišče slikovnega koordinatnega sistema (Luhmann et al., 2014). Vključujejo tudi podatke o optični distorziji (radialni, centrični in tangencialni). Elementi notranje orientacije se pri fotoaparatu določijo s postopkom kalibracije. Fotoaparate s kalibrirano notranjo orientacijo imenujemo merske fotoaparate, vendar se z razvojem digitalnih fotoaparatorov uveljavljajo tudi nemerski fotoaparati. Pri bližnjleslikovni fotogrametriji se uporabljajo digitalni fotoaparati predvsem za meritve z manjšimi zahtevami natančnosti, za razliko od digitalnih zrcalno refleksnih fotoaparatorov, ki v primeru visoko kvalitetnih objektivov ter z ustrežno kalibracijo, omogočajo meritve visoke natančnosti (Luhmann et al., 2014).

Pri zajemu podatkov s stereofotogrametrijo je zelo pomembno, da dosežemo zahtevano natančnost. Približno natančnost objektnih koordinat ocenimo iz razmerij med natančnostjo meritev slikovnih koordinat, velikosti fotografije in geometrijske razporeditve fotografiranja (Luhmann et al., 2014). Natančnost meritev slikovnih koordinat je odvisna od tehničnih značilnosti fotoaparata, kot sta stabilnost njegovih notranjih parametrov in metode kalibracije, ter natančnosti sistema za obdelavo fotografij, ki je odvisna od kakovosti prepoznavanja tarč na fotografijah, algoritmov meritev in natančnosti instrumenta, odvisna pa je tudi od zmožnosti lociranja iz prepoznavanja in izmere tarč (Luhmann et al., 2014).

V sklopu fotografiranja s stereofotogrametrijo, so za rekonstrukcijo prostorskega modela pomembne oslonilne točke, ki predstavljajo izmerjene točke na fotografijah stereopara, pri čemer ni pomembno, da so obenem tudi referenčne točke, ki so skupne na obeh fotografijah stereopara.

Vsi predstavljeni elementi zajema podatkov morajo biti pri stereofotogrametriji skrbno izbrani, saj vsak posebej in vsi skupaj prispevajo k dobro izdelanemu in natančnemu prostorskemu modelu obravnavanega objekta oziroma območja, zato moramo biti pozorni na napake, ki vplivajo na kakovost modela.

3.2.1.1.2 Izvor napak

Na kakovost podatkov, zajetih s stereofotogrametrijo, vplivajo tako lastnosti uporabljenih instrumentov, kot tudi postopek fotografiranja. Na podlagi izmerjenih podatkov oslonilnih točk določimo relativno orientacijo in nadalje absolutno orientacijo prostorskega modela.

Za uspešno rekonstrukcijo prostorskega modela je pomembno razmerje med snemalno bazo in razdaljo do objekta oziroma obravnavanega območja. V primeru, da je snemalna baza predolga, lahko pride do težav pri stereoskopskem opazovanju, če pa je snemalna baza prekratka, privede do večjih elips pogreškov, kar povzroči napačno lokacijo točke na modelu. Obravnavan objekt ne sme biti fotografiran pod kotom, ki je manjši od 20° , v primeru uporabe odsevnih tarč pa ne sme biti manjši od 45° . Optimalen kot med stojiščema glede na objekt znaša 90° (Luhmann et al., 2014).

Izbor uporabljene fotografske opreme pomembno vpliva na kakovost meritev, pri čemer je za stereofotogrametrijo priporočljivo, da se v primeru uporabe nemerskega fotoaparata le-tega predhodno kalibrira. Na podlagi podatkov kalibracije lahko natančno določimo notranjo

orientacijo, ki je pomembna za vzpostavitev slikovnega koordinatnega sistema. Pri fotografiranju je pomembna tudi kakovost in ustrezna osvetljenost fotografij.

Na kakovost relativne orientacije vpliva tudi natančnost slikovnih koordinat, ki so delno odvisne od natančnosti meritev instrumenta, delno pa od zmožnosti prepoznavanja veznih točk na obeh fotografijah (Luhmann et al., 2014).

Napake pri rekonstrukciji prostorskega modela so lahko posledica nezadostnega števila in razporeditve oslonilnih točk, ki jih namestimo na objektu in so bistvenega pomena pri georeferenciranju. Za oslonilne točke je pomembno, da so enakomerno porazdeljene po območju obravnave, torej pokrivajo objekte v objektnem in slikovnem koordinatnem sistemu, paziti pa moramo, da ne pride do pojava t.i. nevarnega valja, kjer ležijo oslonilne točke in projekcijski centri obeh fotografij na skupni površini valja (Luhmann et al., 2014). Oslonilne točke lahko predstavljajo izrazite naravne značilnosti, katere lahko prepoznamo tako v naravi, kot tudi na fotografijah, priporočljiva pa je uporaba tarč. Tarče omogočajo natančno identifikacijo in merjenje pomembnih točk na prostorskih modelih, uporabljajo se lahko kot točke za primerjalne meritve, za geodetsko izmero točk, pri samodejni identifikaciji in meritvah ter za izboljšanje natančnosti. Na izbor velikosti in vrste tarč vpliva osvetlitev ter izbranega pristopa fotografiranja. Pozorni moramo biti na izbor stojišč, smer fotografiranja ter ločljivosti fotografije (Luhmann et al., 2014). Pri stereofotogrametriji je priporočljiva uporaba tarč v obliki kroga, v katerem lahko določimo njeno središče, ter kodiranih tarč z edinstvenimi vzorci, katere računalniški program za obdelavo podatkov nato samodejno prepozna iz fotografije.

3.2.1.1.3 Načrtovanje zajema

Dober stereoskopski prostorski model je rezultat premišljenega načrtovanja zajema podatkov obravnavanega objekta ali območja. V nadaljevanju predstavljam priporočila predhodnih raziskovalcev, dopolnjena z lastnimi ugotovitvami na podlagi izvedbe meritev. Zaradi specifičnih razmer, ki so značilne in obenem različne za posamezno obravnavano območje in namen rekonstrukcije 3D modela, ne obstajajo splošna pravila glede geometrijske postavitve fotogrametričnega snemanja, slediti pa moramo priporočilom, na podlagi katerih izvedemo optimalen zajem (Luhmann et al., 2014). Pri načrtovanju izvedbe stereofotogrametrije moramo opisati namen meritev, koncept rešitve ter predstavitev rezultatov, pri čemer ne smemo pozabiti na oceno časovnice in predvidenih stroškov (Luhmann et al., 2014). Določiti moramo število in tip obravnavanih objektov, njegovo velikost, opredeliti natančnost objektnega prostora (tolerance, merilno negotovost) in na podlagi najmanjše velikosti detajlov, katere želimo analizirati, zahtevano ločljivost modela. Pri pregledu ocenimo tudi okoljske razmere, kot

na primer temperaturne razlike, vlažnost in prisotnost zunanjih vibracij, ki lahko vplivajo na postopek zajema (Luhmann et al. 2014). Na podlagi velikosti obravnavanega območja moramo preveriti in izpostaviti predele, pri katerih lahko pride zaradi postavitve fotografiranja do vrzeli.

Na terenu določimo stojišča, iz katerih predvidimo število fotografij, ustrezno razporeditev tarč in geometrijo presečišča žarkov (Luhmann et al., 2014), na podlagi katere preračunamo optimalno snemalno bazo. Tarče izberemo glede na velikost in dostopnost obravnavanega območja, pri čemer moramo paziti, da le-te niso ali premajhne ali prevelike. Izmerimo razdalje med tarčami ter prostorsko lokacijo stojišča. Nadalje določimo merilo in oslonilne točke (njihovo število in razporeditev), katere bomo uporabili pri rekonstrukciji prostorskega modela in jih, v kolikor je možno, geodetsko izmerimo (Luhmann et al., 2014).

Na podlagi uporabljene fotografske opreme moramo zagotoviti natančne in nespremenljive parametre notranje orientacije, zato je priporočljiva uporaba kalibriranih fotoaparata. Glede na možnosti, ki jih ponuja obravnavno območje, določimo postopek fotografiranja (format slike, goriščno razdaljo) ter optične parametre (globinsko ostrino, ločljivost, čas osvetlitve). Izklopiti moramo nastavitve za samodejno prilagajanje fotografiranja: odprtost zaslonke in čas osvetlitve, samodejno izostritev ter stabilizacijo fotografije tako ohišja fotoaparata, kot tudi objektiv. Postopek stabilizacije namreč vpliva na geometrijo fotografiranja z zveznim spreminjanjem notranje orientacije fotoaparata (Luhmann et al., 2014). Pri fotografiranju izkopnih čel v predoru, kjer veljajo zelo slabi pogoji osvetlitve in velike zaprašnosti, moramo zagotoviti ustrezno osvetlitev izkopnega čela in določiti optimalen čas odprtosti zaslonke.

Fotografiramo čelno glede na obravnavano območje in pazimo, da sta stojišči čim bolj vzporedni. Zajete podatke nato v pisarni pregledamo ter v sklopu izdelave 3D modela fotografije georeferenciramo.

3.2.1.2 Georeferenciranje

Georeferenciranje poteka preko prostorskih koordinat projekcijskega centra fotoaparata ter izmerjenih oslonilnih točk na objektu oziroma obravnavanem območju. Za izvedbo natančnega prostorskega modela je priporočljivo geodetsko izmeriti koordinate oslonilnih točk.

Pri bližnjeliskovni fotogrametriji v inženirski geologiji prilagodimo postopek georeferenciranja računalniškemu programu, katerega bomo uporabili in pri tem podrobneje proučimo zahteve glede uporabljenih tarč in samega postopka georeferenciranja.

3.2.1.3 Obdelava podatkov in izdelava 3D modela

Preden lahko rekonstruiramo 3D model iz zajetih stereoparov, jih moramo po končanem terenskem delu najprej orientirati, pri čemer moramo predhodno določiti objektni koordinatni sistem, ki opisuje prostorski koordinatni sistem (lokalni, referenčni, globalni). Postopek orientacije je odvisen od tega, ali je zunanja orientacija poznana ali ne. Namen stereofotogrametrične obdelave je, da z izračuni ponovno vzpostavimo geometrijska razmerja med fotografijami in objektnim koordinatnim sistemom, ki so veljala v času fotografiranja. V naslednjem koraku pa na podlagi slikovnih koordinat, katere smo določili glede na parametre notranje orientacije, objekt digitalno rekonstruiramo (Kraus, 2007).

Relativno orientacijo med dvema fotografijama lahko vedno vzpostavimo, ne glede na to, ali imamo dodatne informacije iz objektnega prostora. Za določitev parametrov absolutne ali zunanje orientacije pa potrebujemo določeno število oslonilnih točk, za katere izmerimo objektno in slikovne koordinate (Kraus, 2007).

Na trgu obstajajo programske rešitve, ki so namenjene rekonstrukciji 3D modela s stereofotogrametrijo ter nadaljnjim analizam diskontinuitet za področje geologije in inženirske geologije. Razvite se bile za uporabo predvsem v sklopu geološke spremljave izkopnih čel v predorogradnji in v kamnolomih. Najbolj uveljavljeni so paketi ShapeMetriX 3D, sistem stereofotoaparata Sirovision in 3DM Analyst (Birch, 2006). Pri meritvah na izbranih lokacijah sem uporabila paket za stereofotogrametrijo ShapeMetriX 3D, ki je v nadaljevanju podrobneje predstavljen.

3.2.1.3.1 ShapeMetriX 3D

Uporaba stereofotogrametrije v inženirski geologiji se je najbolj razširila s ponudbo orodja za brezkontaktni zajem geoloških podatkov ShapeMetriX 3D, ki so ga razvili v podjetju 3GSM GmbH iz Avstrije. Povod za njegov razvoj je bilo delo inženirskih geologov v sklopu geološkega kartiranja in geološke spremljave izkopov, saj dostop do hribine ni mogoč iz varnostnih razlogov. ShapeMetriX 3D omogoča merski zajem tako podatkov hribine, kot tudi površine izdanka, na podlagi katerih izdelamo merske 3D slike, katere lahko nadalje analiziramo z izmero geoloških in geotehničnih parametrov. Osnove temeljijo na raziskavah Gaich et al. (2006) in vključujejo prvine digitalne stereofotogrametrije ter računalniškega vida. Paket sestavljata enota za zajem podatkov in računalniški programski paket za združevanje fotografij, rekonstrukcijo 3D modela in analizo geoloških struktur.

Paket za zajem podatkov vključuje kalibriran digitalni zrcalno refleksni fotoaparata, set treh okroglih tarč s stativom, vključena pa je tudi tabla za kalibracijo fotoaparata. Tarči sta namenjeni registraciji in georeferenciranju 3D modela. Na levo stran izkopnega čela postavimo dve tarči, ki sta med sabo razmaknjeni za izbrano razdaljo od 1,25 m do 1,50 m, tretjo tarčo pa postavimo na desno stran izkopnega čela (Slika 3.11). Za grobo oceno odklona od severa lahko izmerimo azimut smeri iz levih tarč proti desni tarči. Za grob postopek georeferenciranja uporabimo napravo za pozicioniranje, za natančno georeferenciranje pa je priporočljivo tarče geodetsko izmeriti. Na podlagi izmerjene razdalje do izkopnega čela D (m) izračunamo dolžino snemalne baze B (m), po priporočeni enačbi (6):

$$B = \frac{D}{8} \text{ do } \frac{D}{5} \quad (6)$$

Na terenu zajamemo podatke z dvema fotografijama površinskega izdanka ali izkopnega čela, in sicer iz dveh različnih lokacij, ki sta med sabo oddaljeni za dolžino snemalne baze (Slika 3.10). Pri tem moramo paziti, da upoštevamo priporočila glede načrtovanja in izvedbe fotografiranja s stereofotogrametrijo. Pri meritvah v sklopu geološke spremljave izkopa predora, moramo poskrbeti tudi za ustrezno osvetlitev izkopnega čela ter določiti odprtost zaslonke in čas osvetlitve.

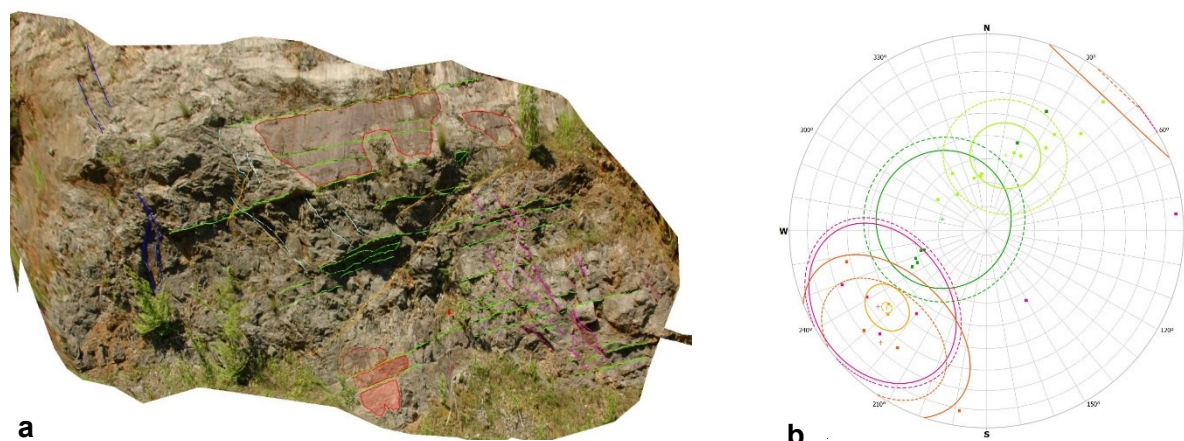


Slika 3.11: Zajem podatkov s ShapeMetriX 3D, v sklopu katerega postavimo tri tarče, iz razdalje do izkopnega čela pa izračunamo snemalno bazo.

Figure 3.11: Data acquisition using ShapeMetriX 3D, where we position three targets and based on the distance from the excavated face, we calculate the baseline.

Rezultat zajema podatkov s ShapeMetriX 3D je stereopar, katerega nato v programu SMX Reconstructor znotraj ShapeMetriX-a 3D združimo v virtualni 3D model, ki združuje geometrijo površine hribine z realno fotografijo in uporablja poseben format datoteke (jm3). Postopek združevanja poteka brez informacije o lokaciji in smeri pogleda fotoaparata v času fotografiranja. Edina zahteva v tem koraku je ta, da sta tarči na stativu postavljeni v navpični smeri, torej ena nad drugo (3G Software & Measurements GmbH, 2010). Poleg postavitve tarč in smeri med njimi, uporablja program pri združevanju kalibracijsko poročilo uporabljenega fotoaparata. Računalniški program nima prosto dostopne kode, zato podrobnejši postopki združevanja niso poznani, prav tako nanje ne moremo vplivati z vključevanjem dodatnih algoritmov.

Program JMX Analyst znotraj ShapeMetriX-a 3D je namenjen digitalnemu geološkemu popisu virtualnega izdanka oziroma merskega 3D modela. Diskontinuitete lahko določamo s pomočjo poligonov, ki predstavljajo ploskve diskontinuitet, ali z izrisom linij po robovih (Slika 3.12 a). Ko je postopek izbora geometrijskih lastnosti diskontinuitet zaključen, jih program statistično analizira in predstavi rezultate v stereografski projekciji, koder so določeni glavni sistemi diskontinuitet, skupaj z generalni vpadi (Slika 3.12 b). Poleg orientacije izračuna in predstavi gostoto ter dolžino izbranih sistemov diskontinuitet. Zaradi razmeroma enostavnega zajema in analize 3D modelov se je ShapeMetriX 3D uveljavil predvsem pri geološki spremljavi izkopov tako v predorih kot v kamnolomih.



Slika 3.12: Digitalni geološki popis izdanka v ShapeMetriX 3D: a. Rezultat geološke analize na rekonstruiranem 3D modelu izkopnega čela s ShapeMetriX 3D. Določene so bile ploskve in linije diskontinuitet, na podlagi katerih smo določili glavne sisteme diskontinuitet, njihovo orientacijo, gostoto in dolžino; b. Primer stereografske analize v ShapeMetriX 3D z določenimi sistemi diskontinuitet.

Figure 3.12: Digital geological outcrop log in ShapeMetriX 3D: a. The result of geological analysis on the reconstructed 3D model of the excavated face, using ShapeMetriX 3D. Surfaces and traces of discontinuities were extracted, based on which the main discontinuity sets, their orientation, density and persistence were determined; b. Example of the stereographic analysis in ShapeMetriX 3D with extracted discontinuity sets.

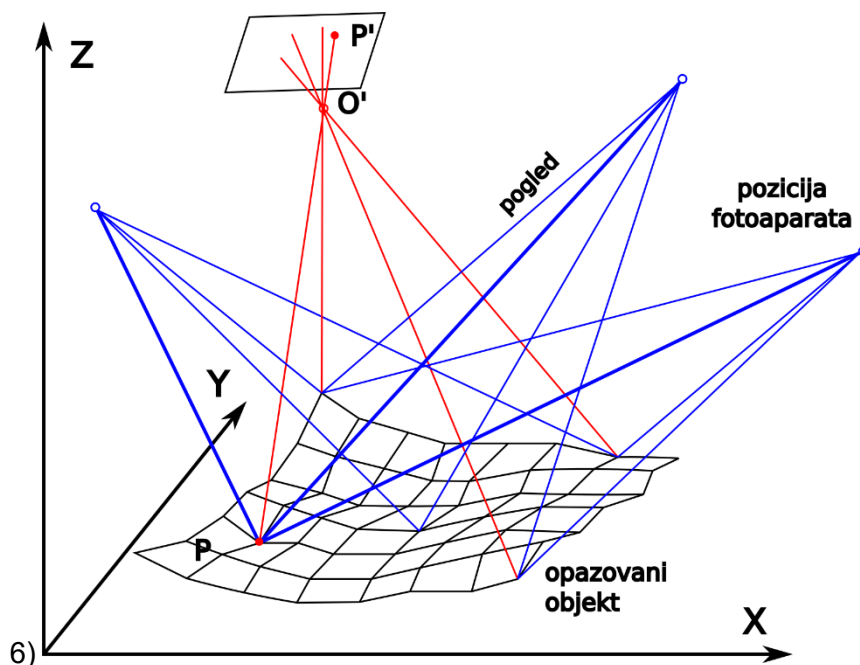
Pri meritvah sem uporabila ShapeMetriX 3D, ki je last Inštituta za aplikativno geoznanost, TU Graz (Avstrija). Uporabljen je bil digitalni zrcalno refleksni fotoaparati Nikon D70s z objektivom AF-S Nikkor 18-70 mm DX.

3.2.2 SfM fotogrametrija

Stereofotogrametrija je predstavljala vrsto let uveljavljeno tehnologijo zajemanja podatkov za rekonstrukcijo 3D modela obravnavanega objekta ali območja na področju geologije. Žal pa se je, predvsem na področju bližnjeliskovne fotogrametrije, izkazala za precej zamuden postopek, ki zahteva izredno natančno načrtovanje in izvedbo zajema podatkov za doseg visoko kakovostnega 3D modela, namenjenega nadaljnjim meritvam in analizam. Na področju inženirske geologije, kjer so meritve časovno odvisne od stabilnosti in delovne aktivnosti, je bila posledično velikokrat neizvedljiva. Z razvojem digitalnih fotoaparatorov in hitrejših postopkov zajemanja s tehnologijami terestričnega daljinskega zaznavanja pa so se odprle nove možnosti njihovega vključevanja v delovni proces inženirskega geologa, zato se tako SfM fotogrametrija v zadnjih letih uveljavlja poleg stereofotogrametrije..

SfM fotogrametrija je novejša tehnologija, ki združuje prvine fotogrametrije, računalniškega vida (angl. *computer vision*) in uveljavljenih geodetskih izmer. Prvine fotogrametrije predstavljajo algoritmi izravnave bloka posnetkov, medtem ko algoritmi računalniškega vida omogočajo samodejno prepoznavanje elementov na fotografijah. Razvoj SfM fotogrametrije

omogoča rekonstrukcijo prostorskega modela na podlagi zaporedja digitalnih fotografij, ki se medsebojno prekrivajo. Ko so fotografije posnete, izvedemo rekonstrukcijo obravnavanega objekta ali območja iz poteka fotografiranja oziroma gibanja fotoaparata.



Slika 3.13: Večslikovna fotogrametrična triangulacija bloka (prirejeno po Luhmann et al., 2014, str. 323).

Figure 3.13: Multi-image bundle triangulation (modified after Luhmann et al., 2014, pp. 323).

Izravnava bloka posnetkov (angl. *bundle block adjustment*) opisuje metodo, s pomočjo katere izravnamo večje število fotografij zaključenega območja, ki se med seboj deloma prekrivajo (Luhmann et al., 2014). Glede na to, da ima vsaka točka na objektu fotografije tudi identično točko v naravi, točki pa povezuje slikovni žarek, za vsako fotografijo dobimo snop žarkov (Slika 3.13). Vhodni podatki pri izravnavi bloka predstavljajo izmerjene slikovne koordinate veznih in oslonilnih točk ter začetne vrednosti neznanek (običajno parametrov zunanje orientacije). Za kontrolo in nepristransko oceno natančnosti izravnave se izmerijo tudi kontrolne točke (njihove objektne in slikovne koordinate), vendar ti podatki niso vključeni v izravnavo. Zaradi velikega števila fotografij v bloku je potrebna ustrezna organizacija podatkov, tako da se običajno slikovne meritve povežejo z enolično določeno številko fotografije. Algoritem nato združi posamezne fotografije preko veznih točk, ki se pojavljajo na različnih fotografijah, v enoten model, s prostorsko površino objekta (Luhmann et al., 2014). Postopek izdelave 3D modela je predstavljen v poglavju 3.2.2.3.

Ne glede na to, da omogočajo metoda SfM fotogrametrije in algoritmi, ki so združeni v tehnologiji, zajem večjega števila fotografij, je potrebno upoštevati, da se postopek rekonstrukcije 3D modela izvaja z izravnavo blokov, ki vključuje podatke fotografij in izmerjenih

oslonilnih točk. V kolikor želimo rekonstruirati natančen model, na katerem bomo lahko izvajali natančne meritve, pridobili elemente ter jih uporabljali v specializiranih analizah, moramo posebno pozornost nameniti postopku zajema podatkov, preprečevanju napak ter zahtevam za georeferenciranje.

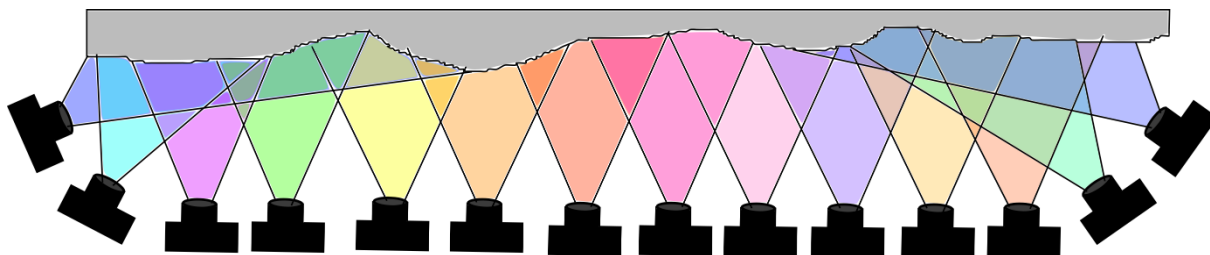
3.2.2.1 Metode zajema in registracije podatkov v SfM fotogrametriji

Za uspešen zajem podatkov s SfM fotogrametrijo moramo poznati območje in namen izvedbe meritev ter upoštevati razmerje med snemalno bazo in razdaljo do obravnavanega objekta ali območja, sledi postopek združevanja podatkov in zagotovitev podatkov za pretvorbo prostorskega modela v izbrani koordinatni sistem. Oceno natančnosti modela lahko dobimo na podlagi podatkov o velikost piksla, uporabljene goriščne razdalje in oddaljenosti od obravnavanega objekta (Piermattei, 2016).

3.2.2.1.1 Zajem podatkov

Zajem podatkov s SfM fotogrametrijo poteka podobno kot s stereofotogrametrijo, z razliko, da so v postopek rekonstrukcije obravnavanega objekta vključene tudi osnove računalniškega vida, ki pri združevanju išče enake vzorce med različnimi fotografijami. Ob snemanju so poleg kakovostnih fotografij, ki prekrivajo obravnavano območje, pomembne tudi natančno izmerjene oslonilne točke, na podlagi katerih bomo rekonstruirali natančen model.

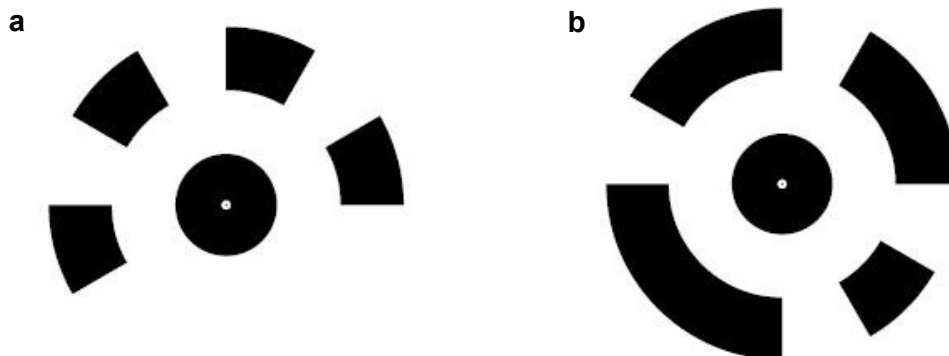
Pri zajemu moramo upoštevati geometrijo poteka fotografiranja, da ustvarimo poglede, ki se stekajo k območju interesa. Na podlagi izkušenj je priporočljiva kombinacija čelnega fotografiranja s konvergenčnim na robovih ter odsekih, ki so izbočeni in bi lahko prišlo do pomanjkanja podatkov (Slika 3.14). V primeru, da fotografiramo v več nivojih oziroma oddaljenostih, pa morajo biti koraki med posameznimi razdaljami postopni. S tem omogočimo programu, da pri združevanju fotografij prepozna enake slikovne elemente. Pri čelnem fotografiranju moramo upoštevati razmerje med razdaljo do ciljnega območja in snemalno bazo, katero lahko izračunamo na osnovi fotogrametričnih enačb in je odvisna od velikosti piksla uporabljenega fotoaparata ter goriščne razdalje. Obseg fotografije in obseg objekta sta v enakem razmerju kot razdalja do objekta in goriščna razdalja fotoaparata (Piermattei, 2016).



Slika 3.14: Priporočljiv postopek fotografiranja izdanka s SfM fotogrametrijo, ki združuje čelno fotografiranje in konvergenčno fotografiranje na robovih.

Figure 3.14: Proposed photo acquisition of the outcrop for the SfM photogrammetry, combining frontal imaging with convergent imaging on sides.

SfM fotogrametrijo običajno izvajamo z digitalnimi fotoaparati, uporabimo lahko boljše in dražje zrcalno refleksne fotoaparate, lahko tudi cenejše kompaktne fotoaparate ali pa fotografiramo z mobilnim telefonom. Fotografiramo lahko iz tal ali iz letalnika, in sicer je to odvisno predvsem od obsega in dostopnosti obravnavanega območja ter želene natančnosti modela. Glede na to, da v procesu obdelave poteka združevanje digitalnih fotografij, so poleg samih fotografij pomembni tudi tehnični podatki fotografiranja, ki so shranjeni v metapodatkih in vključujejo uporabljeni format, nastavitve fotografiranja in v primeru vgrajene naprave za pozicioniranje, tudi približne koordinate lokacije fotoaparata v času fotografiranja.



Slika 3.15: Primera kodiranih tarč (a in b) iz programa Agisoft Metashape z enako velikostjo polmera središnjega kroga ter obročem, ki je razdeljen na bele in črne segmente.

Figure 3.15: Examples of coded targets (a and b) from the software Agisoft Metashape with the central circle of the same size and ring pattern, which is divided into black and white segments.

Oslonilne točke morajo biti dobro definirane na objektu in fotografijah in so bistvene za kakovostno združevanje in georeferenciranje fotografij ter končno rekonstrukcijo objekta. Podobno kot pri stereofotogrametriji, morajo biti enakomerno porazdeljene po območju obravnave, torej pokrivajo objekte v objektnem in slikovnem koordinatnem sistemu. Glede na uporabljeni računalniški program združevanja fotografij in rekonstrukcije objekta, je priporočljiva uporaba tarč. Izberemo lahko tudi markantne naravne elemente, ki pa morajo omogočati čim bolj natančno identifikacijo na fotografijah. Tudi pri SfM fotogrametriji vplivata

na izbor velikosti in vrste tarč osvetlitev ter izbrani pristop fotografiranja. Večina računalniških programov, namenjenih SfM fotogrametriji, omogoča samodejno prepoznavanje tarč, zato se v ta namen največkrat uporabljajo kodirane tarče, ki imajo edinstvene vzorce (Slika 3.15).

Pri SfM fotogrametriji moramo razumeti napake, ki lahko nastanejo v procesu in so lahko posledica neustreznega zajemanja podatkov ali drugih razlogov in vplivajo na kakovost prostorskega modela.

3.2.2.1.2 Izvor napak

Za razliko od stereofotogrametrije, kjer moramo paziti, da sta optični osi pri fotografiranju čim bolj vzporedni, je pomembno, da pri SfM fotogrametriji izkoristimo možnost zajema večjega števila fotografij ter uporabimo ustrezen postopek fotografiranja izdanka, da lahko rekonstruiramo čim bolj natančen 3D model, vključno z nepravilnostmi, ki izstopajo iz čelnega dela izdanka (npr. bloki omejeni z razpokami, idr.). Pri čelnem fotografiranju tvegamo, da se bo v središču 3D modela pojavila radialna distorzija, ki bi vplivala na nadaljnje analize. Fotografiranje iz enega stojišča v različnih smereh ravno tako ni priporočljivo, saj algoritem za izravnavo bloka primerja in združuje bloke fotografij izbranega objekta, iz različnih stojišč. Z izbranim potekom fotografiranja moramo zagotoviti zadostno prekrivanje med fotografijami, saj je pri metodi združevanja pomembno, da je vsaka točka vidna na vsaj dveh fotografijah.

Pri SfM fotogrametriji se za oslonilne točke uporabljajo tarče, ki morajo biti ustrezne velikosti in prepoznavne (Luhmann et al., 2014). Na podlagi oslonilnih točk se združene fotografije orientirajo, zato mora biti njihova razporeditev takšna, da enakomerno pokrije celotno obravnavano območje. Z geodetskimi metodami določimo koordinate oslonilnih točk v objektnem koordinatnem sistemu, lahko pa samo čim bolj natančno izmerimo nekaj razdalj med tarčami. Do slabše natančnosti rekonstruiranega 3D modela lahko pride zaradi neupoštevanja teh priporočil.

Za uspešno rekonstrukcijo prostorskega modela je pomembno upoštevati razmerje med snemalno bazo in razdaljo od objekta oziroma obravnavanega območja. Pri fotogrametriji je optimalen kot med optičnima žarkoma med stojiščema glede na objekt 90° . V primeru, da je snemalna baza prekratka, lahko privede do večjih pogreškov (Luhmann et al., 2014). Glede na to, da so v SfM fotogrametriji pri rekonstrukciji modela pomembne vezne točke, je pomembno zadostno prekrivanje fotografij, zato lahko privede predolga snemalna baza do prevelikih razlik med fotografijami in do neustrezne perspektive ter posledično do omejitev pri

združevanju fotografij (Wenzel et al., 2013), medtem ko krajša snemalna baza izboljša globinsko ostrino (Delon in Rouge, 2007).

Kakovostno fotografiranje omogočajo digitalni zrcalno refleksni in brezzrcalni fotoaparati. Priporočljiva je predhodna kalibracija fotoaparata, s čimer zagotovimo kakovostne parametre notranje orientacije in s tem natančnejše meritve. Razvoj računalniških programov in algoritmov za računalniški vid, namenjenih združevanju fotografij, omogoča rekonstrukcijo dovolj kakovostnih 3D modelov tudi z uporabo nekalibriranih digitalnih fotoaparatorov in mobilnih telefonov, pri čemer pa ravno tako igra pomembno vlogo postavitve in izmera oslonilnih točk. Na kakovost fotografij pa pomembno vpliva tudi ustrezna osvetljenost fotografij.

3.2.2.1.3 Načrtovanje zajema

Ne glede na to, da s SfM fotogrametrijo zajamemo podatke z večjim številom posnetkov, je kakovostna in visoko ločljiva rekonstrukcija 3D modela odvisna od več parametrov, zato mora biti zajem podatkov skrbno načrtovan. Določiti moramo namen meritev, obseg območja ter opredeliti fizične omejitve in dostopnost. V primeru, da je obravnavano območje obsežno oziroma visoko, moramo preveriti možnost fotografiranja v več nivojih ter oceniti morebitne mrtve cone, koder se lahko pojavijo vrzeli. Zahtevano natančnost in ločljivost modela določimo na podlagi velikosti detajlov, ki nas zanimajo. Pri zajemu podatkov s SfM fotogrametrijo so pomembne tudi izkušnje zajema podatkov v podobnih okoliščinah. V nadaljevanju so predstavljena priporočila iz rezultatov predhodnih raziskav raziskovalcev, dopolnjena z lastnimi ugotovitvami, ki temeljijo na poizkusih, iz katerih izhajajo predlogi za praktično delo.

Glede na terenske značilnosti določimo stojišča in izmerimo razdalje do obravnavanega območja ter preračunamo optimalno snemalno bazo. Pri tem smo pozorni, da je prekrivanje fotografij 60–80%. Za obravnavano območje izberemo tarče ustrezne velikosti in oblike, ki bodo pri rekonstrukciji uporabljene kot oslonilne točke, ter jih razporedimo po obravnavanem območju. Na podlagi uporabljenega računalniškega programa za združevanje in poravnavo fotografij je priporočljiva uporaba kodiranih tarč, ki jih program samodejno prepozna v svojem postopku. V sklopu izmere razdalje med tarčami je priporočljivo izmeriti njihovo najdaljšo vodoravno in navpično razdaljo, v kolikor je možno, pa tarče tudi geodetsko izmerimo. Za orientacijo rekonstruiranega 3D modela določimo prostorsko lokacijo stojišč.

Na podlagi morfologije obravnavanega območja kombiniramo čelno in konvergenčno fotografiranje, s čimer zmanjšamo možnosti pojava distorzije v modelu. Pri izboru fotografske opreme moramo zagotoviti natančne in čim bolj stabilne parametre notranje orientacije.

Priporočljivo je izklopiti nastavitve za samodejno prilagajanje fotografiranja, kot so odprtost zaslonke in čas osvetlitve, samodejna izostritev ter stabilizacija fotografije, in sicer ohišja fotoaparata in uporabljenih objektivov. Ne glede na to, da uporabljamo digitalni fotoaparati, vplivajo samodejne nastavitve na geometrijo fotografiranja (Luhmann et al., 2014) in posledično na natančnost ter ločljivost 3D modela. Fotografije naj bodo višje ločljivosti, pri čemer moramo upoštevati, da z naraščanjem ločljivosti narašča tudi velikost fotografij in se posledično daljša čas obdelave. Fotografiramo lahko prostoročno ali s fotoaparatom, postavljenim na stativ. Slednji je priporočljiv predvsem pri fotografiranju izkopnih čel v slabo osvetljenih pogojih, kot na primer ob geološki spremiljavi podzemnega izkopa. Pri izboru osvetlitve in goriščne razdalje se poslužujemo uveljavljenih napotkov iz področja fotografiranja, s čimer želimo zagotoviti čim manj šuma pri največji ostrini (Remondino et al., 2013). Priporočljivo je fotografiranje pri razpršeni svetlobi, ko so sence čim manjše, zato si območje obdelave predhodno ogledamo in preverimo osvetljenost v različnih delih dneva. Posebno pozornost moramo posvetiti fotografiranju izkopnih čel v predoru. Pogoji osvetlitve so zelo slabi, velika je zaprašenosť zaradi številne gradbene mehanizacije in procesa izkopa, zato moramo zagotoviti ustrezno osvetlitev izkopnega čela in določiti optimalen čas odprtosti zaslonke.

Zajete podatke nato v pisarni pregledamo, fotografije po potrebi obdelamo v programih za obdelavo fotografij.

3.2.2.2 Georeferenciranje

Georeferenciranje v procesu SfM fotogrametrije poteka podobno kot pri stereofotogrametriji na podlagi prostorskih koordinat položaja fotoaparata ter izmerjenih oslonilnih točk na objektu oziroma obravnavanem območju. Za izvedbo zelo natančnega georeferenciranja je priporočljivo koordinate oslonilnih točk izmeriti geodetsko.

Pri bližnjelikovni fotogrametriji v inženirski geologiji prilagodimo postopek georeferenciranja računalniškemu programu, ki ga bomo uporabili in pri tem podrobneje proučimo zahteve glede uporabljenih tarč in samega postopka georeferenciranja. Priporočljivo je izmeriti in določiti vsaj dve najdaljši dolžini, in sicer v vodoravni in navpični smeri. V kolikor imamo georeferencirane tarče, le-te uporabimo in vključimo še dodatne izmere, kot je smer pogleda na izdanek oziroma izkopno čelo, izmerjene nekatere lokacije stojišč oziroma uporaba naprav za pozicioniranje v fotoaparatih.

3.2.2.3 Obdelava podatkov in izdelava 3D modela

Postopek izdelave 3D modela s SfM fotogrametrijo združuje algoritme izravnave bloka in algoritme računalniškega vida, ki omogočajo samodejno prepoznavanje enakih elementov na različnih fotografijah, ki smo jih zajeli v sklopu terenskega dela. Digitalne fotografije shranjujejo tako slikovne informacije fotografiranega objekta, kot tudi metapodatke, ki med drugim vključujejo informacije o dimenzijah fotografije, parametrih fotografiranja (goriščna razdalja, hitrost zaklopa, uporabljeni ISO) in formatu fotografije. Pri postopku združevanja fotografij upoštevamo obe vrsti informacij ter na osnovi izravnane bloka ocenimo prostorsko geometrijo in lokacijo fotoaparata (Smith et al., 2016).

Izravnava bloka s SfM fotogrametrijo se izvaja v več zaporednih korakih: na podlagi izravnane fotografij izdelamo redke oblak točk (angl. *sparse cloud*), sledi izravnava bloka in gosto ujemanje, s katerim zgostimo točke površja (angl. *dense matching*). Če želimo fotografije natančno izravnati in izdelati končni 3D model, jih moramo najprej pregledati in po potrebi urediti, da bodo detajli razločni in prepoznavanje veznih točk na različnih fotografijah hitrejše. Izdelava redkega oblaka točk združuje sklop algoritmov, ki so vključeni v programih za SfM fotogrametrijo in omogočajo:

- identifikacijo in ujemanje homolognih točk, imenovanih vezne točke (angl. *tie points*),
- izračun parametrov fotoaparata za vsak posnetek,
- relativno orientacijo položaja fotoaparata,
- generiranje redkega oblaka točk, ki predstavlja lokacije veznih točk.

Vezne točke iz vsakega bloka fotografij uporabimo v algoritmu za fotogrametrično izravnavo bloka, ki izračuna orientacijo posameznega fotoaparata v času fotografiranja in prostorske koordinate veznih točk (Piermattei, 2018). Pri izravnavi bloka vključimo oslonilne točke, ki so v fotogrametriji ključne za georeferenciranje, na podlagi katerih dobimo orientirane posnetke. Izdelava gostega oblaka točk (angl. *dense point cloud*) poteka z algoritmi za gosto ujemanje. Za razliko od algoritmov za izdelavo redkega oblaka točk, iščejo ti algoritmi ujemanje za vsak piksel, kar se odraža v hitrosti izdelave gostega oblaka točk.

Število računalniških programov za obdelavo podatkov, zajetih s SfM fotogrametrijo, se je v zadnjih letih precej povečalo. Pri izboru ustreznega programa moramo zato upoštevati namen izdelave 3D modela. Pri bližnjleslikovni SfM fotogrametriji je najbolj razširjena uporaba računalniškega programa Agisoft Metashape, ki omogoča združevanje fotografij, georeferenciranje in rekonstrukcijo prostorskega modela obravnavanega območja.

Računalniški program 3Dsurvey je razvilo podjetje Modri planet d.o.o. iz Slovenije. Rekonstrukcija 3D modela se izvaja na osnovi SfM fotogrametrije, pri čemer so v temeljni postopek vključeni tudi geodetski izračuni (Peterman, 2017). Uveljavljajo pa se tudi programi, ki so v osnovi razviti za podatke iz letalnikov, kot na primer Pix4D (Niederheiser et al., 2016), vendar ti uporabljajo predvsem prvine računalniškega vida. Med odprtokodnimi programi ločimo računalniške programe, ki so namenjeni združevanju fotografij iz SfM fotogrametrije in izdelavi oblaka točk (MicMac, MVE (Multi View Environment) ter OpenMVG, VisualSFM). Iz oblaka točk nato v drugih programih rekonstruiramo 3D model (na primer Meshlab). Gosti oblak točk in fotogrametrični 3D model lahko uporabimo kot osnovo pri geometrijskih analizah (CloudCompare). Na področju inženirske geologije stremimo k programom, ki bi podpirali določanje geoloških značilnosti kartiranih izdankov iz oblaka točk in mreže (3D modela). Najbolj se uveljavlja CloudCompare s specializiranimi vtičniki, kot je na primer Facets (Dewez et al., 2016), namenjen določanju ploskev diskontinuitet in njihove orientacije. Program DSE (Discontinuity Set Extractor) je bil razvit v programu Matlab (Riquelme et al., 2014). Za analizo uporablja metodo, ki omogoča polavtomatsko prepoznavanje različnih ravnin na kamnitem pobočju, in sicer na podlagi iskanja sosednjih točk. V sklopu analize oblaka točk program kategorizira točke glede na glavne sisteme diskontinuitet, določenih z algoritmi programa, rezultate pa predstavi tudi s stereografsko analizo. Z namenom uporabe na področju geologije pa sta bila razvita računalniška programa Lime (Buckley et al., 2018) in VRGS – Virtual Reality Geological Studio (Hodgetts, 2016). Na podlagi priporočil somentorice in dostopnosti do licenčnega programa sem se v sklopu doktorske disertacije odločila, da bom zajete fotografije s SfM fotogrametrijo obdelala in georeferencirala v računalniškem programu Agisoft Metashape, ki je podrobneje predstavljen v nadaljevanju. Analizo fotogrametričnega 3D modela in oblaka točk sem izvedla v vtičniku Facets programa CloudCompare (Dewez et al., 2016) in programu DSE (Riquelme et al., 2014), ker omogočata delno avtomatizirano analizo geometrije diskontinuitet za določanje glavnih sistemov diskontinuitet.

3.2.2.4 Program Agisoft Metashape

Za obdelavo fotografij, georeferenciranje in rekonstrukcijo 3D modela sem uporabila program Agisoft Metashape Professional v.1.5.2 (predhodno imenovan Agisoft Photoscan), ki združuje postopke, potrebne za izdelavo fotogrametričnega 3D modela in njegovega izvoza v obliki oblaka točk ali mreže.

Pri vključevanju programa Metashape v proces zajemanja podatkov s SfM fotogrametrijo je priporočljivo uporabiti kodirane tarče, ki jih dobimo s programom. Uporabimo jih lahko pri določanju koordinatnega sistema, umerjanju modela ter kot dodatno podporo pri združevanju in poravnavi fotografij. Za razliko od nekodiranih tarč, kjer se večinoma uporabljajo polni krogi oziroma sestavljeni vzorci, imajo kodirane tarče okrog središčnega kroga obroč, ki je razdeljen na bele in črne segmente (Slika 3.15). Kodirane tarče imajo vzorce z različno radiometrično ločljivostjo (12-, 16- in 20-bitne). 12-bitni vzorec sicer omogoča manjše število možnih uporabljenih tarč, so 20-bitni vzorci zaradi manjših površin vzorcev težje razpoznavni, zato lahko prihaja do večje števila napak pri njihovem prepoznavanju.. Odvisno od razdalje fotografiranja določimo velikost kodirane tarče, pri čemer je potrebno paziti, da le-te niso prevelike ali premajhne glede na obravnavani objekt oziroma območje (Agisoft LLC, 2018).

3.2.2.4.1 Zajem podatkov in priprava fotografij

Po terenskem delu, kjer zajamemo podatke s postopki SfM fotogrametrije, fotografije pregledamo in po potrebi uredimo v za to namenjenih programih. Pri fotografiranju uporabimo možnost shranjevanja surovih (RAW) fotografij. Oblika datoteke RAW vsebuje podatke o za vsak spektralni kanal (RGB) posebej. Vrednosti barv se shranjujejo v binarni datoteki, ki ni stisnjena (Luhmann et al., 2014). Glede na to, da so podatki neobdelani in niso stisnjeni, imajo shranjen celoten razpon in lahko posneti fotografiji spreminjamo npr. belino ipd., kar pri drugih oblikah datotek (npr. JPEG) ni mogoče, saj vsebujejo številne nepovratne popravke fotografije. Paziti moramo, da so fotografije ustrezno osvetljene in ostre, zamegljene pa odstranimo, pri čemer pa lahko kakovost fotografij preverimo tudi v samem programu. Po uvozu fotografij v program Metashape le-te ponovno pregledamo in označimo območja, ki naj jih program med obdelavo ne upošteva (nebo, vegetacija, nasutje). Postopek imenujemo maskiranje (angl. *masking*). V tej fazi poženemo tudi proces prepoznavanja kodiranih tarč, katere preverimo in po potrebi ročno označimo manjkajoče tarče.

3.2.2.4.2 Izdelava redkega oblaka točk

Algoritmi za izdelavo redkega oblaka točk so v programu Metashape združeni pod izravnavo fotografij (angl. *photo alignment*), s pomočjo katere program poišče pozicije in orientacije vsake fotografije. Postopek lahko kontroliramo s spreminjanjem parametrov izravnave, kot je ocena natančnosti položaja fotoaparata, omejitev števila značilk (angl. *key point limit*) ter veznih točk. Večja kot je natančnost položaja fotoaparata, bolj natančno bodo locirane vezne točke. Natančnost je priporočljivo povečati pri ostrejših fotografijah in z namenom detajlnejših 3D modelov, saj je s tem tudi postopek časovno daljši. Omejitev števila značilk določa zgornjo mejo značilk na posamezni fotografiji, katere program med postopkom upošteva, oziroma kako detajlno bo potekalo vzorčenje. Višja kot je meja, več značilk bo program pri izdelavi redkega oblaka točk upošteval, vrednost 0 pa nima meja in poišče vse značilke. Posledično dobimo veliko nezanesljivih točk. Pri izdelavi redkega oblaka točk sem določila zgornjo mejo med 40.000 in 60.000 točk. Meja števila veznih točk (angl. *tie point limit*) določa zgornjo mejo veznih točk, ki povezujejo fotografije med seboj. Vrednost 0 ne omejuje števila veznih točk, zato pri izdelavi redkega oblaka točk te meje nisem uporabila (Agisoft LLC, 2018).

Izdelan redek oblak točk je pred procesom zgoščanja priporočljivo optimizirati, tako da poiščemo točke, ki imajo veliko dostopanje slikovnih koordinat veznih točk po relativni orientaciji fotografij (angl. *re-projection error*), točke z veliko šuma (angl. *reconstruction uncertainty*) in točke, ki so večje in posledično slabo locirane (angl. *projection accuracy*). Točke s prevelikim odstopanjem odstranimo in optimiziramo izravnavo fotoaparata, pri tem pa moramo paziti, da ne odstranimo prevelikega števila točk oziroma po korakih odstranjujemo do 10% celotnega oblaka točk. V kolikor uporabljamo kalibriran fotoaparatus, uporabimo za optimizacijo parametre kalibracije, v nasprotnem primeru pa program omogoča prednastavljen postopek, z razvitimi algoritmi za avtomatsko korekcijo ocene notranje in zunanje orientacije (Agisoft LLC, 2018).

3.2.2.4.3 Izdelava gostega oblaka točk

Izdelava gostega oblaka točk (angl. *building dense cloud*) temelji na algoritmih, ki iščejo ujemanje na nivoju posameznih pikslov na predhodno orientiranih posnetkih. Pri procesu zgoščanja določimo kakovost ter globinsko filtriranje. V primeru, da želimo ohraniti podrobnosti, izberemo visoko kakovost ter blago globinsko filtriranje, kar posledično podaljša čas obdelave in izdelave gostega oblaka točk. Gost fotogrametrični oblak točk še dodatno pregledamo in odstranimo predele, ki nas ne zanimajo. Ob koncu pa je potrebno izdelani gost fotogrametrični oblak točk še umeriti in georeferencirati. Postopek lahko izvedemo tako, da določimo dve najdaljši dolžini v vodoravni in navpični smeri, ali uporabimo geodetsko izmerjene tarče. Možnosti georeferenciranja so predstavljene v podpoglavju 3.2.2.2.

Glede na namen uporabe lahko v programu Metashape izdelamo ali 3D model s teksturo, ki jo rekonstruiramo na osnovi fotografij ali digitalni model višin. Fotogrametričnemu 3D modelu lahko dodatno zmanjšamo število poligonov (angl. *decimate mesh*), tako da ga enostavneje vključimo v zunanje programe za analizo. Program omogoča izvoz tako gostega oblaka točk, kot tudi 3D modela v različne formate. V programih za analizo in določanje geometrije sem uporabila tako goste oblake točk, kot tudi 3D modele z zmanjšanim številom poligonov.

3.2.3 Uporaba bližnjeliskovne fotogrametrije v inženirski geologiji

Bližnjeliskovna fotogrametrija je brezkontaktna, nedestruktivna metoda za zajem podatkov iz fotografij, ki ob upoštevanju priporočil za zajem omogoča visoko natančnost rekonstruiranega 3D modela. Glede na to, da je z razvojem algoritmov za združevanje in obdelavo SfM fotogrametrije možno rekonstruirati prostorski model tudi s cenovno ugodnejšimi napravami za fotografiranje (digitalni fotoaparati, mobilni telefoni, letalniki), se bližnjeliskovna fotogrametrija vedno bolj uveljavlja na področju geologije in inženirske geologije. Na podlagi pregleda obstoječih objav prevladujejo raziskave SfM fotogrametrije nad stereofotogrametrijo, kar je najverjetneje posledica manj zahtevnega postopka za zajem podatkov in njene vloge pri meritvah z letalniki.

Raziskave bližnjeliskovne fotogrametrije v geologiji so vezane predvsem na geometrijske lastnosti hribin, medtem ko se raziskave za določanje litološke sestave razvijajo predvsem v smeri ločevanja med litološkimi enotami z digitalno obdelavo slik (angl. *digital image processing*). Tako so Åndra et al. (2012) objavili rezultate raziskav tako imenovane digitalne fizike kamnin (angl. *digital rock physics*), kjer so na podlagi digitalizacije zrnatih kamnin ocenili njihovo prepustnost ter elastične module.

Pri inženirski geologiji, kjer je za razumevanje obnašanja hribin pomembno poznavanje tako litološke sestave kot tudi geometrijskih lastnosti hribin, pridobiva terestrično daljinsko zaznavanje pomembno vlogo pri objektivni karakterizaciji in analizi ter grajenju baze. Diskontinuitete se na površinskih izdankih in izkopnih čelih pojavljajo v obliki linij in ploskev, zato lahko s pomočjo bližnjeliskovne fotogrametrije in terestričnega laserskega skeniranja vključimo v analizo tudi težko dostopne elemente diskontinuitet, katerih z ročnim zajemom ne bi mogli določiti in izmeriti.

Orientacija diskontinuitete relativno na inženirski poseg vpliva na možnost pojava nestabilnih pogojev ali razvoj prekomernih deformacij. Glede na prisotnost ostalih pogojev, ki povzročajo

deformacije, kot so na primer nizka strižna trdnost, gostota, hrapavost in polnitev, pa se njen vpliv še dodatno poveča (Barton, 1978). Pri analizi pa moramo upoštevati, da ploskve diskontinuitet v naravi niso skoraj nikoli povsem ravne, zato moramo pričakovati določeno razpršenost izmerjenih orientacij.

Z digitalno bližnjeliskovno fotogrametrijo zajamemo veliko število fotografij, ki pa jih je težko ločeno pregledati za nadaljnjo uporabo pri rekonstrukciji 3D modela in geološki interpretaciji litoloških mej. Vasuki et al. (2017) so razvili orodje za interaktivno segmentacijo slik, z namenom ločevanja med litološkimi enotami, in sicer tako, da uporabnik programu na nekaterih fotografijah nakaže lokacije različnih geoloških enot. Podobno so Healy et al. (2017) na podlagi digitalne obdelave slik v programu Matlab razvili orodje FracPaQ, ki omogoča kvantifikacijo diskontinuitet. Tudi v tem primeru je zaželeno, da se na fotografijah ročno izrišejo meje, ki predstavljajo diskontinuitete. Predstavljena pristopa se razvijata v pravo smer in obetata veliko, vendar zaenkrat predvsem v hribinah z jasno izraženimi diskontinuitetami, medtem ko so meje pri tankoplastnatih heterogenih hribinah, tudi flišu, bolj zabrisane, z možnim postopnim prehodom med enotami. Meje med litološkimi enotami so zato težje ločljive ter posledično težje določljive.

Bližnjeliskovna fotogrametrija omogoča na podlagi manjšega števila ponovitev izmere pridobitev večjega števila podatkov v primerjavi z ročnim zajemom (Sturzenegger, 2010). Gaich et al. (2006) so predstavili postopek za zajem in oceno geometrijskih značilnosti hribine na osnovi stereofotogrametrije. Poleg orientacije diskontinuitet so predstavili tudi možnost določanja gostote in raztezanja. Meritve so izvajali v okviru geološke spremljave izkopnih čel v predorogradnji ter v kamnolomih, dognanja pa vključili v paket ShapeMetriX 3D. Lato in Vöge (2012) ter Sturzenegger (2010) so določili vpade diskontinuitet iz smernega kosinusa normale na ploskev diskontinuitete, pri čemer sta Lato in Vöge izvedla raziskave na 3D modelu, rekonstruiranem iz lidarskih podatkov terestričnega laserskega skeniranja in fotogrametrije. Razvila sta algoritme za avtomatsko prepoznavanje diskontinuitet ter jih vključila v program PlaneDetect. Kemeny & Post (2003) sta predpostavila oceno orientacije na podlagi 2D informacije o sledih razpok s pomočjo digitalne obdelave slik. Razvila sta matematične zveze, ki povezujejo 3D lastnosti razpok s koti sledi, ki bi bile izmerjene na čelih hribine. Poleg tega sta na podlagi sledov robov diskontinuitet iz digitalnih fotografij določila tudi gostoto razpokanosti. Sledovi diskontinuitet so bili na uporabljenih fotografijah jasno izraženi, kar je prispevalo k hitrejšemu prepoznavanju in analizi diskontinuitet. Dolžina diskontinuitet pa sicer ostaja med najzahtevnejšimi parametri za izmero, predvsem zaradi odstopanja pri vzorčenju. Do odstopanja prihaja predvsem na mestih, kjer so krajše sledi težko izmerljive, oziroma je določanje velikosti diskontinuitet odvisno od ločljivosti posnetka (Sturzenegger, 2010). Sledi

diskontinuitet na digitalnem modelu površja so z raziskavami avtomatsko prepoznali Umili et al. (2013). Svoje raziskave so izvedli na izdanku hribine gorske stene, z jasno izraženimi strukturami.

Raziskave hrapavosti diskontinuitet na večjih prelomnih ploskvah so z uporabo SfM fotogrametrije izvedli Corradetti et al. (2017), s katerimi so želeli določiti aktivne površine prelomov.

Številne raziskave so se osredotočile na uporabo bližnjeliskovne fotogrametrije kot pripomočka pri geološkem popisu izdankov in izkopnih čel za rekonstrukcijo 3D modela. Le-ta lahko predstavlja osnovo za karakterizacijo hribine pri oceni stabilnosti, predvsem s prepoznavanjem glavnih diskontinuitet in njihovih geometrijskih značilnosti na obravnavanem območju (Haneberg, 2008; Verma in Bourke, 2019). Na podlagi določenih glavnih diskontinuitet lahko ocenimo potencialno nevarne bloke, njihov volumen ter kinematiko porušitve. Buyer in Schubert (2017) sta predstavila postopek za samodejni digitalni geološki popis izkopnega čela na podlagi oblaka točk iz bližnjeliskovne fotogrametrije. Pri tem sta uporabila dostopne algoritme, orodja in računalniške programe, kot sta DSE in ShapeMetriX 3D.

Z razvojem zmogljivih pametnih mobilnih telefonov, ki imajo integrirano kamero, lahko zajamemo fotografije dovolj dobre ločljivosti za uporabo v inženirski geologiji. Posledično se SfM fotogrametrija še bolj uveljavlja na področju inženirske geologije, saj bi s takim pristopom lahko učinkoviteje zajeli kakovostne podatke površinskih izdankov in izkopnih čel, na podlagi katerih bi lahko rekonstruirali 3D modele za nadaljnje analize. S tem bi lahko hitro in kakovostno zajeli podatke pri geološki spremeljavi, ki so časovno zelo omejene zaradi samega poteka izkopnih del ali nestabilnega območja. Že leta 2015 so Micheletti et al. raziskali potencial rekonstrukcije digitalnega modela reliefa z uporabo pametnih mobilnih telefonov in spletnih aplikacij, ki temeljijo na SfM (najverjetneje na podlagi računalniškega vida). Ugotovili so, da so rezultati odvisni od kakovosti in merila fotografije, vendar so se izkazali kot zadostno kvalitetni za uporabo v inženirski geologiji, v kolikor ne potrebujemo visoko ločljivih rezultatov.

V inženirski geologiji se uveljavlja tudi zajem podatkov s SfM fotogrametrijo s pomočjo letalnikov (angl. *unmanned aerial vehicle* – UAV). Uporabljajo se predvsem za zajem večjega območja navpičnih sten (izkopne stene kamnolomov, klifov in gorskih sten), ki jih je zaradi oddaljenosti ali večjega obsega težko enovito zajeti z ročnimi metodami. Izdelani fotogrametrični modeli se v splošnem uporabljajo kot podpora geološkemu kartiranju (Chesley et al., 2017; Menegoni et al., 2018). Na področju inženirske geologije so zajemi z letalniki pomembni pri pripravi podlog v sklopu analize stabilnosti brežin (Aggüera-Vega et al., 2018)

ter pri prepoznavanju in karakterizaciji potencialno nestabilnih blokov pri zdrsih (Vasuki et al., 2014; Chen et al., 2017).

Nenehen razvoj in izboljšave na področju vizualne digitalne tehnologije, postavljata bližnjelikovno fotogrametrijo zopet v ospredje, saj omogoča uporabo cenovno dostopnejše, lažje ter obenem kakovostne opreme za rekonstrukcijo 3D modelov visoke ločljivosti in natančnosti, pri čemer se fotografiranje lahko izvede tako z merskimi, kot tudi nemerskimi fotoaparati. Uporablja se pri zajemu večjih in manjših konstrukcij ter geoloških izdankov na površini in izkopih. Zajem podatkov je razmeroma hiter, stroški zajemanja in obdelave podatkov pa so nižji. Zajeti podatki se shranijo v digitalni obliki in omogočajo gradnjo baze površinskih izdankov in izkopnih čel ter analizo v različne namene. Kljub prednostim, ki jih bližnjelikovna fotogrametrija prinaša, pa ima tudi omejitve. Pri zajemu podatkov je priporočljivo, da je izdanek ali izkopno čelo čisto oziroma s čim manj motečimi elementi, kot je na primer vegetacija in različni objekti, kar bi negativno vplivalo na rekonstrukcijo 3D modela. Predvsem pri SfM fotogrametriji, ki omogoča uporabo večjega števila fotografij, moramo upoštevati, da bo posledično večja količina podatkov za shranjevanje in obdelavo pri rekonstrukciji, kar se odraža z daljšim časom obdelave podatkov. Na podlagi raziskav (Micheletti et al., 2015; Wilkinson et al., 2016) je bilo ugotovljeno, da se pojavljajo sistematične nepravilnosti pri natančnosti pridobljenih podatkov v primerjavi s podatki terestričnega laserskega skeniranja, ki so vezane predvsem na uporabljeni postopek zajema podatkov in pristop triangulacije SfM fotogrametrije.

3.3 Terestrično lasersko skeniranje

Lidar (Light Detection And Ranging) predstavlja aktivno tehnologijo za zajem podatkov zemeljskega površja in objektov na njem. Za razliko od laserskega razdaljemera, s katerim izvedemo posamezno meritev, pridobimo s pomočjo 3D laserskega snemanja veliko število podatkov o neki površini oziroma objektu v kratkem času zajema. Instrument beleži stanje objektov v območju skeniranja s podatki o njegovi obliki in videzu, na podlagi intenzitete odboja žarka in barve objekta. Pri tem pošilja impulze laserskih žarkov na skenirano površino ter na osnovi časa njihovega potovanja do površine in nazaj do sprejemnika pridobi podatke o položaju opazovanih predmetov (Feng in Röshoff, 2015). Lasersko skeniranje se vse bolj uveljavlja na področju geologije, kjer sta hitrost in natančnost zajema podatkov iz površja pomembna za pripravo georeferenciranega modela.

Lasersko skeniranje se uporablja za zajem objektov različne velikosti, od majhnih objektov do večjih zgradb in zemeljskega površja. Ločimo tri glavne sisteme laserskega skeniranja: aerolasersko skeniranje (ALS – Airborne Laser Scanning), terestrično lasersko skeniranje (TLS – Terrestrial Laser Scanning) in mikrolasersko skeniranje (MicroLS – Micro-Laser Scanning; Feng in Röshoff, 2015). Aerolasersko skeniranje omogoča izmero oddaljenosti letenja od Zemljinega površja na podlagi potovanja laserskega žarka do površja in nazaj do sprejemnika. Rezultat predstavlja oblak georeferenciranih točk s podatki o intenziteti odboja laserskega žarka. V splošnem se uporablja za zajem večjih območij, kot na primer kmetijskih zemljišč in gozdov ter urbanih območij (Feng in Röshoff, 2015). Na področju geologije se uporabljajo kot topografske podloge, nadalje pri morfološko tektonski analizi digitalnega modela reliefa (Žibret in Žibret, 2014) ter v inženirski geologiji za analizo nestabilnosti površja (Verbovšek et al., 2017; Pawluszek et al., 2018). Mikrolaserski skenerji pa predstavljajo instrumente, ki so namenjeni skeniranju predmetov na razdaljah do enega metra in se uporabljajo predvsem za nadzor kakovosti in dokumentaciji kulturnih artefaktov (Feng in Röshoff, 2015).

Terestrično lasersko skeniranje zagotavlja zajem prostorskih podatkov na principu laserskih žarkov oziroma impulzov. Oddani laserski impulzi, ki jih laserski skener med premikanjem platforme pošilja po celotnem obravnavanem objektu, se od površja odbijajo nazaj k instrumentu, ki zabeleži čas potovanja impulzov in nekatere druge podatke. Rezultat skeniranja in obdelave izvornih podatkov je lidarski oblak točk, s katerim zagotovimo visoko stopnjo geometrične popolnosti detajla terena ali predmeta, omogoča pa tudi zmanjšanje stroškov ponovnih vračanj na teren in dodatnih izmer ter arhiviranje natančnih podatkov za kasnejše faze in v druge namene. Na področju geologije se uveljavlja predvsem kot

nadgradnja geološkega kartiranja (Hodgetts et al., 2004; Buckley et al., 2010) ter na področju inženirske geologije kot podpora pri karakterizaciji hribine in spremljavi pomikov v sklopu stabilnosti pobočij (Blois in Berry, 2008; Slob, 2010; Sturzenegger, 2010) ter pri določanju orientacije diskontinuitet pri izkopu predora za analizo izpadanja blokov (Fekete in Diedrichs, 2013). Na podlagi pregleda dosedanjih člankov pa se terestrični laserski skener še ni uporabljal kot podpora klasifikaciji heterogenih hribin z uveljavljenimi sistemi, kljub temu, da se lahko uporablja tako pri geometrijski analizi diskontinuitet kot pri razlikovanju med litološkimi enotami.

3.3.1 Metode zajema in registracije podatkov v TLS

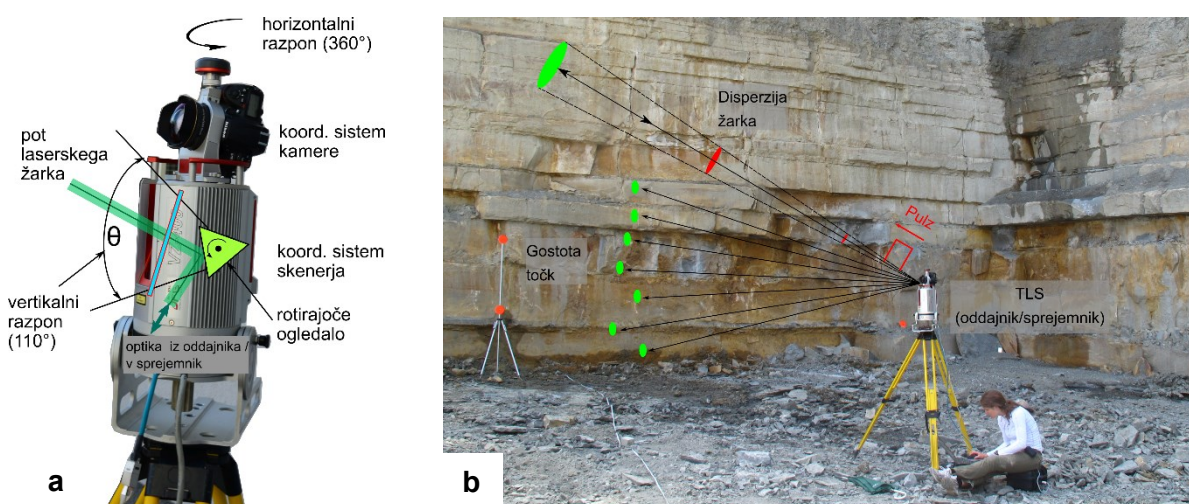
Pri uporabi terestričnega laserskega skeniranja metode zajema in obdelave prilagodimo namenu uporabe oblaka točk. Na področju inženirske geologije se terestrični laserski skener uveljavlja pri geološkem kartiranju in geološki spremljavi izkopov ter spremljavi pomikov tako površja nestabilnih območij kot tudi gradbenih konstrukcij. Ustrezno metodo zajema in nadaljnjo obdelavo podatkov s terestričnim laserskim skenerjem določimo na podlagi informacij, katere želimo pridobiti, dostopnosti terestričnih laserskih skenerjev ter fizikalnih značilnosti obravnavanega območja in njegove dostopnosti (Telling et al., 2017).

3.3.1.1 Zajem podatkov

S terestričnim laserskim skenerjem skeniramo površino objekta. Tehnologija laserskega skeniranja temelji na pošiljanju impulzov laserske svetlobe, predvsem v vidnem in infrardečem delu spektra valovne dolžine elektromagnetnega valovanja, med 800 in 1100 nm ter s frekvenco od 5 do 200 kHz. Za razliko od naravne svetlobe, ki oddaja elektromagnetno valovanje v vse smeri ter ima spremenljivo valovno dolžino in amplitudo, je za lasersko svetlobo značilno, da oddaja elektromagnetno valovanje v eni smeri, ima konstantno valovno dolžino z zelo ozkim spektrom ter konstantno amplitudo (Heritage in Large, 2009). Laserski žarek ima značilno majhno divergenco oziroma razpršenost, torej majhen kot (med 0,2 mrad in 2,0 mrad), pod katerim se laserski snop širi (Slika 3.16 b).

Terestrični laserski skener omogoča 3D lasersko skeniranje v dveh smereh. Za zagotovitev gostega vzorca skenirane površine, mora laserski žarek sistematično 3D lasersko skenirati ciljno površino. Vir laserskega žarka je povezan s sistemom vrtljivih ogledal, ki usmerjajo laserski žarek proti ciljnemu objektu. Instrument je postavljen na stativ, zato mora mehanizem skeniranja usmeriti laserski žarek v dve smeri, da lahko sestavi 3D lidarski oblak točk. Pri sistemu vrtljivih ogledal sta si ogledala med sabo pravokotna in omogočata skeniranje v

vidnem polju oblike okna (kamera skener). Hibridni in panoramski skener pa imata enojno ogledalo, ki se vrti v eni smeri, z vrtenjem instrumenta okoli svoje osi pa dosežemo skeniranje 360° (Slika 3.16 a), pri čemer zajame panoramski skener celotno območje, tudi obod nad skenerjem, hibridni skener pa zgolj pas okoli svoje osi (Vosselman in Maas, 2010; Telling et al., 2017).



Slika 3.16: Terestrično lasersko skeniranje: a. Sestavni deli TLS Riegl VZ-400 in potovanje laserskega žarka (prirejeno po Riegl LMS GmbH, 2011); b. Potovanje in odboj signala od površinskega izdanka ter značilnosti skeniranja.

Figure 3.16: Terrestrial Laser Scanning: a. Components of the TLS Riegl VZ-400 and optical beam path (modified after Riegl LMS GmbH, 2011); b. Travel and reflected signal from the scanned outcrop.

Objekte lahko z aktivnimi metodami izmerimo na podlagi merjenja časa potovanja svetlobe ali na osnovi triangulacije. Triangulacijski skenerji se zaradi kratkega dosega, kljub večji natančnosti, ne uporabljajo na področju geologije. Tehnologija triangulacije je vgrajena predvsem v mikrolaserskih skenerjih. Svetloba potuje s konstantno hitrostjo skozi medij c (m/s), zato lahko izmerimo časovni zamik (poznani kot čas potovanja oziroma angl. *time-of-flight*), potreben za potovanje svetlobnega žarka od izvora do odsevne površine in nazaj τ (s) ter na podlagi izmerjenega časa izračunamo razdaljo ρ (m) po enačbi (6). Pri potovanju laserskega žarka skozi zrak je potrebno pri svetlobni hitrosti c upoštevati korekcijski faktor, ki je enak lomnemu količniku $n = 1,00025$ in je odvisen od temperature zraka, zračnega pritiska ter vlažnosti. V izračunu poenostavimo, da velja $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, $n = 1$ (Vosselman in Maas, 2010).

$$\rho = \frac{c \tau}{n} \quad (6)$$

Čas potovanja (angl. *time-of-flight*) lahko izmerimo z dvema neposrednima metodama: s potovanjem impulza laserskega žarka (impulzni skenerji) ali na podlagi faznih razlik med oddanim in sprejetim signalom (fazni skenerji). Impulzni skenerji oddajo kratek impulz (čas

trajanja med 1 ns in 10 ns), pri tem pa neposredno merijo čas potovanja, ki ga impulz laserske energije potrebuje od instrumenta do naprave in nazaj. V primeru ugodnega razmerja signala in šuma lahko dosežajo impulzni skenerji, ki imajo največji doseg od 250 m do 1000 m, natančnost med 5 mm in 10 mm (Vosselman in Maas, 2010). Ker so razdalje do skeniranih objektov relativno kratke, je ta natančnost približno enaka za vse točke objekta. Na prostorsko natančnost vpliva tudi kotna natančnost usmerjenosti laserskega žarka (Boehler et al., 2001). Doseg terestričnih laserskih skenerjev je zelo odvisen od odbojnosti skeniranih materialov, vremenskih pogojev in difuzne svetlobe, pri čemer so impulzni skenerji manj občutljivi kot fazni in triangulacijski skenerji, tako da lahko dosežejo tudi razdaljo nekaj kilometrov, večina pa jih deluje v dometu do 600 m (Telling et al., 2017). Fazni skenerji merijo razdalje na podlagi opazovanja faze zveznega moduliranega elektromagnetnega valovanja, pri čemer je modulirana amplituda zveznega laserskega žarka. Čas potovanja določimo na podlagi fazne razlike $\Delta\varphi$ med oddanim in prejetim laserskim žarkom, ki je vezana na časovno razliko τ (s) in ga izračunamo po enačbi (7), kjer λ_m (nm) opisuje valovno dolžino moduliranega valovanja:

$$\tau = \frac{\Delta\varphi * \lambda_m}{2\pi * c} \quad (7)$$

Metoda je sicer natančnejša (1 mm do 10 mm) od impulzne, vendar je za ohranjanje zveznega valovanja potrebno več energije, kar se odraža v krajšem dosegu do nekaj sto metrov (Vosselman in Maas, 2010; Telling et al., 2017).

Odbojne lastnosti materiala tudi vplivajo na izbor senzorja, pri čemer ima večina terestričnih laserskih skenerjev valovno dolžino bližnje infrardeče svetlobe (ok. 1550 nm). Lidarski oblak točk lahko prikažemo na podlagi vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka, ali ga obarvamo z vrednostmi RGB (rdeča, zelena, modra), ki jih zajamemo s pomočjo geometrijsko kalibriranega fotoaparata. Fotoaparati so lahko vgrajeni v terestričnih laserskih skenerjih ali nameščeni na sam instrument. Fotoaparat in skener sta kalibrirana z vnaprej določeno transformacijo skeniranega območja iz okolja skenerja v okolje fotoaparata (Telling et al., 2017). Obarvan lidarski oblak točk ima dodano vrednost pri vizualni predstavi skeniranega območja, vendar moramo biti pri tem pozorni na velikost piksla v fotoaparatu v primerjavi z ločljivostjo skenerja.

Pri uporabi terestričnega laserskega skenerja moramo pretehtati, katera tehnologija najbolj ustreza izvedbi zastavljene naloge. Po Mozetiču (2004) so elementi, ki vplivajo na odločitev, naslednji: način izvedbe TLS, natančnost skeniranja, hitrost skeniranja, ločljivost in velikost laserske pike, uporabljene tarče, vidno polje, transport in napajanje ter navsezadnje tudi cena

samega instrumenta. V geologiji in inženirski geologiji predstavlja terestrično lasersko skeniranje predvsem podporo pri zajemu površinskih izdankov in izkopnih čel, ki so oddaljeni do okoli 500 m. Zaradi hitrejšega zajema podatkov ter večjega dosega se bolj uveljavlja uporaba impulznih terestričnih laserskih skenerjev. Glede na namen skeniranja je potrebno pripraviti program zajema in nadaljnje obdelave podatkov.

V sklopu raziskav sem za namen terestričnega laserskega skeniranja uporabila 3D laserski skener Riegl VZ-400 z digitalnim zrcalno refleksnim fotoaparatom Nikon D70, nameščenim na vrhu instrumenta (Riegl LMS GmbH, Avstrija). Skener je v lasti podjetja DFG Consulting d.o.o., ki je sodelovalo tudi pri sami izvedbi.

Terestrični laserski skener zagotavlja brezkontaktni zajem podatkov na podlagi velike hitrosti z uporabo laserskega žarka v infrardečem spektru. Za merjenje razdalje uporablja impulzno metodo. Po podatkih proizvajalca (Riegl LMS GmbH, 2011) omogoča instrument s pomočjo digitalnega odboja in analize valovne oblike natančne meritve in vrednotenje večkratnih odbojev tarč tudi pri različnih atmosferskih pogojih. Tehnične specifikacije instrumenta so predstavljene v preglednici 3.7.

3.3.1.2 Načrtovanje zajema s TLS

Glede na zahtevano natančnost zajema podatkov in posledično zanesljivost interpretacije meritev je potrebno prilagoditi način ter tudi čas skeniranja. Pravilno načrtovanje skeniranja namreč poleg pridobitve kakovostnih podatkov prihrani precej časa pri terenskem delu in nadaljnji obdelavi podatkov. Postopek skeniranja se razlikuje glede na namen ter zahteve tako programa za obdelavo podatkov kot tudi referenčne geodetske izmere, pri čemer moramo ustrezno izbrati osnovne parametre: ločljivost skeniranja, razpon skeniranja, stojišča ter število in lokacije referenčnih tarč. Pozorni moramo biti tudi na občutljivost nekaterih sistemov skeniranja na temperaturo, vlažnost, delež prašnih delcev v zraku ter odbojne lastnosti skeniranih predmetov (Feng in Röshoff, 2015).

Preglednica 3.7: Tehnične specifikacije terestričnega laserskega skenerja Riegl VZ-400.

Table 3.7: Technical specification of terrestrial laser scanner Riegl VZ-400.

Tehnična specifikacija	Riegl VZ-400
Način merjenja dolžin	Impulzna
Digitalni fotoapararat	da (Nikon D70)
Hitrost [točke/sekundo]	122.000
Natančnost merjenja dolžin	5 mm / 100 m
Doseg [m]	1,5 – 600
Kotna ločljivost [horizontalna]	0,0024°
Kotna ločljivost [vertikalna]	0,0024°
Disperzija žarka	30 mm / 100 m
Valovna dolžina laserja [nm]	blizu IR (1550)
Vidno polje (območje zajema) (Vertikalno x Horizontalno) [°]	100 x 360
Temperatura upravljanja [°C]	0 - 40
Teža [kg]	9,6

Zahtevana ločljivost in natančnost meritev razdalje predstavljata osnovna parametra, ki določata prehod od manj do bolj zahtevnih zajemov podatkov. Natančnost razdalje pada z oddaljenostjo, predvsem zaradi atmosferskih vplivov, medtem ko je ločljivost strojno omejena s vpadnim kotom laserskega žarka (Preglednica 3.8). Na končni rezultat vpliva tudi razpršitev laserskega žarka (disperzija), ki nastane kot posledica laserskega žarka, kateremu se snop med potovanjem od oddajnika do skenirane površine širi v obliki stožca. Premer snopa laserskega žarka je odvisen od začetnega preseka laserskega žarka, divergence in oddaljenosti od tarče. Pri različnih instrumentih se začetni presek in divergenca laserskega žarka razlikujeta, in sicer med 0,1 mrad in 1,0 mrad (Gatziolis in Andersen, 2008). Na podlagi značilne disperzije laserskega žarka bo s snopom osvetljeno različno veliko območje, kar vpliva na natančnost merjenja dolžin in zmanjšuje natančnost pozicije točk v prostoru. Pri skeniranju stabilnih območjih ter diskontinuitetah z izrazitejšimi ploskvami lahko izvedemo zadovoljiv zajem podatkov tudi z manjšo gostoto točk. Večji poudarek na izbrani metodi zajema podatkov in na gostoti točk pa je potreben pri obravnavi nestabilnih območij ter pri tankoplastnatih heterogenih hribinah, saj zahtevajo visoko ločljivost in natančnost. Pri tem je potrebno preveriti razpršenost laserskega žarka v odvisnosti od razdalje skeniranja v

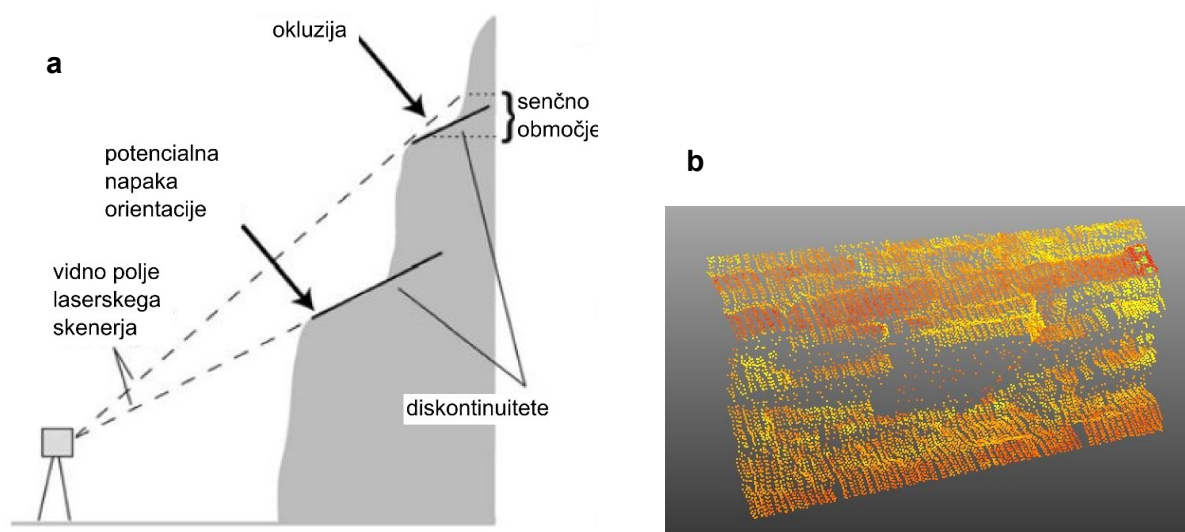
primerjavi s predvidenimi premiki nestabilnih območij oziroma najmanjšo debelino plasti v primeru tankoplastnatih kamnin.

Preglednica 3.8: Priporočljive oddaljenosti TLS od objekta za doseganje želene natančnosti in ločljivosti (prirejeno po Setnikarju, 2007, str. 148).

Table 3.8: Recommended distances of TLS from the target in order to acquire desired accuracy and resolution (modified after Setnikar, 2007, pp. 148).

	Natančnost razdalje (4–10 mm, pada z razdaljo)	Ločljivost (< 1 mm–4 cm, pada z razdaljo)
Manjša zahtevnost (natančnost xyz +/- 2-3 cm)	največji domet (okoli 1000 m)	največji domet (okoli 1000 m)
Večja zahtevnost (natančnost xyz manj kot +/- 1 cm)	200 m	50 m

Na kakovost oblaka točk vpliva tudi vpadni kot potovanja laserskega žarka glede na obravnavano območje, ki ga opišemo kot kotno ločljivost terestričnega laserskega skenerja. Opisuje sposobnost razlikovanja med točkami enake intenzitete vzdolž smeri skeniranja, in sicer med sosednjimi linijami pogleda. Odvisen je od intervala vzorčenja ter širine laserskega žarka (Lichti in Jamtsho, 2006). Vpadni kot skeniranja, ki je večji od okoli 60°, povzroča zmanjšanje natančnosti točke ter učinkovitosti skeniranja, zaradi posledica manjše energije prejetega laserskega žarka (Lichti, 2007; Carrea et al., 2016; Telling et al., 2017). Pojav imenujemo okluzija (angl. *occlusion*) in je izrazit pri terestričnem laserskem skeniranju strmih pobočij ter izkopnih čel (Slika 3.17 a). Posledično prihaja do manjše natančnosti in ločljivosti na mestih, ki jih laserski žarek zaradi prevelikega vpadnega kota skeniranja ne doseže (Slika 3.17 b). V izogib napakam zaradi okluzije, ki je lahko posledica tudi konfiguracije terena, je potrebno izvesti terestrično lasersko skeniranje iz več stojišč. Predhoden ogled obravnavanega območja je tako potreben za določitev ustreznega števila stojišč.



Slika 3.17: Problem okluzije: a. Skica okluzije in potencialne napake orientacije (prirejeno po Sturzenegger in Stead, 2009, str. 170); b. Primer razlike v gostoti oblaka točk, ki je posledica prestrmega kota skeniranja. Ploskve, ki so v vidnem polju snopa laserskega žarka, imajo večjo gostoto kot ploskve, ki jih laserski žarek ne doseže.

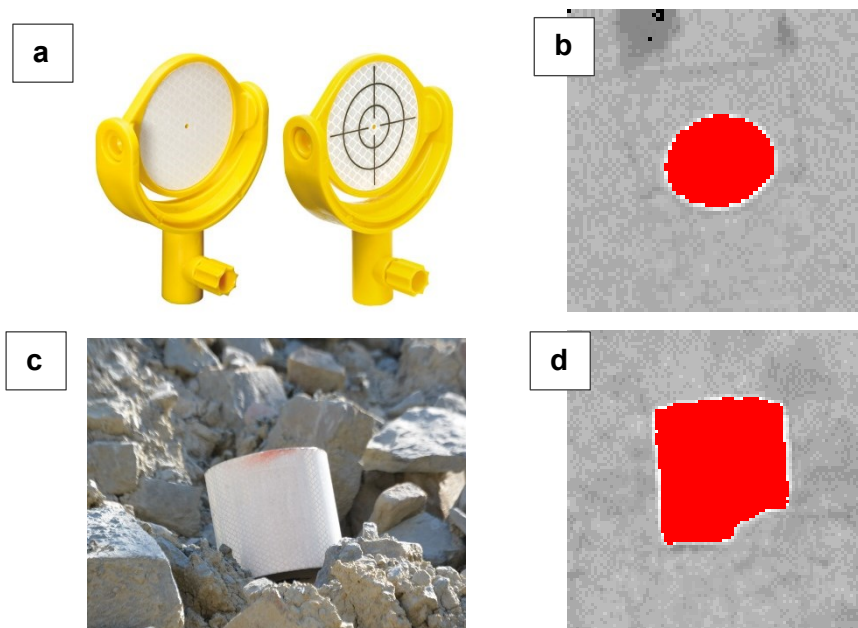
Figure 3.17: Problem of occlusion: a. A sketch presenting the problem with occlusion and potential orientation base (modified after Sturzenegger in Stead, 2009, pp. 170); b. An example of point cloud density due to the high incidence angle of the scanning. Surfaces lying in the line of sight of the laser beam have higher point density than surfaces, which laser beam does not reach.

Pri načrtovanju zajema s terestričnim laserskim skenerjem moramo določiti izbrano območje skeniranja, zahtevano ločljivost oblaka točk ter na podlagi oblikovanosti izbranega območja in konfiguracije terena tudi število potrebnih stojišč. Pozorni moramo biti na čas skeniranja, ki je odvisen tako od želene ločljivosti oblaka točk, kot tudi od zunanjih okoliščin. V primeru skeniranja površinskega izdanka lahko poteka skeniranje dalj časa. Pri skeniranju izkopnih čel, kjer smo vezani na vnaprej določeno časovno okno zaradi delovnega procesa, pa moramo stopnjo ločljivosti in čas skeniranja prilagoditi delovnemu procesu. Skeniranje pri različnih svetlobnih pogojih (v primeru podzemne gradnje ali različne osvetljenosti zaradi orientacije obravnavanega območja in lege sonca) vpliva na kvaliteto fotografij, ki predstavljajo pomemben del zajema podatkov pri uporabi instrumentov z nameščenim fotoaparatom. Na podlagi osvetljenosti določimo optimalne nastavitve fotografiranja, kot je odprtost zaslone, čas odprtosti zaslone ter uporaba bliskavice. Pri izvedbi vsaj dveh posnetkov obravnavanega območja moramo zagotoviti tudi zadostno prekrivanje podatkov, s katerim povečamo zanesljivost izmere. Oblake točk združimo in jih nato z operacijami rotacije, translacije in spremembo merila pretvorimo v izbrani koordinatni sistem.

3.3.2 Georeferenciranje

Obravnavano območje terestrično lasersko skeniramo v enem ali več sklopih. Pri načrtovanju zajema podatkov s terestričnim laserskim skenerjem moramo določiti tudi metodo registracije in georeferenciranja. Registracija predstavlja geometrijsko izravnavo posameznih meritev skeniranja, pri katerih so pozicije točk določene v notranjem okvirju instrumenta, znanem kot koordinatni sistem skenerja, v enoten koordinatni sistem. Georeferenciranje pa opisuje postopek združevanja in transformacije zajetih meritev terestričnega laserskega skeniranja v izbrani zunanji koordinatni sistem (Vosselman in Maas, 2010; Telling et al., 2017). Registracija podatkov terestričnega laserskega skenerja v enoten koordinatni sistem poteka v dveh korakih: v prvem koraku določimo oslonilne točke znotraj oblaka točk, v drugem koraku pa transformiramo celoten lidarski oblak točk (Vosselman in Maas, 2010). Pri točkovni registraciji lahko prepoznamo znane točke, kot so na primer merske odsevne tarče (Slika 3.18 a in b). Priporočljiva je uporaba posebnih tarč, imenovanih reflektorji, ki jih programska oprema lahko samodejno prepozna in omogoča hitrejše ter natančnejše združevanje oblakov točk, skeniranih iz več stojišč, ali preslikavo v željeni koordinatni sistem. Uporaba posebnih tarč je pomembna tudi pri kalibraciji položaja fotoaparata na instrumentu, na podlagi katerega lahko lidarski oblak točk obarvamo z vrednostmi RGB. Pri izboru ustreznih tarč moramo biti pozorni tako na barvo kot tudi na obliko. Primerne so visoko odbojne merske tarče, bele kocke oziroma krogle in odsevne nalepke. Uporabljajo se tudi odsevni valji (Slika 3.18c in d), pri katerih moramo biti pozorni, kako jih postavimo na območju skeniranja, saj lahko pride pri združevanju oblakov točk do drsenja po navpični osi. Takim napakam se lahko izognemo tako, da odsevne valje različno orientiramo ter postavimo na različne višine okoli stojišča. Pri postavitvi reflektorjev moramo biti pozorni, da so le-ti enakomerno porazdeljeni po območju obdelave, da so tako usmerjeni, da jih instrument lahko prepozna iz različnih stojišč ter da omogočajo ustrezen preklap sosednjih meritev. Za doseg ustreznih natančnosti je priporočljivo izmeriti odsevne merske tarče s tahimetrom, neznailne reflektorje (npr. odsevne valje) pa z napravami za pozicioniranje GNSS.

Včasih pa namestitve ustreznih merskih točk ni mogoča zaradi nedostopnosti ali nevarnosti, zato si v sklopu registracije pomagamo s prepoznavanjem in navezovanjem na izrazite naravne oziroma umetne strukture v različnih oblakih točk oziroma v državnem digitalnem modelu reliefa (DMR). Registracija oblaka točk na podlagi prepoznavanja izrazitih elementov se lahko izvaja z uporabo algoritma ICP (angl. *iterative closest point*), ki s ponavljajočimi postopki išče najbližje točke, pri čemer mora biti zadostna stopnja prekrivanja med posameznimi oblaki točk, da jih lahko dovolj natančno povežemo (Vosselman in Maas, 2010; Besl in McKay, 1992).



Slika 3.18: Primera odsevnih merskih tarč za potrebe terestričnega laserskega skeniranja: a. Odsevna merska tarča, ki se uporablja predvsem v rudarstvu in predorogradnji; b. Primer registrirane odsevne merske tarče v oblaku točk TLS; c. Odsevni valj, ki se uporablja pri terestričnem laserskem skeniranju; d. Primer registriranega odsevnega valja.

Figure 3.18: Examples of reflective targets, used in terrestrial laser scanning: a. Reflective target used mostly in mining and tunnelling; b. Example of registered reflective target in a point cloud from TLS; c. Reflective cylinder used in terrestrial laser scanning; d. Example of registered reflective cylinder.

Pri postopku georeferenciranja lahko uporabimo algoritem ICP v povezavi z državnim digitalnim modelom reliefa, velika večina terestričnih laserskih skenerjev pa ima vgrajen instrument za pozicioniranje (GNSS), ki postopek pospeši. Pri meritvah, kjer je pomembna natančnost pozicioniranja, pa je priporočljiva uporaba tahimetra, ki omogoča natančnejšo izmero referenčnih točk, geometrijsko nadzorovane posnetke ter transformacijo v izbrane koordinatne sisteme (Staiger, 2003). Postopek registracije in georeferenciranja predstavlja že del obdelave podatkov.

3.3.3 Obdelava podatkov

Postopek obdelave podatkov, zajetih s terestričnim laserskim skeniranjem, ločimo po Telling et al. (2017) v dve glavni fazi: najprej priprava in urejanje zajetih podatkov v lidarski oblak točk, ki ga nato v drugi fazi obdelamo za točno določen namen. Začetna obdelava zajetih podatkov poteka načeloma v računalniškem programu proizvajalca terestričnega laserskega skenerja. Po izvedbi skeniranja zajete podatke registriramo, pri skeniranju z več stojišč posamezne oblake točk združimo v enoten koordinatni sistem ter nadalje georeferenciramo v izbrani koordinatni sistem. Zajete podatke nato pregledamo po posameznih stojiščih in jih glede na

morebitne zahteve obarvamo z barvami iz fotografij nameščenega fotoaparata. Pri pregledu in urejanju oblakov točk so nekateri položaji točk lahko nenatančni, kar je posledica možnih odbojev objektov v ozadju, odbojev objektov, ki se nahajajo med instrumentom in skeniranim površjem (vegetacija, ptice, idr.), delnih odbojev laserskega žarka na robovih ter sipanja laserskega žarka na objektu. Do napak lahko pride tudi v primeru različne odbojnosti skeniranih površin (Boehler et al., 2001; Kolenc, 2004). Za nadaljnjo uporabo oblaka točk v analizah je potrebno odstraniti šume ter izbrisati nepomembne dele oblaka točk. V sklopu obdelave lahko lidarski oblak točk filtriramo z uporabo namenskih filtrov, kot je na primer filter za glajenje, ki je namenjen izboljšanju rezultatov ravnih ploskev objekta, pri čemer moramo upoštevati, da vpliva postopek filtriranja na celoten lidarski oblak točk (Kolenc, 2004). Brisanje šumov in filtriranje oblaka točk je priporočljivo opraviti pred združevanjem.

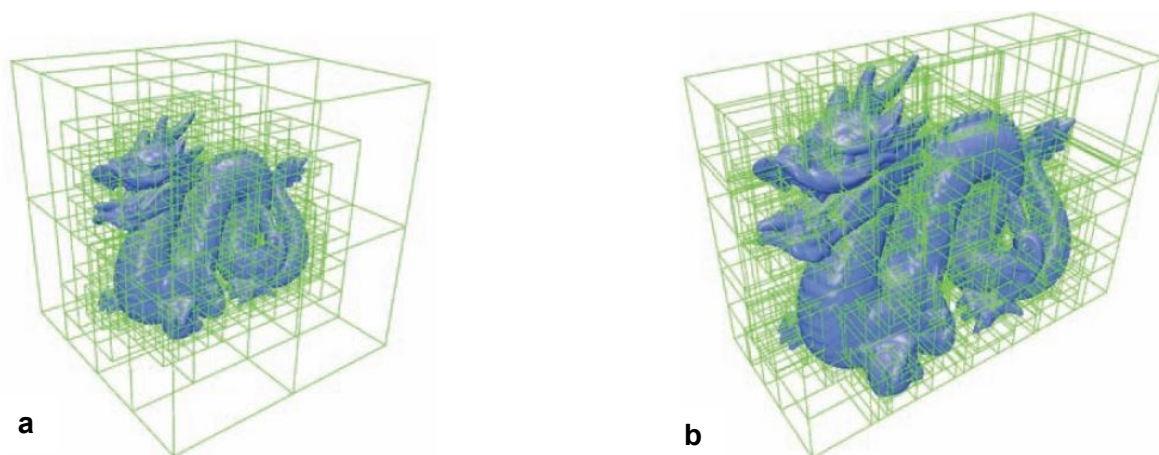
Druga faza obdelave podatkov je namenjena predvsem transformaciji registriranih in georeferenciranih oblakov točk v ustrezno obliko za nadaljnje analize. Lidarski oblak točk se najpogosteje pretvori v površino s pomočjo triangulacije. Rezultat predstavlja nepravilna trikotniška mreža (angl. *Triangulated Irregular Network - TIN*), katero sestavljajo oglišča in robovi, ki skupaj tvorijo površino. Uporablja se predvsem za vizualizacijo površine objekta, v analizah pa se redko uporablja (Vosselman in Maas, 2010).

Posamezni laserski podatek iz laserskega skenerja lahko obravnavamo tudi kot 2.5D posnetek, ki ga lahko nadalje pretvorimo v višinsko sliko, pri čemer določa vsak piksel nadmorsko višino. Te podatke uporabljamo predvsem pri aerolaserskem skeniranju, za izdelavo digitalnega modela reliefa (Vosselman in Maas, 2011; Telling et al., 2017).

Za razliko od analize gradbenih konstrukcij, pri katerih lahko oblak točk filtriramo z glajenjem in izluščimo ravne ploskve, imajo geološke strukture (npr. diskontinuitete), nepravilne ravne ploskve, vezane na stopnjo valovitosti in hrapavosti. Če želimo izluščiti ploskve, ki predstavljajo površino diskontinuitete, moramo oblak točk razdeliti na najmanjše možne entitete, ki izražajo lastnosti ploskve na podlagi kriterija hrapavosti. S 3D segmentacijo oblaka točk ne razdelimo oblaka v smislu prostora, temveč na osnovi prostorske statistike z uporabo metode združevanja (angl. *clustering*), ki razvršča točke znotraj istega razreda v podrazrede (Dewez et al., 2016). Pristop 3D segmentacije oblaka točk so Dewez et al. (2016) uporabili pri razvoju računalniškega programa Facets, ki predstavlja vtičnik programa CloudCompare.

Pri segmentaciji oblaka točk se najpogosteje gradi struktura podatkov na osnovi osmiškega drevesa (angl. *octree*), Kd drevesa (angl. *Kd tree*) ter metode hitrega širjenja (angl. *fast marching*), kot je predstavljeno na sliki 3.19. Osmiška drevesa predstavljajo učinkovito drevesno strukturo pri obdelavi obsežnega oblaka točk. Vsako oglišče predstavlja kubični

volumen, imenovan celica. Vsaka celica, ki vsebuje podatke, se nadalje razdeli na osem polnih celic velikosti osmine originalne celice (Vosselman in Maas, 2010). Metoda Kd drevesa omogoča organizacijo točk v k-razsežnostih. Oblak točk nepravilno razdelimo na štiri celice velikosti ene četrte v smeri navzdol, dokler ne najdemo najboljše prilegajoče ravnine glede na srednjo vrednost kvadratov. Uporablja se pri iskanju najbližjih sosedov (Dewez et al., 2016; Vosselman in Maas, 2010). Metoda hitrega širjenja pravilno razdeli oblak točk na podlagi strukture osmiškega drevesa. Vendar pa pri uporabi slednje metode lahko dobimo nerealno dolge in ozke ploskve diskontinuitet (Dewez et al., 2016). Rezultat uporabljenih postopkov 3D segmentacije oblaka so sistemi ravnih poligonov, ki se prilegajo oblaku točk. Ploskve nato združimo na podlagi podobne orientacije v posamezne ploskve ali družine ploskev.



Slika 3.19: Ponazoritev metod za segmentacijo oblaka točk: a. Osmiško drevo; b. Kd drevo. Kd drevo se bolje prilagaja podatkom kot osmiško drevo (po Vosselman in Maas, 2010, str. 62).

Figure 3.19: Presentation of methods for point cloud segmentation: a. Octree; b. Kd tree. The Kd tree adapts better to the given data than the octree (after Vosselman in Maas, 2010, pp. 62).

Za drugo fazo obdelave zajetih podatkov je bilo v preteklih letih veliko raziskav in razvili so algoritme npr. za filtriranje tal in vegetacije. Uveljavljajo se tudi računalniški programi, v katerih lahko zajete podatke registriramo in georeferenciramo, urejamo oblake točk ter jih analiziramo za različne namene. Najbolj razširjena sta računalniška programa, ki podpirata tako delo z oblaki točk, kot tudi z nepravilno triangulirano mrežo: CloudCompare (CloudCompare v.2.6.1, 2016) in MeshLab (Cignoni et al., 2008).

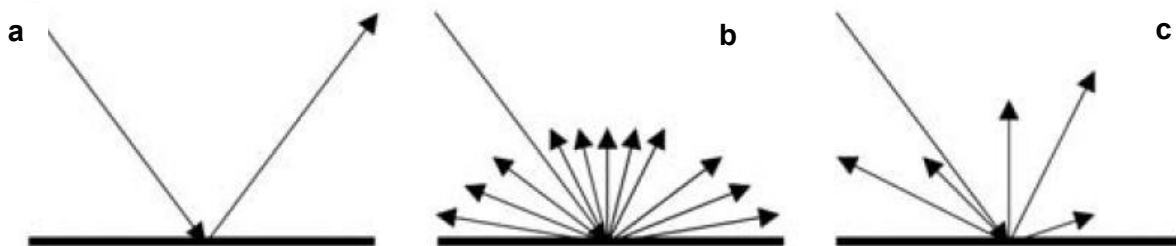
3.3.4 Intenziteta odboja laserskega žarka

Poleg prostorskih podatkov skeniranih elementov, beležijo 3D laserski skenerji tudi intenziteto odboja laserskega žarka. Pri skeniranju se laserski žarki proti površju pošiljajo naključno. Ko žarek zadane predmet (površje), se del njegovega elektromagnetnega sevanja odbije od

površine. Površina prejeto energijo $E_{I\lambda}$ (J) delno odbije R_{λ} (J), prenese T_{λ} (J) in/ali vsrka A_{λ} (J) po enačbi (8) (Heritage in Large, 2009):

$$E_{I\lambda} = E_{R\lambda} + E_{T\lambda} + E_{A\lambda} \quad (8)$$

Odboj je definiran kot razmerje jakosti odbitega signala v primerjavi z oddanim signalom. Signal se od površine odbije v različnih oblikah: zrcalno, razpršeno ali kombinirano (Slika 3.19). Pri zrcalnem odboju je kot odboja enak vpadnemu kotu signala in posledično ne prejmemo signala v smeri vira. Zrcalni odboj je značilen za površine, katerih hrapavost je manjša od valovne dolžine signala, kot je na primer stoječa voda. V primeru, da je hrapavost površine večja od valovne dolžine signala, se signal enakomerno odbije v vse smeri. Pri razpršenem odboju se del energije vrne k viru. Za površine v naravi pa je značilen predvsem kombiniran odboj.



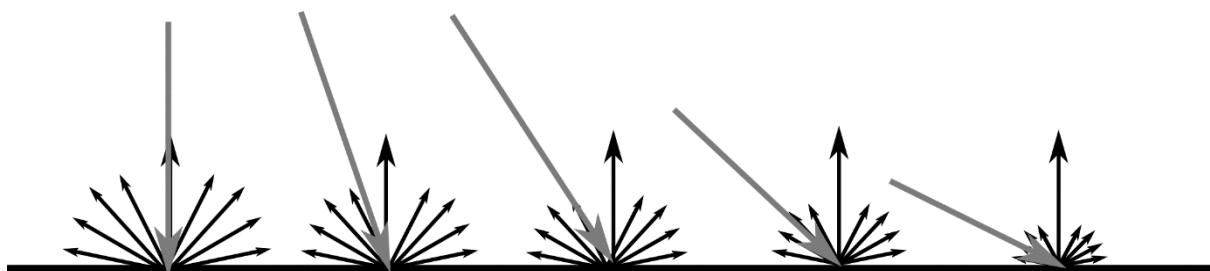
Slika 3.20: Vrste odboja signala: a. Zrcalni odboj; b. Razpršeni odboj; c. Kombinirani odboj (po Heritage in Large, 2009).

Figure 3.20: Types of surface reflection: a. Specular reflection; b. Diffuse reflection; c. Mixed reflection (after Heritage in Large, 2009).

Intenziteta odboja laserskega žarka (jakost signala) je odvisna od geometrije med virom laserskega žarka in skenirano površino, odbojnih lastnosti skenirane površine glede na valovno dolžino laserskega žarka in atmosferskih pogojev. Na jakost odboja laserskega žarka vplivata oddaljenost od skenirane površine ter vpadni kot skeniranja (Burton et al., 2011). Pri razpršenem odboju je jakost odbitega laserskega žarka proporcionalna kosinusu kota med vpadnim kotom in normalni na površino (Lambertov kosinusni zakon). Večji kot je vpadni kot, manjša je jakost odbitega laserskega žarka in posledično je tudi površina temnejša (Slika 3.21).

Na vrednost intenzitete odboja laserskega žarka vplivajo tudi odbojne lastnosti skenirane površine, ki so odvisne predvsem od fizikalnih in kemijskih lastnosti (Pesci et al., 2008; Burton et al., 2011), kar omogoča razlikovanje med površinami, ki imajo različno sestavo, kot so na

primer kamnine. Poleg tega pa je vrednost intenzitete odboja odvisna od atmosferskih pogojev, kot je temperatura in vlažnost zraka ter prah v zraku (Burton et al., 2011).



Slika 3.21: Prikaz jakosti odbite svetlobe v odvisnosti od vpadnega kota po Lambertovem kosinusnem zakonu. Večji kot je vpadni kot, manjša je jakost odbite svetlobe. Posledično je površina manj svetla.

Figure 3.21: Presentation of the power of the backscattered signal relative to the angle of incidence based on the Lambertian cosine law. Greater the incidence angle, lower is the power of the backscattered signal and the scanned surface is darker.

Intenziteta odboja laserskega žarka pri terestričnem laserskem skenerju ni pretvorjena v fizikalne enote, ker merimo količino odbitega signala od skenirane površine. Posledično so vrednosti intenzitete odboja značilne za uporabljeni instrument. Impulzni terestrični laserski skener Riegl VZ-400 podaja vrednost amplitude oziroma intenzitete signala prejetega impulza v intervalih, na primer 0...1, 0...255, 0...65,535 (Riegl LMS GmbH, 2011). Pri podajanju izmerjenih vrednosti TLS-RAW intenzitete odboja sem uporabila interval brezdimenzijskih vrednosti med 0 in 1.

3.3.5 Uporaba TLS v inženirski geologiji

Število analiz pridobljenih s terestričnim laserskim skeniranjem, je še vedno v porastu. Številne natančno izmerjene in georeferencirane točke obravnavanega območja v večini primerov uspešno nadomeščajo in obenem nadgrajujejo do sedaj uporabljene metode zajemanja podatkov. Poleg tega se tako v naravi kot na drugih področjih soočamo z zapletenimi površinami in nedostopnostjo, zato je tudi natančnost meritev omejena. Terestrično lasersko skeniranje je najbolj razširjeno na področju geodezije in gradbeništva, uporablja pa se tudi pri dokumentiranju kulturne dediščine ter v industriji. Doprinos terestričnega laserskega skeniranja so kmalu prepoznali geologi, ki so se pri geološkem kartiranju in geološki spremljavi soočali s težko dostopnimi in nedostopnimi izdanki hribine, zaradi česar je bil obseg meritev velikokrat majhen in subjektiven.

Na področju geologije so se raziskave meritev s TLS pričele kot osnova za izdelavo digitalnega modela reliefa, ki so ga nadgradili s terenskimi meritvami za predstavitev litologije (Telling et al., 2017). Raziskave uporabnosti fotogrametrije in TLS v geologiji so se ločile predvsem na

dve področji, in sicer na določanje geometrijskih lastnosti diskontinuitet ter na analizo intenzitete odboja laserskega žarka, z namenom razločevanja med litološkimi enotami obravnavanega površinskega izdanka.

Raziskave na področju inženirske geologije se dopolnjujejo z raziskavami strukturne geologije, ki se navezujejo na izmero geometrije hribine na površinskem izdanku ali izkopnem čelu. Poudarek raziskav je bil predvsem na določanju orientacije, gostote diskontinuitet ter njihovemu raztezanju. V času vpeljevanja terestričnega laserskega skeniranja na področje geologije so raziskovalci preverjali njegovo uporabo, napake in predlagali metodologijo terenskega dela (Telling et al., 2017; Lato et al., 2009; Sturzenegger et al., 2007). Doprinos terestričnega laserskega skenerja pri karakterizaciji in orientaciji diskontinuitet sta predstavila Sturzenegger in Stead (2009). Zajete podatke sta med drugim združila s fotogrametrično zajetimi podatki. Slob et al. (2002) so predstavili metodologijo avtomatskega prepoznavanja diskontinuitet na podlagi 3D Delaunayeve triangulacije ploskev. Podobno so Olariu et al. (2008) uporabili TLS v sklopu prepoznavanja glavnih diskontinuitet in določanja njihove orientacije. Razvili so metodologijo za avtomatsko lociranje in prepoznavanje diskontinuitet, določanje njihove lokacije, orientacije ter porazdelitve. Dewez et al. (2016) so segmentirali oblak točk z metodama Kd drevesa in hitrega širjenja, na podlagi katerih so združevali točke s podobnimi lastnostmi. Kot rezultat so dobili sisteme poligonov s podobno orientacijo, ki predstavljajo glavne sisteme diskontinuitet opazovanega skeniranega izdanka. Svoja dognanja so vključili v vtičnik Facets za računalniški program CloudCompare. Guo et al. (2017) pa so predstavili metodo za polavtomatsko določitev glavnih sistemov diskontinuitet ter njihove orientacije iz oblaka točk. Za polavtomatsko analizo oblaka točk iz TLS se uveljavlja tudi program DSE (Riquelme et al., 2014), ki je bil razvit v programu Matlab.

Sturzenegger (2010) je svoje raziskave temeljil na prepričanju, da se diskontinuitete, zasnovane na 3D modelih iz bližnjeliskovne fotogrametrije in terestričnega laserskega skeniranja, smatrajo kot ravne in okrogle ploskve. Posledično je predvideval, da je določanje gostote sistemov diskontinuitet neposredno povezano z določanjem njihove orientacije. Gostota posameznih sistemov je odvisna od obsega opazovalnega okna, katerega optimalno velikost je določil na podlagi primerjave. Podoben pristop je uporabil tudi Sturzenegger (2010) za oceno raztezanja diskontinuitet. Pri tem pristopu nastopi težava, ker je za določitev sledi diskontinuitete potrebno najprej določiti njen rob, kar pa je v primeru oblaka točk težje določljivo, predvsem pri ploskvah diskontinuitet, ki so vzporedne vidnemu polju. Podoben pristop so predlagali tudi Mauldon (1998) ter Zhang in Einstein (1998).

Določanje hrapavosti diskontinuitet na podlagi terestričnega laserskega skeniranja je povezano z raziskavami parametrov, ki vplivajo na strižno trdnost kamnine. Največji problem pri tem predstavlja dejstvo, kako izmeriti in ovrednotiti hrapavost, da lahko vpeljemo morfološki pogled diskontinuitete v kriterij strižne trdnosti. Grasselli (2001) je v sklopu raziskav predlagal empirično oceno hrapavosti ter njihovo korelacijo z vrednostmi JRC (Barton in Choubey, 1977) na podlagi laboratorijskih testov strižne trdnosti. Fifer Bizjak (2010) pa je s 3D optičnim skenerjem preverila določitev koeficienta hrapavosti, ki pokazal dobro korelacijo z vrednostmi JRC. Pri določanju hrapavosti iz oblaka točk predstavlja največji problem premajhna ločljivost oblaka točk oziroma disperzija laserskega žarka z razdaljo skeniranja. Posledično je premer laserskega žarka na skenirani površini večji od amplitude profila hrapavosti površine diskontinuitete, kar je pomembno predvsem pri analizi strižne trdnosti. Doprinos k boljši oceni hrapavosti diskontinuitete z metodo odpravljanja šuma valovne dolžine laserskega žarka ter fraktalnih dimenzij so predstavili Khoshelham et al. (2011). Tudi Mah et al. (2013) so preverili možnost določanja hrapavosti za nadaljnjo primerjavo z 2D Bartonovimi profili JRC. Z določanjem hrapavosti površine diskontinuitet iz meritev terestričnega laserskega skeniranja so se ukvarjali tudi strukturni geologi, kot na primer Sagy et al. (2007) in Bistacchi et al. (2011), vendar so analizirali predvsem večje prelomne ploskve. Raziskave so bile namenjene razumevanju strukturnih procesov vzdolž prelomov.

Usmerjene raziskave o uporabi TLS na področju inženirske geologije so izvajali predvsem za analize geometrije plazovitih območij ter pripravi in izvedbi monitoringa pomikov (Sturzenegger et al., 2007; Teza et al., 2008; Traveletti et al., 2008; Schürch et al., 2011; Oppikofer et al., 2012). Pregled uporabe lidarskih meritev na področju nevarnosti plazov so pripravili Jaboyedoff et al. (2010). Vključili so tako uporabo aerolaserskega kot tudi terestričnega laserskega skeniranja.

Na področju nevarnosti skalnih podorov so se raziskovalci ukvarjali s karakterizacijo skalnih pobočij na podlagi podatkov iz terestričnega laserskega skeniranja (Jaboyedoff et al., 2008; Pedrazzini et al., 2010; Abellan et al., 2009; Heckmann et al., 2011; Carrea et al., 2015). Pri analizi skalnih podorov karakteriziramo hribino predvsem z določanjem glavnih sistemov diskontinuitet in njihove orientacije, ki vplivajo na stabilnost skalnega pobočja. Na podlagi prepoznanih glavnih sistemov diskontinuitet in morfologije obravnavanega območja, lahko ocenimo volumen, možen potek in posledično obseg podora. V okviru raziskav iz področja karakterizacije hribine na skalnih pobočjih so Jaboyedoff et al. (2007) razvili računalniški program Coltop3D, ki omogoča strukturno analizo skalnega pobočja, s pomočjo katere določimo glavne sisteme diskontinuitet, ki prevladujejo na obravnavanem območju in vplivajo na njegovo stabilnost. Z razvojem programa je naraslo tudi število objav v zvezi z analizo

stabilnosti blokov na skalnih pobočjih (Oppikofer et al., 2009; Lato et al., 2010; Brideau et al., 2012; Tonini in Abellan, 2014; Olsen et al., 2015; Kromer et al., 2015; Strunden et al., 2015)

Uporaba terestričnega laserskega skenerja ima na področju geološke spremljave v predorogradnji manjše število objav. Podobno kot v primeru skalnih pobočij sta se Fekete in Diederichs (2013) posvetila karakterizaciji hribine na izkopnem čelu za nadaljnjo analizo kinematskih mehanizmov porušitve v predorogradnji. Hribina na izkopnem čelu je imela jasno izražene diskontinuitete, kar je pripomoglo k uspešni analizi geometrije hribine.

Druga veja raziskovalcev se je usmerila v proučevanje vplivov različnih parametrov na vrednost intenzitete odboja laserskega žarka pri analizi virtualnega modela izdanka. Vrednost intenzitete odboja laserskega žarka je, poleg razdalje skeniranja in vpadnega kota laserskega žarka, odvisna od fizikalnih lastnosti in kemijske sestave skenirane površine. Vrednost intenzitete odboja laserskega žarka lahko korigiramo glede na oddaljenost od skenirane površine ter vpadnega kota skeniranja. Rezultat predstavlja normalizirana vrednost intenzitete odboja, ki je sorazmerna odbojnosti skenirane površine, na podlagi katere lahko klasificiramo površino glede na litološko sestavo (Pesci et al., 2008; Pfeifer et al., 2007; Burton et al., 2011). Razdalja 3D laserskega skeniranja vpliva na vrednost intenzitete odboja, ki pada s kvadratom razdalje ($1/R^2$). Kaasalainen et al. (2011) so na podlagi rezultatov raziskav ugotovili, da obstajajo razlike med uporabljenimi inštrumenti, ter da v primeru 3D laserskega skeniranja na krajših razdaljah (do 50 m) velja:

- vrednosti intenzitete odboja do razdalje približno 10 m ne sledijo napovedi $1/R^2$,
- višje vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka do razdalje 10 m predstavljajo sistematične napake, ki so prisotne pri meritvah na krajših razdaljah.

Z raziskavami odvisnosti intenzitete odboja od razdalje 3D laserskega skeniranja so nadaljevali Burton et al. (2011) in Humair et al. (2015). Ugotovili so, da je vpliv razdalje potrebno upoštevati predvsem pri terestričnem laserskem skeniranju srednje dolgega in dolgega dosega, in sicer pri razdaljah nad 100 m. Bellian et al. (2005) so proučevali intenziteto odboja v povezavi z ostalimi atributi, na podlagi katerih bi lahko bolje prepoznali litološke spremembe. Leta 2009 so Franceschi et al. proučevali možnost uporabe TLS za razlikovanje med srednje plastnatimi apnenci in laporovci, ki so gradili heterogeno hribino. Rezultati so pokazali, da je vrednost intenzitete odboja obratno sorazmerna vsebnosti mineralov glin v kamninah in premo sorazmerna vsebnosti karbonata. Podobno so Burton et al. (2011) objavili rezultate raziskav za razločevanje med tankimi plastmi peščenjaka in skrilavega glinavca, ki so gradile izdanek heterogene hribine. Medtem ko je bila vrednost intenzitete odboja obratno sorazmerna masnemu deležu glin, je bila premo sorazmerna deležu seštevka vsote kremena

in glinencev. Žal pa analize niso razvijali dalje v smeri možnosti določanja deleža posameznih litoloških enot. Pri skeniranju preperelega površinskega izdanka heterogene hribine so opazili, da stopnja preperevanja in stopnja vlažnosti zmanjšujeta kontrast med intervali, posebno pri mokrih površinah, saj voda absorbira laserski žarek. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi Lu et al. (2005) in Franceschi et al. (2009), zato ni priporočljivo skenirati površinskih izdankov v vlažnih pogojih. S prepoznavanjem plasti in gomoljev rožencev v apnencu so se ukvarjali Penasa et al. (2014). Podali so metodo, na podlagi katere bi lahko razločevali roženec od okoliške vegetacije. Carrea et al. (2016) so na osnovi raziskav vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka ugotovili, da je možno vpeljati korekcijo intenzitete odboja, če upoštevamo oddaljenost skeniranja, njegov vpadni kot ter hrapavost skenirane površine. Matasci et al. (2015) so z uporabo intenzitete odboja poskušali ločiti tipe kamnin in določiti strukture gube na 1200 m oddaljeni gorski steni.

Glede na to, da predstavlja zajem podatkov površinskih izdankov in izkopnih čel s pomočjo terestričnega laserskega skeniranja podporo geološkemu kartiranju in geološki spremljavi, so raziskovalci težili k uporabi podatkov za pripravo virtualnega digitalnega modela izdanka. S tem bi zajeli obravnavano območje za detajlno analizo v pisarni, shrambo podatkov in gradnjo podatkovne baze za kasnejše obdelave v druge namene. Predvsem na področju izkopa v kamnolomu in predoru predstavlja digitalno zajeto izkopno čelo pomemben podatek, ker hribine in s tem geološke informacije po izkopu več ni. Leta 2007 so Kokkalas et al. predstavili metodologijo izdelave 3D virtualnega izdanka na osnovi TIN ploskev, kot podporo pri detajlnem določanju struktur prelomov in njihovih analiz. Seers in Hodgetts (2013) sta predstavila metodologijo izdelave virtualnega izdanka na osnovi podatkov iz terestričnega laserskega skeniranja in fotogrametričnega snemanja, s katerimi sta izdelala fotorealističen oblak točk. Njegov namen je bil detajlni geološki popis obravnavanega izdanka, ki omogoča določitev glavnih sistemov diskontinuitete, njihovo orientacijo, dolžino in gostoto. Na podlagi raziskav je Hodgetts (2016) razvil računalniški program VRGS za digitalno modeliranje in geološki popis izdankov.

Terestrično lasersko skeniranje predstavlja za področje inženirske geologije pomemben doprinos k hitrejši, natančnejši, objektivni brezkontaktni geološki analizi izdankov. S pomočjo TLS dobimo koordinate skeniranega objekta praktično v realnem času, pri čemer je zajeto večje območje, tako da velikokrat dodatne meritve niso potrebne. Zajemamo lahko oddaljena in težko dostopna območja, in kakovost zajema lahko preverimo že na samem terenu. V primeru, da ima instrument nameščen digitalni fotoaparatus, dobimo tudi obarvan lidarski oblak točk. Kljub številnim prednostim pa predstavljajo velikost in teža instrumenta ter veliko dodatne opreme, ki vplivajo na delovanje instrumenta, še vedno omejitev pri širši uporabi na področju

inženirske geologije. Glede na to, da vplivajo na intenziteto odboja laserskega žarka atmosferski pogoji in odsevnost skenirane površine, lahko pride do nezadostnega odboja in posledično do manj kakovostnega oblaka točk, ki lahko vključuje tudi šume zaradi odboja od drugih objektov. Poseben izziv predstavlja možnost shranjevanja in obdelave oblakov točk, saj se z naraščanjem obsega zajetih podatkov, podaljša tudi njihova obdelava, zato je pred izvedbo meritev priporočljivo definirati namen meritev in s tem okvirno izbrati tudi želeno ločljivost. Nekatere slabosti uspešno odpravlja fotogrametrija, zato sta ti dve metodi med seboj komplementarni (Balon, 2007; Heritage in Large, 2009).

V doktorski disertaciji sem predstavljene metode, kot so ročni zajem, bližnjleslikovno fotogrametrijo in terestrično lasersko skeniranje, uporabila za zajem podatkov na izbranih lokacijah izkopa v flišu: v predoru Markovec med Koprom in Izolo, v podzemni garaži Park San Giusto v Trstu in v kamnolomu Elerji pri Škofijah. Bližnjleslikovno fotogrametrijo sem uporabila za določitev geometrijskih lastnosti diskontinuitet, terestrično lasersko skeniranje pa tako za določitev geometrijskih lastnosti diskontinuitet, kot tudi za določitev litologije, stopnje preperevanja in stopnje vlažnosti iz vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka. Rezultate sem primerjala z ročnim zajemom podatkov.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

V poglavju predstavljam rezultate meritev, ki sem jih izvedla v sklopu doktorske disertacije, skupaj z razpravo. V uvodnem delu poglavja bom najprej predstavila raziskave, ki so bile pomembne za razumevanje bližnjelikovne fotogrametrije in terestričnega laserskega skeniranja, njihovih zahtev, omejitev in dejavnikov, ki vplivajo na zajem podatkov ter nadaljnjo analizo. Sledijo ločene predstavitev izbranih lokacij, na katerih sem izvedla meritve: predor Markovec, podzemna garaža Park San Giusto in kamnolom Elerji. Izbrane lokacije bom najprej na splošno predstavila, podala pregled uporabljenih metod in zaključila s predstavitvijo rezultatov, iz katerih bo sledila razprava.

V sklopu disertacije sem želela na področju inženirske geologije primerjati uporabo terestričnega laserskega skeniranja in fotogrametrije z ročnim zajemom podatkov pri določanju litologije in značilnosti diskontinuitet v flišu. Zaradi heterogene sestave in prevladujočih tanjših plasti temelji karakterizacija inženirsko-geoloških lastnosti fliša na grobi oceni deleža posameznih litoloških enot in statistično neznačilnem zajemu lastnosti diskontinuitet. Ne glede na to, da se TLS in fotogrametrija vedno bolj uveljavljata tudi na področju inženirske geologije, predstavljajo tankoplastnate heterogene hribine poseben inženirsko-geološki izziv. Za pravilno interpretacijo rezultatov smo zato izvedli detajlne analize, ki bi pripomogle k boljšemu načrtovanju zajema podatkov, izvedbi in njihovi interpretaciji ter posledično k večji objektivnosti izvedenih raziskav. Pri analizi litološke sestave v odvisnosti od vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka smo detajlno skenirali vzorce glavnih litoloških enot, ki gradijo fliš. Primerjali smo vrednosti intenzitete odboja v odvisnosti od litološke sestave, stopnje prepevanja in stopnje vlažnosti pri različni razdalji skeniranja. Pri izboru uporabljenih metod sem izbrala bližnjelikovno fotogrametrijo in terestrično lasersko skeniranje, ki sem ju primerjala z uveljavljenim ročnim zajemom. Izbrane metode imajo svoje zahteve za zajem in georeferenciranje, zato smo, poleg preverbe prepoznavanja kodiranih tarč v odvisnosti od razdalje, izvedli tudi obsežno geometrično analizo uporabljenih tehnologij ter jih primerjali z referenčno geodetsko izmero, izvedeno s tahimetrom.

4.1 Detajlno skeniranje vzorcev s TLS

Uporabljeni TLS Riegl VZ-400 oddaja laserski žarek v impulzih, ki potujejo skozi zrak do ciljnega objekta ter se od njega najpogosteje razpršeno odbijejo nazaj do instrumenta. Laserski skener zagotavlja kalibrirano vrednost amplitude oz. intenzitete odboja laserskega žarka. Opisuje lastnost moči prejetega signala in je definirana kot razmerje med dejansko zabeleženo optično amplitudo in pragom zaznavanja. Jakost signala je odvisna od odsevne sposobnosti skeniranega objekta, razdalje skeniranja ter atmosferskih pogojev (Riegl LMS GmbH, 2011). Glavni parametri, ki vplivajo na vrednost intenzitete odboja laserskega žarka so predstavljaljo osnovo detajlnega skeniranja. Želeli smo preveriti, ali pomembno vplivajo na vrednost intenzitete odboja tudi pri krajših do srednje dolgih razdaljah, na katerih se izvaja geološka spremljava izkopnih čel. Kaasalainen et al. (2011) so na podlagi rezultatov ugotovili, da pri razdaljah do 10 m, vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka ne sledijo napovedi $1/R^2$ in je razmerje odvisno od uporabljenega instrumenta. Humair et al. (2015) pa so z dodatnimi raziskavami predlagali diagram odvisnosti razpona intenzitete odboja od oddaljenosti od tarče, pri katerem spodnjo mejo relacijskega diagrama določili na razdalji 30 m.

V sklopu karakterizacije heterogene hribine, ki jo sestavljajo različne kamnine, je zato pri skeniranju s TLS pomembno razumevanje, kako parametri, kot so litološka sestava, stopnja vlažnosti in stopnja preperevanja, vplivajo na vrednost intenzitete odboja laserskega žarka. Zaradi dostopnosti in ugodnih geoloških značilnosti fliša sem kamnolom Elerji lahko uporabila kot testno polje uporabe izbranih metod daljinskega zaznavanja, kot sta terestrično lasersko skeniranje in bližnjleslikovna fotogrametrija. V kamnolomu je bilo odvzetih šest vzorcev: štiri vzorci peščenjaka (PE-01 do PE-04) ter dva vzorca laporovca (LE-01 in LE-02). Vzorci PE-01 do PE-04 so predstavljaljo sive, nepreperle do rahlo preperle srednjezrnate peščenjake. Na robovih je že potekalo značilno conarno preperevanje peščenjaka, zato je bila tam kamnina rahlo preperela. Pri vzorcu PE-04 sem se v sklopu laserskega skeniranja osredotočila na površino diskontinuitete, ki je predstavljaljo razpoko. Površina diskontinuitete je bila močno preperela in oksidirana. Vzorca LE-01 in LE-02 sta predstavljaljo siva, nepreperela laporovca. Pri preperevanju laporovca pride do hitrega razpada kamnine, zato ni bilo mogoče odvzeti preperelega vzorca.

Detajlno skeniranje smo izvedli dne 01. 04. 2016, v sodelovanju s podjetjem DFG Consulting d.o.o. Uporabili smo TLS Riegl VZ-400 z nameščenim DSLR (digitalnim zrcalno-refleksnim) fotoaparatom Nikon D700. Z detajlnim skeniranjem sem želela preveriti faktorje, ki vplivajo na vrednost intenzitete odboja laserskega žarka, v primeru skeniranja izdankov in izkopnih čel. Vzorce smo skenirali na razdaljah 5 m, 10 m, 20 m in 25 m (Slika 4.1). Na vseh razdaljah smo

skenirali vzorce v suhem in vlažnem stanju kamnine (Slika 4.2 a in b). Pri vlaženju vzorcev laporovca pa sem ugotovila, da le-ta zelo hitro razpada, zato smo skeniranje vzorcev v mokrem stanju izvedli samo na razdaljah 5 m in 20 m. Pred vsakim sklopom meritev sem izmerila temperaturo in relativno vlago zraka. Preglednica 4.1 prikazuje izmerjeno temperaturo in relativno vlago ter uporabljeno ločljivost skeniranja tako za pregledno skeniranje vseh vzorcev, kot detajlno skeniranje posameznih vzorcev.



Slika 4.1: Detajlno terestrično lasersko skeniranje vzorcev kamnin fliša: a. Pogled na izbrane vzorce peščenjaka (PE-01 do PE-04) in laporovca (LE-01 in LE-02), odvzetih v kamnolomu Elerji; b. Posnetek laserskega skeniranja vzorcev. Vzorci so bili skenirani na razdaljah 5 m, 10 m, 20 m in 25 m, v suhem, vlažnem in mokrem stanju. Skeniranje se je izvedlo s skenerjem Riegl VZ-400.

Figure 4.1: Detailed terrestrial laser scanning of flysch rock samples: a. View on selected samples of sandstone (PE-01 to PE-04) and marlstone (LE-01 and LE-02), taken from the Elerji quarry; b. Scan of the samples. Samples were scanned from distances 5 m, 10 m, 20 m in 25 m, in dry, damp and wet conditions. Scanning was performed using TLS Riegl VZ-400.

Analizo oblaka točk terestričnega laserskega skeniranja sem izvedla v programu RiSCAN Pro v.1.8.0 (Riegl LMS GmbH, 2011). Pregledala sem oblake točk detajlno skeniranih vzorcev pri različni stopnji vlažnosti in na posamezni oddaljenosti od skenerja. V sklopu analize sem izbrala različno velike notranje segmente nepreperle in preperle kamnine (Slika 4.2 c). S takim pristopom sem želela zbrati najbolj reprezentativne podatke za nadaljnjo statistično analizo. Vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka, ki so bile uporabljene pri statistični

analizi, predstavljajo brezdimenzijske surove TLS vrednosti intenzitete (»*TLS-RAW*«), in sicer v intervalu od 0 do 1.

Preglednica 4.1: Pregled atmosferskih pogojev ter ločljivosti skeniranja pri različnih sklopih detajlnega skeniranja izbranih vzorcev peščenjaka in laporovca iz kamnoloma Elerji. Detajlno skeniranje se je izvajalo pri treh različnih stopnjah vlažnosti: suho, vlažno in mokro stanje, na razdaljah 5 m, 10 m, 20 m in 25 m.

Table 4.1: Overview of atmospheric conditions during the individual detailed scanning of selected samples of sandstone and marlstone from the Elerji quarry. Detailed scanning was performed in three different moisture degree: dry, damp and wet, at distances 5 m, 10 m, 20 m and 25 m.

I. Stopnja vlažnosti:		Suho		
Razdalja [m]	Temp. [°C]	Vlaga [%]	Ločljivost skeniranja [mm/m]	
			Pregledni sken	Detajlni sken
5	23,8	39,8	0,5 / 5	1 / 10
10	26,0	37,5	0,5 / 10	1 / 20
20	21,8	43,0	0,5 / 20	1 / 40
25	22,5	41,0	0,5 / 25	1 / 50

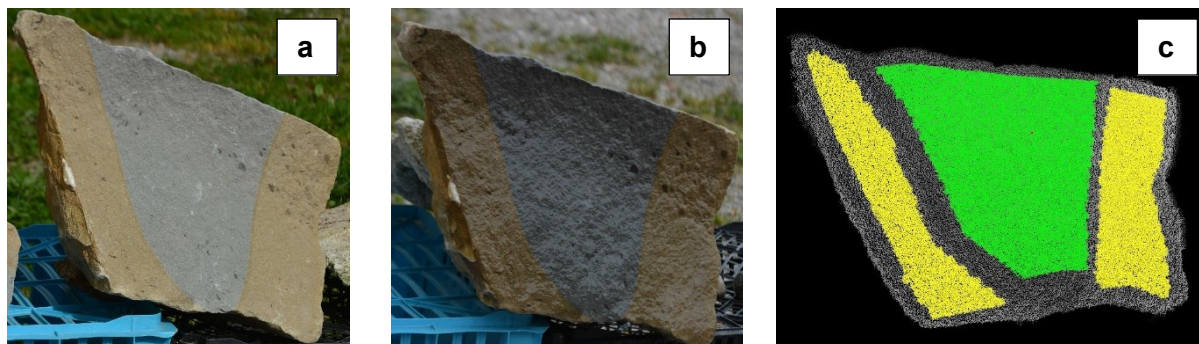
II. Stopnja vlažnosti:		Vlažno		
Razdalja [m]	Temp. [°C]	Vlaga [%]	Ločljivost skeniranja [mm/m]	
			Pregledni sken	Detajlni sken
5	22,0	42,6	0,5 / 5	1 / 10
10	21,6	44,0	0,5 / 10	1 / 20
20	21,5	43,1	0,5 / 20	1 / 40
25	23,5	41,0	0,5 / 25	1 / 50

II. Stopnja vlažnosti:		Mokro		
Razdalja [m]	Temp. [°C]	Vlaga [%]	Ločljivost skeniranja [mm/m]	
			Pregledni sken	Detajlni sken
5	22,3	42,0	0,5 / 5	1 / 10
10*	-	-	-	-
20	21,6	45,5	0,5 / 20	1 / 40
25*	-	-	-	-

* Zaradi hitrega razpadanja vzorcev laporovca ob močenju vzorcev z vodo smo izvedli skeniranje samo na dveh razdaljah. / *Due to the fast disintegration of marlstone during the wetting, we performed scanning only at two distances.*

Zaradi velikega števila točk sem splošno statistično analizo izvedla v programu Matlab. Skupaj je bilo zbranih 5.615.303 vrednosti intenzitete odboja laporovca in 3.600.710 vrednosti intenzitete odboja peščenjaka. Glede na to, da so vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW odvisne od razdalje do opazovane tarče, sem pri analizi upoštevala relacijski diagram, ki so ga Humair et al. (2015) empirično določili. Detajlno skeniranje smo izvedli do razdalje 25 m, ki

leži pod spodnjo mejo relacijskega diagrama, zato niso bile vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW popravljene glede na oddaljenost od opazovanega objekta.

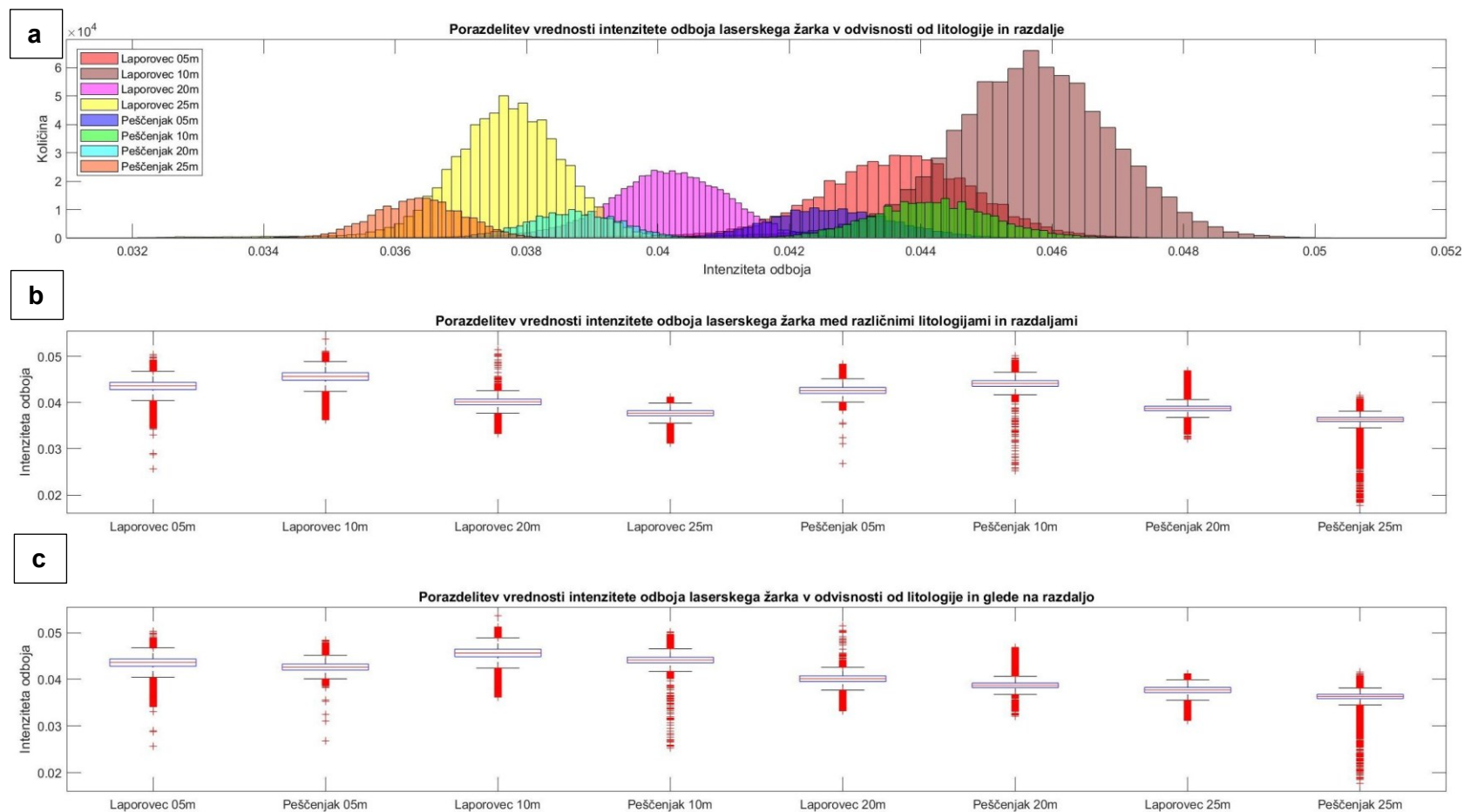


Slika 4.2: Izbrani vzorec peščenjaka PE-02 iz kamnoloma Elerji. Vzorce smo skenirali v suhem (a), vlažnem in mokrem (b) stanju, pri analizi oblaka točk pa smo nadalje ločeno izbrali odseke sveže in preperele kamnine (c). Tako analizo oblaka točk smo izvedli za vsako izbrano razdaljo: 5 m, 10 m, 20 m in 25 m.

Figure 4.2: Selected sandstone sample PE-02 from the Elerji quarry. Samples were scanned in dry (a), damp and wet (b) conditions, in the analysis of the point cloud areas of fresh and weathered rock has been selected separately (c). This kind of analysis was performed for every selected distance: 5 m, 10 m, 20 m and 25 m.

4.1.1 Odvisnost intenzitete odboja laserskega žarka od litologije in razdalje

Za heterogeno hribino je značilno ciklično menjavanje posameznih litoloških enot z različno sestavo in geomehanskimi parametri. Analizo sem zato izvedla najprej za primerjavo vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka v odvisnosti od litološke sestave (Slika 4.3). Odseke različne litologije (peščenjaka in laporovca) sem primerjala v odvisnosti od razdalje skeniranja. Vrednosti intenzitete odboja so na podlagi histograma (Slika 4.3 a) normalno porazdeljene in se ločijo glede na litologijo in oddaljenost. Opazno je edino prekrivanje vrednosti intenzitete odboja pri laporovcu, skeniranem na oddaljenosti 10 m in peščenjaka, skeniranem na oddaljenosti 5 m in 10 m. V analizi sem uporabila lidarski oblak točk z velikim številom podatkov (3.338.045 vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW). Razlike med skupinami so statistično značilne, kar se vidi iz rezultatov t-testa ter iz histograma (Slika 4.3). Preverbo razlik sem izvedla s standardnim t-testom s predpostavko (ničelno domnevo), da sta povprečji dveh testiranih skupin enaki, stopnjo značilnosti sem nastavila na $\alpha = 0,05$ (5 % stopnja zaupanja). Izračunana p-vrednost je bila pod 0,01, torej precej nižja od praga 0,05, na podlagi katere lahko ničelno domnevo o enakih povprečjih zavrnamo, zaradi statistično različnih skupin.



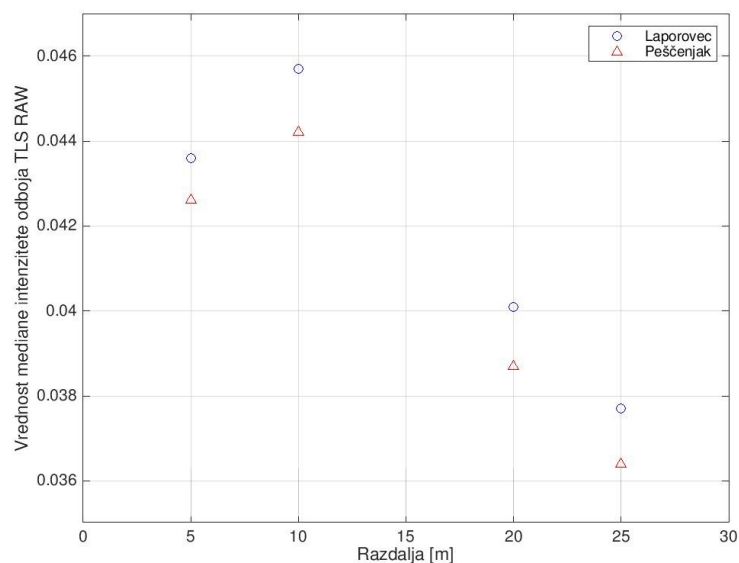
Slika 4.3: Histogram (a) in škatlasti diagram (b) porazdelitve vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW v odvisnosti od litologije (peščenjaka in laporovca) in razdalje skeniranja; c. Škatlasti diagram (angl. *box plot*) na izbranih razdaljah TLS: 5 m, 10 m, 20 m in 25 m. Okvir škatlastega diagrama predstavlja 1. in 3. kvartil, z vmesno vrednostjo mediane. Izven okvirja ležijo vrednosti nad tretjim kvartilom in pod prvim kvartilom.

Figure 4.3: Histogram (a) and box plot (b) showing the distribution of TLS-RAW intensity values depending on the lithology samples (sandstone and marlstone) and selected distance of TLS; c. Box plot showing the selected distances: 5 m, 10 m, 20 m and 25 m. The box represents the first and third quantiles as the outline, along with the median value. The outliers show values above the third quartile or values below the first quartile.

Na sliki 4.3 (b in c) sta predstavljena škatlasta (angl. *box plot*) diagrama, in sicer odvisnost intenzitete odboja od litološke sestave in razdalje skeniranja. Okvir škatle predstavljata 1. in 3. kvartil, z vmesno vrednostjo mediane. Izven okvirja ležijo vrednosti nad tretjim kvartilom in pod prvim kvartilom. Skeniranje vzorcev laporovca na razdaljah 5 m, 10 m, 20 m in 25 m nakazuje, da vrednosti intenzitete odboja iz razdalje 5 m na 10 m naraščajo, nato pa padajo do razdalje 25 m. Vrednost mediane pri skeniranju vzorca laporovca na razdalji 5 m znaša 0,043, na razdalji 10 m pa se poveča na 0,045. Z večanjem razdalje se vrednost intenzitete odboja manjša. Na razdalji 20 m znaša mediana 0,040, na razdalji 25 m pa 0,037. Podoben trend je zaslediti v primeru skeniranja vzorcev peščenjaka. Vrednost mediane znaša na razdalji 5 m 0,042, na razdalji 10 m 0,044. Pri nadaljnjem skeniranju vzorcev peščenjaka na razdaljah 20 m in 25 m vrednosti padajo. Vrednost mediane se na razdalji 20 m zniža na vrednost 0,038, na razdalji 25 m pa 0,036. Na podlagi analize smo ugotovili, da je bila v primeru detajlnega skeniranja vzorcev vrednost intenzitete odboja laserskega žarka od peščenjaka nekoliko nižja od intenzitete odboja od laporovca, vendar s podobnim trendom.

Vrednosti mediane intenzitete odboja TLS-RAW izbranih vzorcev laporovca in peščenjaka, sem ločeno primerjala glede na razdaljo skeniranja (R), da bi ugotovila, ali sledijo napovedi $1/R^2$ (Kaasalainen et al., 2011). Rezultati na sliki 4.4 kažejo podoben trend za oba tipa kamnin, kjer vrednosti intenzitete odboja naraščajo do razdalje okoli 10 m in nato padajo. Dobljeni rezultati se skladajo z ugotovitvami Kaasalainen et al. (2011), ki so bile predstavljene v poglavju 3.3.5.

Rezultati analize odvisnosti vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW od litologije in razdalje so predstavljali dobro osnovo za nadaljnje analize meritev na izbranih lokacijah ter za prihodnje delo. Ugotovitve kažejo, da so razlike med laporovcem in peščenjakom. Vrednosti intenzitete odboja naraščajo do razdalje 10 m in nato padajo, kar je potrebno upoštevati pri načrtovanju zajema izkopnega čela s terestričnim laserskim skeniranjem.



Slika 4.4: Primerjava vrednosti mediane intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka v odvisnosti od razdalje za izbrane vzorce laporovca in peščenjaka.

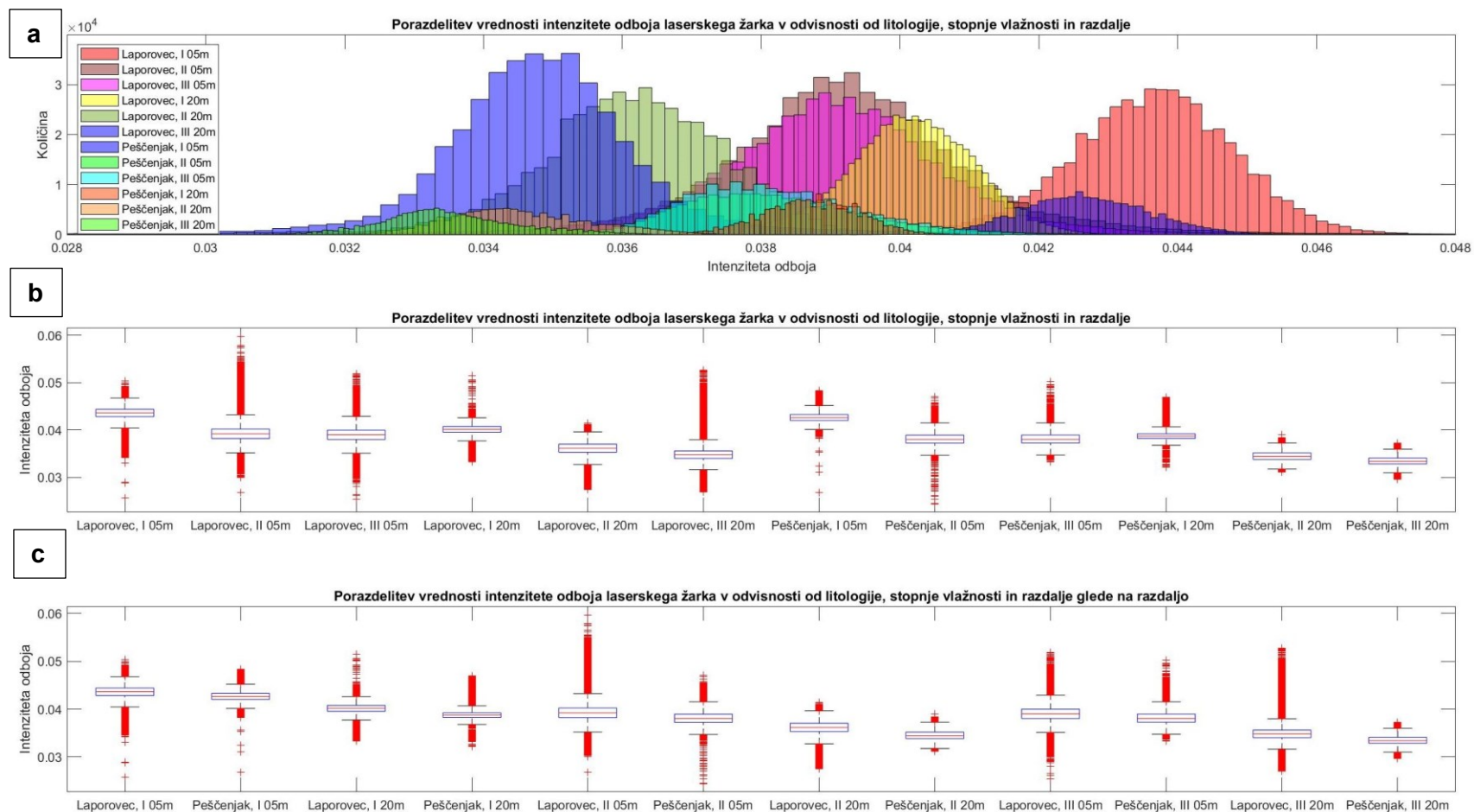
Figure 4.4: Median of TLS-RAW intensity values versus distance of selected marlstone and sandstone samples.

4.1.2 Odvisnost intenzitete odboja laserskega žarka od litologije, stopnje vlažnosti in razdalje

Inženirski geolog mora v sklopu popisa izdanka in izkopnega čela oceniti tudi stopnjo vlažnosti posamezne litološke enote. Na podlagi priporočil ISRM (Barton, 1978) se zaradi odsotnosti terenskih hidrogeoloških raziskav v času inženirsko geološkega popisa, oceni dotok vode profila hribine glede na petrazredno klasifikacijo (Poglavje 3.1.2), ki upošteva tudi meritve pretoka vode. Analizo vrednosti intenzitete odboja sem izvedla za primere, ko je hribina:

- suha (I),
- vlažna (II) in
- mokra (III).

Izbrana razdelitev okvirno sovпада s prvimi tremi razredi po priporočilih ISRM, pri ostalih razredih pa so že potrebne meritve dotoka vode, kar pa težko izvedemo na težko dostopnih izdankih in izkopnih čelih. Detajlno terestrično lasersko skeniranje vzorcev laporovca in peščenjaka pri vseh treh stopnjah vlažnosti smo izvedli samo na razdaljah 5 m in 20 m, saj je pri vlaženju vzorcev laporovca prihajalo do njegovega hitrega razpadanja. Rezultati so predstavljeni na sliki 4.5.



Slika 4.5: Histogram (a) in škatlasti diagram (b) porazdelitve vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW v odvisnosti od litologije (peščenjaka in laporovca), stopnje vlažnosti (I – suh, II – vlažen, III – moker) ter izbranih razdalj TLS; c. Škatlasti diagram na izbranih razdaljah TLS: 5 m in 20 m. Okvir škatle predstavlja 1. in 3. kvartil, z vmesno vrednostjo mediane. Izven okvirja ležijo vrednosti nad tretjim kvartilom in pod prvim kvartilom.

Figure 4.5: Histogram (a) and box plot (b) showing the distribution of TLS-RAW intensity values depending on the lithology (sandstone and marlstone), seepage (I – dry, II – damp, III - wet) and selected distance of TLS; c. Box plot showing the selected distances: 5 m and 20 m. The box represents the first and third quantiles as the outline, along with the median value. The outliers show values above the third quartile or values below the first quartile.

V analizo odvisnosti intenzitete odboja TLS-RAW od litologije, stopnje vlažnosti in razdalje je bilo vključenih 3.338.045 vrednosti. Histogram porazdelitve vrednosti intenzitete odboja za izbrano analizo (Slika 4.5 a) prikazuje, da so le-te normalno porazdeljene in se v splošnem ločijo med sabo. Izrazito je prekrivanje vrednosti na dveh območjih. Pri vlažnih in mokrih vzorcih laporovcev na razdalji 5 m (obe mediani 0,039) ter vzorcih suhega peščenjaka na razdalji 20 m (mediana 0,038). Podobno izrazito prekrivanje vrednosti intenzitete odboja je med vzorcema vlažnega in mokrega peščenjaka na oddaljenosti skeniranja 5 m (obe mediani 0,038).

Rezultati analize kažejo, da so rezultati statistično značilni. S standardnim t-testom sem izvedla preverbo razlik, in sicer s predpostavko (ničelno domnevo), da sta povprečji dveh testiranih skupin enaki, stopnjo značilnosti sem nastavila na $\alpha = 0,05$ (5 % stopnja zaupanja). Izračunana p-vrednost je bila pod 0,01, kar je precej nižje od praga 0,05, na podlagi katere lahko ničelno domnevo o enakih povprečjih zavrnemo, zaradi statistično različnih skupin.

Iz škatlastih diagramov (Slika 4.5 b in c) je opazen trend padanja vrednosti intenzitete odboja z naraščanjem stopnje vlažnosti in razdalje. Na razdalji 5 m je mediana suhega (I) vzorca laporovca 0,043, vlažnega (II) vzorca 0,039 in mokrega (III) vzorca 0,039. Na razdalji 20 m znaša mediana suhega (I) vzorca laporovca 0,040, vlažnega (II) vzorca 0,036 in mokrega (III) vzorca 0,034. Na podlagi škatlastih diagramov je med drugim razvidno, da so vrednosti intenzitete odboja detajlno skeniranih vzorcev peščenjaka nižje od vzorcev laporovca. Podobno kot v primeru vzorcev laporovca padajo tudi vrednosti intenzitete odboja vzorcev peščenjaka v odvisnosti od naraščajoče stopnje vlažnosti in razdalje. Na razdalji 5 m je mediana vzorca suhega (I) peščenjaka 0,042, vzorca vlažnega (II) peščenjaka 0,038 in mokrega (III) vzorca 0,038. Na razdalji 20 m znaša mediana suhega (I) vzorca peščenjaka 0,038, vlažnega (II) vzorca 0,034 in mokrega (III) vzorca 0,033.

V inženirski geologiji predstavljata stopnja vlažnosti in dotok vode pomembna parametra pri klasifikaciji hribine, saj vplivata tako na hitrost preperevanja hribine, kot na njeno stabilnost. Z analizo sem zato želela med drugim preveriti, kolikšne so razlike v vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka pri vlažnih in mokrih vzorcih posamezne litološke enote. Na podlagi škatlastega diagrama je razvidno, da se vrednosti pri krajših razdaljah, kot na primer 5 m, bistveno ne razlikujejo. Mediana vrednosti intenzitete odboja je tako za vzorca vlažnega (II) in mokrega (III) laporovca in peščenjaka praktično enaka. Mediana vlažnega (II) vzorca laporovca namreč znaša 0,039, vzorca mokrega (III) laporovca pa 0,039. Mediana vzorcev

vlažnega (II) in mokrega (III) peščenjaka je v obeh primerih 0,038. Na daljši razdalji (20 m) pa so razlike bolj izrazite. Mediana vzorca vlažnega (II) laporovca je 0,036, mokrega (III) laporovca pa 0,034. Tudi mediana vzorca mokrega (III) peščenjaka (0,033) je nižja od vzorca vlažnega (II) peščenjaka (0,034).

Razlike med suhimi in vlažnimi litološkimi enotami nakazujejo na odvisnost vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka od vlažnosti. Valovna dolžina laserskega žarka v primeru TLS Riegl VZ-400 (1550 nm) leži znotraj infrardečega kanala kratkega valovanja, kar ustreza močni absorpciji vode. Posledično pride na mokrih območjih skeniranega objekta do izrazite absorpcije valovnih dolžin bližnje infrardeče svetlobe, kar se odraža v nižjih vrednostih intenzitete odboja, kot sta opisala že Lu et al. (2005) in Franceschi et al. (2009). Dobljeni rezultati so bili pomembni za nadaljnje razumevanje razlik v vrednostih intenzitete odboja laserskega žarka glede na litologijo in stopnjo vlažnosti, in sicer na izbranih lokacijah izvedenih meritev ter pri vključevanju terestričnega laserskega skeniranja v geološko spremljavo izkopnega čela.

4.1.3 Odvisnost intenzitete odboja laserskega žarka od litologije, stopnje prepevanja in razdalje

Pri opisu hribine v inženirski geologiji je poleg litološke sestave pomembna tudi stopnja prepevanja, ki vpliva na trdnost kamnine ter strižno trdnost vzdolž diskontinuitet (glej poglavje 3.1.1.2). Na spremembo sestave kamnin, ki sestavljajo fliš, vpliva predvsem kemično prepevanje, ki povzroči razbarvanje in razpad nekaterih mineralov, kar med drugim pripomore k vizualnemu razlikovanju med nepreperelo in preperelo kamnino. Stopnjo prepevanja ocenimo na podlagi priporočil ISRM (Barton, 1978), ki loči med šestimi stopnjami, od nepreperle kamnine do preperine, ocene pa temeljijo na terenskih in laboratorijskih preiskavah. Heterogene hribine, kot je fliš, sestavljajo različne litološke enote, ki lahko različno prepevanje. Za peščenjak je značilno conarno prepevanje, ki je posledica dotoka vode po diskontinuitetah (Slika 4.2) in povzroči razbarvanje kamnine od robov proti notranjosti bloka. Prepevanje laporovca pa se odraža kot razpad silikatnih mineralov v minerale glin in je zato na površini slabo obstojen.

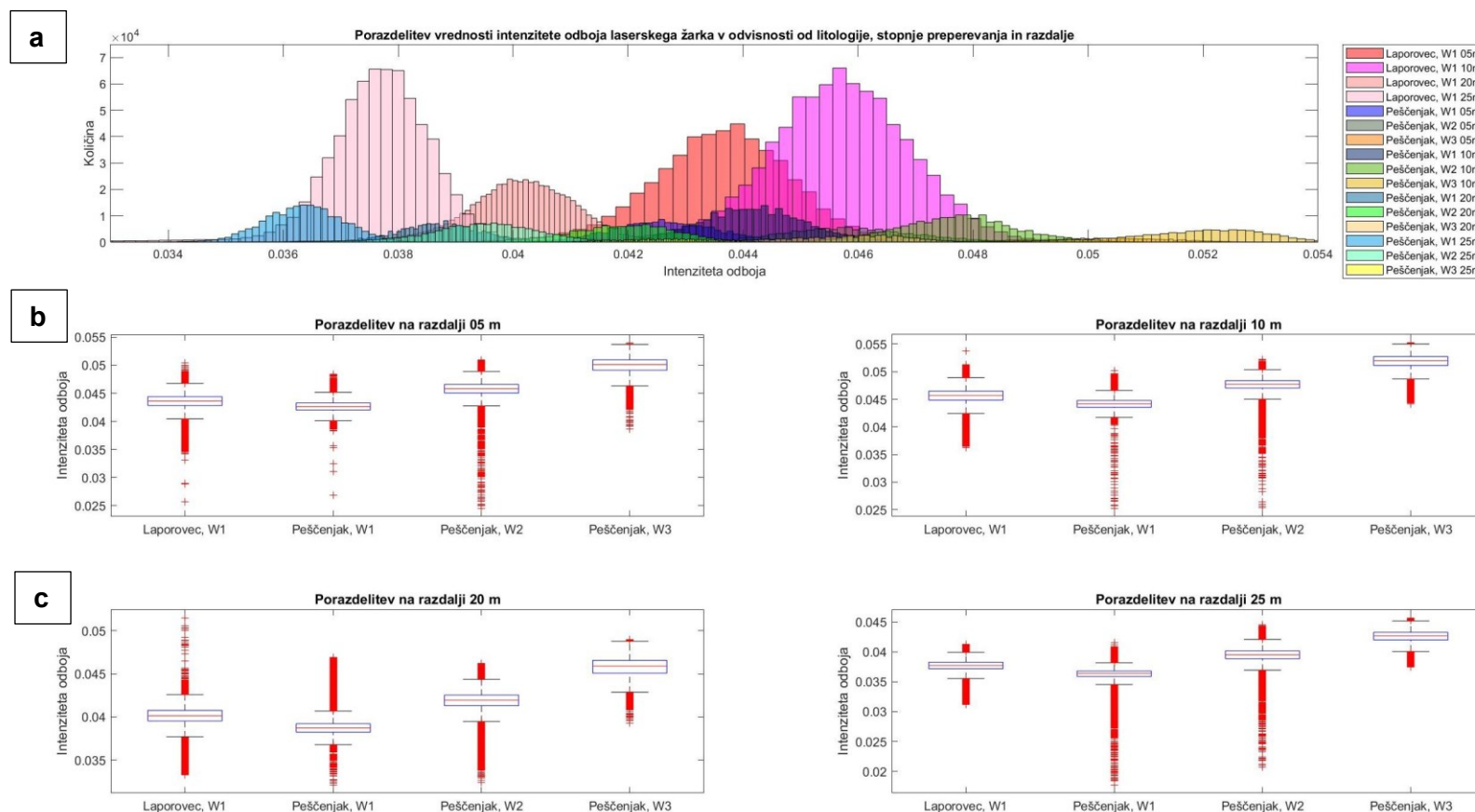
Brez terenskih in laboratorijskih preiskav, torej le s pomočjo TLS je težko določiti vseh šest stopenj preperevanja. Zato sem se odločila, da bom v sklopu detajlnega terestričnega skeniranja, analizirala vrednost intenzitete odboja laserskega žarka v odvisnosti od litološke sestave, stopnje preperevanja in razdalje, pri čemer sem stopnjo preperevanja razdelila v tri osnovne razrede:

- nepreperela kamnina (W1),
- preperela kamnina (W2) in
- močno preperela kamnina do preperina (W3).

Pri odvzemu vzorcev laporovca je bilo zaradi načina preperevanja težko pridobiti močno preperel vzorec, zato smo skenirali samo nepreperela vzorca laporovca. Rezultati detajlnega skeniranja vzorcev laporovca in peščenjaka na izbranih razdaljah 5 m, 10 m, 20 m in 25 m so predstavljeni na sliki 4.6. Vzorca laporovca sta bila oba nepreperela, zato podajam ugotovitve samo za vzorce peščenjaka, ki so bili conarno prepereli, z nepreperelim osrednjim delom (W1) in preperelim robom (W2), en vzorec pa je predstavljal močno preperelo in oksidirano površino diskontinuitete, zato sem ga uporabila za analizo močno preperelega peščenjaka (W3). Analiziranih je bilo 4.154.683 vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW.

Histogram porazdelitve vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka v odvisnosti od litologije, stopnje preperevanja in razdalje (Slika 4.6 a) prikazuje, da so le-te normalno porazdeljene in se v splošnem med seboj ločijo. Prekrivanje je bolj izrazito pri nepreperem peščenjaku, skeniranem na razdalji 10 m (mediana 0,044) in močno preperelem peščenjaku, skeniranem na razdalji 20 m (mediana 0,045). Na podlagi rezultatov statistične analize sklepam, da so statistično značilni. Preverbo razlik sem izvedla s standardnim t-testom. Predpostavila sem (ničelna domneva), da sta povprečji dveh testiranih skupin enaki, stopnjo značilnosti pa sem nastavila na $\alpha = 0,05$ (5 % stopnja zaupanja). Izračunana p-vrednost je bila pod 0,01, kar je precej nižje od praga 0,05, na podlagi katere lahko ničelno domnevo o enakih povprečjih zavrnamo, zaradi statistično različnih skupin.

Škatlasti diagrami so bili nadalje razdeljeni glede na razdaljo skeniranja (Slika 4.6 b in c). Vrednosti intenzitete odboja so pri vzorcih nepreperelega peščenjaka nižje kot pri vzorcih nepreperelega laporovca.



Slika 4.6: Histogram (a) in škatlasti diagram (b) porazdelitve vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW v odvisnosti od litologije (peščenjak in laporovec), stopnje prepevanja (W1 – sveža, W2 – preperela, W3 – močno preperela kamnina do preperina) ter izbrane razdalje TLS; c. Škatlasti diagram na izbranih razdaljah TLS: 5 m, 10 m, 20 m in 25 m. Okvir škatle predstavlja 1. in 3. kvartil, z vmesno vrednostjo mediane. Izven okvirja ležijo vrednosti nad tretjim kvartilom in pod prvim kvartilom.

Figure 4.6: Histogram (a) and box plots (b) showing the distribution of TLS-RAW intensity values depending on the lithology samples (sandstone and marlstone), weathering degree (W1 – fresh, W2 – weathered, W3 – strongly weathered rock to residual soil) and selected distance of TLS; c. Box plots on selected distances of TLS: 5 m, 10 m, 20 m and 25 m. The box represents the first and third quantiles as the outline, along with the median value. The outliers show values above the third quartile or values below the first quartile.

Z naraščajočo stopnjo preperevanja vzorcev peščenjaka naraščajo tudi vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka. Le-te so posledica preperevanja peščenjaka, pri katerem prihaja do razbarvanja kamnine. Robovi peščenjaka so svetlejše, rumenooranžne barve, intenziteta odboja je zato višja. Osrednji deli blokov peščenjaka so sive barve, intenziteta odboja laserskega žarka pa nižja. Pri primerjavi vrednosti intenzitete odboja v odvisnosti od razdalje skeniranja sledimo podobnemu trendu kot pri analizi v odvisnosti samo od litologije. Vrednosti intenzitete odboja narastejo iz razdalje 5 m na 10 m in nato padajo do končne razdalje 25 m.

Pri opisanih raziskavah se je pokazal problem pri določanju litologije in stopnje vlažnosti, ker razlike med posameznimi razredi so, vendar se velikokrat tudi prekrivajo. Rezultati podrobnega skeniranja so pokazali, da vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka naraščajo do razdalje 10 m, nato pa padajo do razdalje 25 m. Pri določanju litologije, stopnje preperevanja ali stopnje vlažnosti moramo biti torej pozorni, da izvajamo meritve na razdalji, ki je večja od 10 m, oziroma moramo izvesti dodatne raziskave za določitev korekcije intenzitete odboja pri bližnjem terestričnem laserskem skeniranju. Iz rezultatov sledi, da obstajajo značilne razlike med litološkimi razredi in stopnjami preperevanja, ki v flišu vplivajo vrednosti intenzitete odboja predvsem zaradi razbarvanja in oksidacije. Dobljene rezultate sem vključila pri interpretaciji nadaljnjih analiz meritev in jih vključila v karakterizacijo fliša po sistemu RMR.

4.2 Testiranje tarč za uporabo v SfM fotogrametriji

SfM fotogrametrija omogoča izdelavo 3D modela na podlagi številnih fotografij obravnavanega območja, zajetih iz različnih zornih kotov in z visokim deležem medsebojnega prekrivanja, pri čemer temelji njegova izdelava na prepoznavanju podobnih elementov iz različnih fotografij. Uporablja prvine fotogrametrije, računalniškega vida in geodetskih izmer. Poleg prepoznavanja slikovnih elementov na različnih fotografijah imajo pri georeferenciranju in rekonstrukciji 3D modela ključno vlogo oslonilne točke, ki jih običajno označimo s tarčami. Tarče morajo biti ustrezne velikosti in prepoznavne ter urejene na način, ki omogoča, da se površina rekonstruiranega 3D modela čim bolj približa površini v naravi. Testiranje velikosti kodiranih tarč glede na oddaljenost od izdanka čela in načina fotografiranja je predstavljalo predpogoj za ustrezen zajem podatkov s SfM fotogrametrijo in izdelavo 3D modela za nadaljnje analize.

V sklopu doktorske disertacije sem za izdelavo 3D modela na podlagi SfM fotogrametrije uporabila program Agisoft Metashape, ki omogoča uporabo predhodno pripravljenih kodiranih tarč, katere program v sklopu obdelave podatkov avtomatsko prepozna. Nekodirane tarče navadno predstavljajo poln krog ali sliko z vzorcem (npr. krog, pravokotnik), razdeljenim na

segmente. Za razliko od nekodiranih tarč pa imajo kodirane tarče programa Agisoft Metashape okrog osrednjega polnega kroga obroč, ki je razdeljen na črne in bele segmente (Slika 4.7 a). Vsaka kodirana tarča ima segmente razdeljene v edinstven vzorec, katerega program loči od ostalih in jih avtomatsko prepozna. Izbor ustreznih kodiranih tarč je odvisen od predvidene oddaljenosti od obravnavanega območja ter od želene stopnje natančnosti njegovega dekodiranja, zato moramo na podlagi uporabljenega fotoaparata za zajem podatkov in predvidene oddaljenosti fotografiranja, izbrati kodirane tarče ustrezne velikosti in radiometrične ločljivosti, kot je opisano v poglavju 0 (Agisoft LLC, 2018).

Z namenom izvedbe kakovostnih meritev s SfM fotogrametrijo sem v kamnolomu Elerji testirala kodirane tarče (Slika 4.7 b), pri čemer sem se odločila za tarče z vzorci 12-bitne ločljivosti. Na podlagi predvidene oddaljenosti snemanja od izkopnega čela, sem testirala tarče, z velikostjo polmera središčnega kroga med 10 mm in 30 mm, na razdaljah od 2 m do 30 m (Slika 4.7). Pri meritvah sem uporabila digitalni brezrcalni fotoaparatus Olympus OM-D E-M1 Mark II (Preglednica 4.2) (last Oddelka za geologijo UL NTF), katerega sem uporabila tudi pri izvedbi meritev s SfM fotogrametrijo. V sklopu testiranja sem primerjala različne objektivne, pri različno odprtih zaslonkah (F) ter času osvetlitve. Testirani so bili objektivni 15 mm, 12–100 mm, 25 mm ter 45 mm (Preglednica 4.3). Za testiranje več objektivov sem se odločila zaradi preučitve vpliva razdalje in parametrov fotografiranja na kakovost fotogrametričnega fotografiranja in prepoznavanja tarč. Obenem me je pri testiranju zanimalo tudi, ali obstajajo razlike v primeru fotografiranja s fiksnim in avtomatskim časom osvetlitve.

Preglednica 4.2: Tehnične specifikacije fotoaparata Olympus OM-D E-M1 Mark II.

Table 4.2: Technical specification of the camera Olympus OM-D E-M1 Mark II.

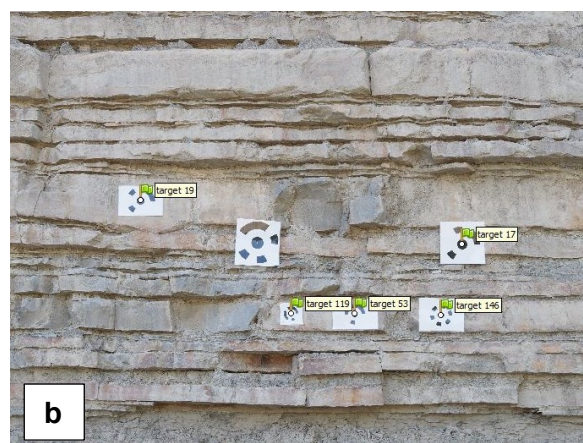
Tehnična specifikacija	Olympus OM-D E-M1 Mark II
Tip fotoaparata	digitalni brezrcalni
Ločljivost	5184 x 3888
Svetlobno tipalo	21,8 mega pikslov
Format	4 : 3
Senzor	4/3
Širina x Višina x Diagonala [mm]	17,3 x 13,0 x 21,6

Preglednica 4.3: Tehnične specifikacije objektivov

Table 4.3: Technical specification of lenses.

Tehnična specifikacija objektivov	Minimalna zaslonka [mm]	Goriščnica	Ekvivalentna goriščnica [mm]
Panasonic Leica DG Summilux 15 mm F1.7 ASPH	15	f22	30
Olympus M. Zuiko Digital ED 12-100 mm F4.0 IS PRO	12 - 100	f22	24 - 200
Olympus M. Zuiko Digital ED 25 mm F4.0 IS PRO	25	f16	50
Olympus M. Zuiko Digital 45 mm F1.8	45	f22	90

Posnete fotografije s tarčami sem nato pregledala v programu Agisoft Metashape ter omogočila avtomatsko prepoznavanje kodiranih tarč. Rezultati so predstavljeni v preglednicah 4.4 in 4.5. Kakor lahko teoretično predvidevamo, se je tudi empirično izkazalo, da je pomembno poznati tehnične lastnosti uporabljenega fotoaparata ter na podlagi oddaljenosti fotografiranja od ciljnega objekta, izbirati kodirane tarče ustrezne velikosti (npr. izkopnega čela). Manjše tarče program prepozna pri bližnjih posnetkih in obratno, prepozna večje tarče pri bolj oddaljenih, zato je pri SfM fotogrametriji pomembno skrbno načrtovanje zajema podatkov. Največji razpon avtomatske prepoznavnosti v sklopu obdelave v programu Agisoft Metashape sta na izbranem odseku izkazali kodirani tarči s polmerom osrednjega kroga 15 mm in 20 mm. Glede na to, da smo za izvedbo meritev izbrano izkopno čelo kamnoloma razdelili na večje in manjše detajlno območje, sem za oslonilne točke na skrajnih robovih širšega predela izbrala tarče s polmerom osrednjega kroga 30 mm.



Slika 4.7: Pogled na detajl testnega čela v kamnolomu Elerji s postavljenimi kodiranimi tarčami različnih velikosti (a) ter avtomatsko prepoznane kodirane tarče v programu Metashape (b).

Figure 4.7: Detail view on the tested excavated face in the Elerji quarry with coded targets of different sizes (a) and automatically recognized coded targets in software Metashape (b).

Rezultati so pokazali, da obstajajo razlike pri prepoznavanju tarč med uporabljenimi objektivmi. Pri uporabi objektivov 12-100 mm (Preglednica 4.4 b) ter 25 mm (Slika 4.4 a) sem dobila primerljive rezultate. Samodejno zaznavanje posameznih velikosti tarč je bilo odvisno predvsem od oddaljenosti od izkopnega čela. Manjše tarče s polmerom sredine tarče od 10 mm do 15 mm, je program prepoznal pri razdaljah do 20 m. Tarč s polmerom med 20 mm in 30 mm pa ni prepoznal na razdalji 2 m. Največji razpon prepoznavanja tarč s programom Agisoft Metashape sem dobila z objektivom 45 mm, in sicer pri razdaljah, daljših od 5 m (Slika 4.4 b). V primeru širokokotnega objektivu 15 mm je program avtomatsko prepoznal tarče do razdalje 15 m (Preglednica 4.4 a). Na podlagi dobljenih rezultatov sem ugotovila, da so za inženirsko-geološko fotogrametrično fotografiranje izdankov in izkopnih čel, ki se večinoma izvajajo na razdaljah od 5 m do 20 m, fiksni objektiv in zoom objektiv dovolj kvalitetni za zajem, pri čemer pa moramo zagotoviti, da se med snemanjem goriščna razdalja ne spreminja. Na prepoznavanje kodiranih tarč najbolj vpliva velikost polmera središčnega kroga v odvisnosti od razdalje fotografiranja, pri čemer ne smejo biti tarče niti premajhne niti prevelike, zato je pomembno poznavanje lastnosti uporabljenega fotoaparata in formata fotografij. Najmanjši vpliv imajo nastavitve zaslone, vendar moramo kljub temu upoštevati svetlobne razmere (slabo osvetlitev v predorih, lego sonca na nebu).

Preglednica 4.4: Rezultati testa prepoznavanja velikosti kodiranih tarč za objektiv 15 mm (a) in 12-100 mm (b) v odvisnosti od oddaljenosti od izkopnega čela, izvedenega v programu Agisoft Metashape. Tarče, ki jih je program samodejno prepoznal, so označena s krogom v zelenem polju, tarče, ki jih program ni prepoznal, pa so označene z x v rdečem polju. V prvih dveh primerih (a) so bile fotografije presvetle zaradi neustrezne nastavitve zaslone, kar bi lahko vplivalo na avtomatsko prepoznavanje tarč.

Table 4.4: Test results for recognizing the coded targets of different sizes by using the camera lens 11 mm (a) and 12-100 mm (b), based on the distance from the excavated face, performed in software Agisoft Metashape. Targets, which were automatically detected by the software are shown with circles in green fields, whereas the targets, which were not automatically detected are shown with x in red field. The first two testing (a) have been performed with inappropriate aperture and exposure time. Consequently, the photos were too bright, which could influence on the automatic target detection.

a

Tarča Razdalja [m]		Objektiv 15 mm																	
		F8 - 1/125 (presvetle)						F11 - 1/125 (presvetle)						F5,6 – A*					
		Polmer sredine tarče [mm]						Polmer sredine tarče [mm]						Polmer sredine tarče [mm]					
		10	14	15	20	25	30	10	14	15	20	25	30	10	14	15	20	25	30
2		o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x
5		o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
10		x	x	x	o	o	o	x	o	o	o	o	x	x	o	o	o	o	o
15		x	x	x	x	o	x	x	x	x	x	o	o	x	x	x	o	o	x
20		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o
25		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
30		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

* A – avtomatski način določitve hitrosti zaklopa zaslone

b

Tarča Razdalja [m]		Objektiv 12-100mm (25mm)																							
		F8 - 1/200						F11 - 1/200						F11 - 1/100						F5,6 – A*					
		Polmer sredine tarče [mm]						Polmer sredine tarče [mm]						Polmer sredine tarče [mm]						Polmer sredine tarče [mm]					
		10	14	15	20	25	30	10	14	15	20	25	30	10	14	15	20	25	30	10	14	15	20	25	30
2		o	o	o	x	x	x	o	o	o	x	x	x	o	o	o	x	x	x	o	o	o	x	x	x
5		o	o	o	o	x	x	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x
10		o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x
15		x	o	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	o	o	o	o	o	o		
20		x	x	o	o	o	o	x	o	o	o	o	x	x	o	o	o	x	o	o	o	o	x		
25		x	x	o	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	x	x	x	o	x	x	x	x	o	o	x
30		x	x	x	o	o	o	x	x	x	x	o	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o	x

* A – avtomatski način določitve hitrosti zaklopa zaslone

Preglednica 4.5: Rezultati testa prepoznavanja velikosti kodiranih tarč za objektiv 25 mm (a) in 45 mm (b) v odvisnosti od oddaljenosti od izkopnega čela, izvedenega v programu Agisoft Metashape. Zelena polja s krogom prikazuje tarče, ki jih je program samodejno prepoznal, rdeča polja s x pa tarče, katerih program ni samodejno prepoznal.

Table 4.5: Test results for recognizing the coded targets of different sizes by using the camera lens 25 mm (a) and 45 mm (b), based on the distance from the excavated face, performed in software Agisoft Metashape. Green fields with circles show, which targets were automatically detected by the software, whereas the red fields with x show targets, which were not automatically detected.

a

Tarča Razdalja [m]		Objektiv 25 mm																	
		F8 - 1/125						F11 - 1/125						F5,6 - A*					
		Polmer sredine tarče [mm]						Polmer sredine tarče [mm]						Polmer sredine tarče [mm]					
		10	14	15	20	25	30	10	14	15	20	25	30	10	14	15	20	25	30
2		o	o	o	x	x	x	o	o	o	x	x	x	o	o	o	x	x	x
5		o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x
10		o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x
15		x	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	x
20		x	o	o	o	o	x	x	x	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o
25		x	x	x	o	o	o	x	x	x	o	o	o	x	o	x	o	o	x
30		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	x	x	x	o	x	o

* A – avtomatski način določitve hitrosti zaklopa zaslone

b

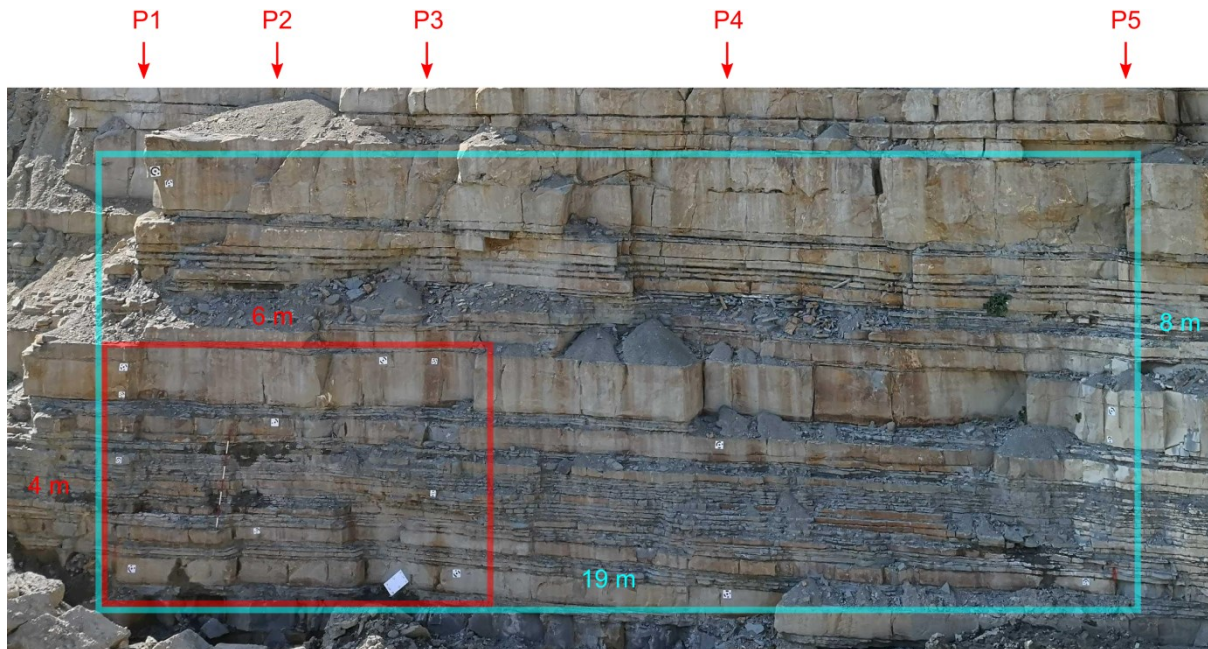
Tarča Razdalja [m]		Objektiv 45 mm																	
		F8 - 1/125 (presvetle)						F11 - 1/125						F5,6 - A*					
		Polmer sredine tarče [mm]						Polmer sredine tarče [mm]						Polmer sredine tarče [mm]					
		10	14	15	20	25	30	10	14	15	20	25	30	10	14	15	20	25	30
2		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5		o	o	o	x	x	x	o	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	x
10		o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x
15		o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x
20		o	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x
25		x	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x
30		x	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o

* A – avtomatski način določitve hitrosti zaklopa zaslone

4.3 Geometrična analiza uporabljenih meritev

V kamnolomu Elerji smo 19. in 20. 09. 2018 izvedli sklop detajlnih meritev z uporabo različnih tehnologij in pristopov. Z obsežno geometrično analizo sem želela preveriti terestrično daljinsko zaznavanje, ki se uveljavlja na področju inženirske geologije. V sklopu meritev sem se posvetila zajemu podatkov na terenu, njihovi obdelavi ter kakovosti, združevanju in shranjevanju rezultatov, za področje inženirske geologije.

Izkopno čelo v kamnolomu smo razdelili na dve območji (Slika 4.8): večje območje med profiloma P1 in P5 (velikost območja 19 m x 8 m), označeno s turkizno barvo ter znotraj tega manjše območje med profiloma P1 in P3 (velikost območja 6 m x 4 m), označeno z rdečo barvo. Za celotno območje P1–P5 sem uporabila kombiniran način fotografiranja, in sicer frontalno v horizontalni smeri ter konvergenčno na robovih, vendar zaradi nevarnega dostopa nisem izvedla detajlnejše analize ter ročnih izmer. Pri manjšem območju med profiloma P1 in P3 pa smo uporabili detajlnejši zajem in analizo podatkov. Na posamezne profile smo postavili oslonilne točke. Na podlagi predhodnega testiranja sem izbrala kodirane tarče iz programa Agisoft Metashape (opisane v poglavju 4.2), in sicer kombinacijo velikosti tarč glede predvidene oddaljenosti stojišč od izkopskega čela.



Slika 4.8: Pogled na obravnavano območje izkopskega čela v kamnolomu Elerji. Območje smo razdelili na 5 profilov (P1 do P5) skupne velikosti ok. 19 m x 8 m (turkizen kvadrat). Znotraj smo določili manjše območje za detajlni zajem podatkov (P1 do P3), velikosti ok. 6 m x 4 m (rdeči kvadrat).

Figure 4.8: View on the investigated area of the excavated face in the Elerji quarry. The area has been divided into 5 profiles (P1 to P5) with total dimensions approximately 19 m x 8 m (cyan rectangle). Inside this area, a smaller area has been selected for a detailed data acquisition (P1 to P3) with dimensions approximately 6 m x 4 m (red rectangle).

Zajem podatkov smo izvedli z naslednjimi inštrumenti (Slika 4.9):

- Geodetska izmera: tahimeter Leica Nova Multistation MS50 (Slika 4.9 a)
(dr. Tilen Urbančič, Oddelek za geodezijo, UL FGG);
- Preverba tarč z laserskim razdaljemerom Leica DISTO S910 (Slika 4.9 b)
(dr. Tilen Urbančič, izposoja Geoservis d.o.o.);
- Skeniranje s slikovnim laserskim skenerjem Leica BLK 360 (Slika 4.9 c)
(dr. Tilen Urbančič);
- Terestrično lasersko skeniranje Riegl VZ-400 (Slika 4.9 d)
(Andreja Anžur, DFG Consulting d.o.o.);
- SfM fotogrametrija z brezzrcalnim fotoaparatom Olympus E-M1 II (Slika 4.9 e)
(last Oddelka za geologijo UL NTF);
- SfM fotogrametrija s pametnim telefonom Huawei P20 Pro s sistemom Android;
- Izmera vpadov diskontinuitet z geološkim kompasom in Android aplikacijo FieldMove Clino (Slika 4.9 f).

Za referenčno meritev smo izbrali meritev s tahimeterom Leica Multistation MS50, ki omogoča zelo natančno geodetsko izmero merskih točk in lasersko skeniranje obravnavanega površja. Izmero iz enega stojišča je izvedel dr. Tilen Urbančič iz Oddelka za geodezijo, UL FGG. Stojišče je bilo postavljeno na ploščadi kamnoloma, in sicer na oddaljenosti ok. 27 m. Na osnovi izmerjenih podatkov smo postavili lokalni koordinatni sistem, merske točke pa uporabili za georeferenciranje ostalih meritev. Zbrani podatki iz različnih virov so bili nato georeferencirani v isti lokalni koordinatni sistem za boljšo primerjavo med različnimi 3D oblaki točk in modeli.



Slika 4.9: Pregled uporabljenih instrumentov za zajem izkopnega čela v kamnolomu Elerji pri geometrični analizi. Opisi (a–f) so predstavljeni v besedilu.

Figure 4.9: Overview of applied instruments for data acquisition in the Elerji quarry, for the geometrical analysis. Descriptions (a–f) are presented in the text.

4.3.1 SfM fotogrametrija

Fotografiranje izbranega območja izkopnega čela v kamnolomu Elerji s SfM fotogrametrijo je predstavljal pomemben del zajema podatkov, saj je razvoj napredoval tako pri uporabi fotoaparata, kot pri programih za njihovo obdelavo. Z geometrično analizo sem želela pripraviti in orientirati 3D model, primeren za uporabo v inženirski geologiji ter preveriti njeno uporabnost v tankoplastnatih heterogenih hribinah, kot je fliš, saj je od napake v modelu odvisno, do katerih najmanjših debelin plasti je metoda še uporabna. Uporabili smo brezrcalni fotoaparatus Olympus OM-D E-M1 Mark II (Slika 4.9 e). Glede na to, da je razvoj kakovosti fotografij napredoval tudi na področju telefonije, smo izvedli dva sklopa fotografiranja s pametnim telefonom Huawei P20 Pro. Skupno smo izvedli 24 serij fotografiranja, pri čemer je bil večji poudarek na fotografiranju detajlnega območja izkopnega čela med profiloma P1 in P3, obenem pa smo izvedli tudi osem serij fotografiranja izkopnega čela med profiloma P1 in P5. Uporabili smo naslednje načine fotografiranja:

- frontalno v horizontalni smeri s konvergenčnim načinom na skrajnih stojiščih ter
- kombinirani način fotografiranja - frontalno in konvergenčno iz vsakega stojišča.

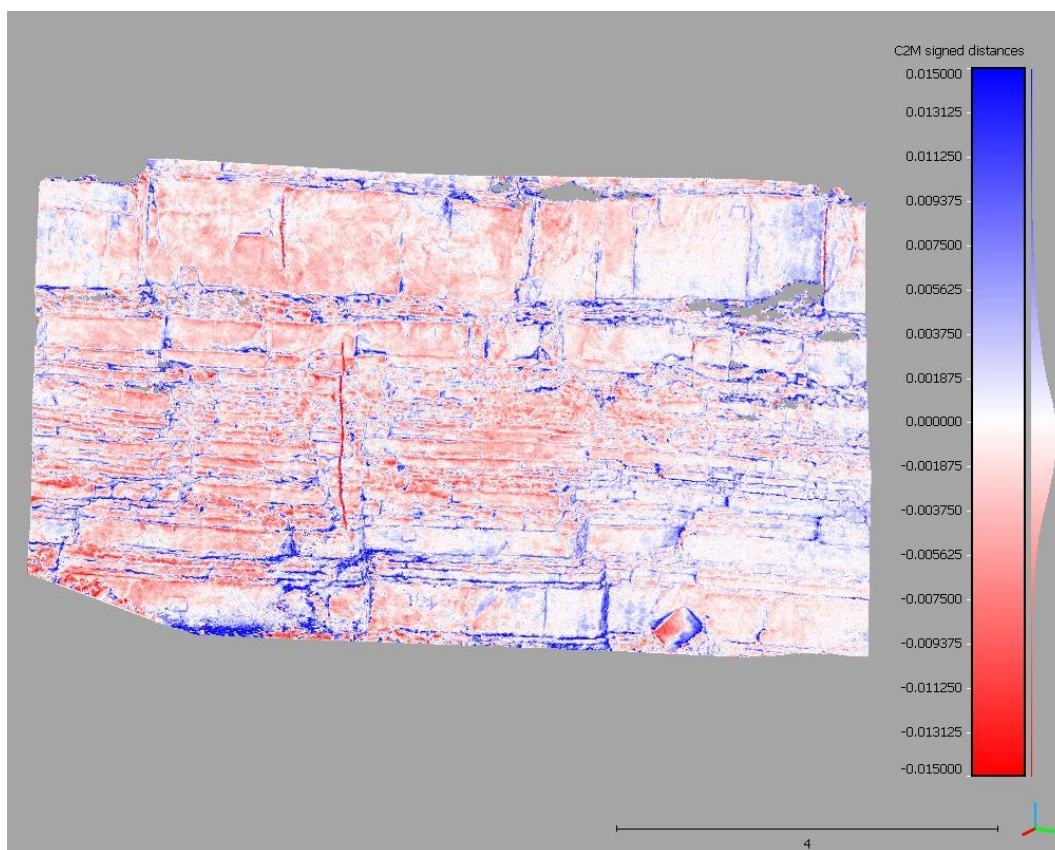
Pri fotografiranju smo posebno pozornost namenili načinu fotografiranja. Izklopili smo vse nastavitve, ki omogočajo samodejno ostrenje, stabilizacijo fotoaparata ter avtomatsko spreminjanje nastavitve zaslonke. S tem smo želeli ohraniti parametre notranje orientacije fotoaparata. Za primerjavo smo izvedli tudi sedem serij fotografiranja z avtomatskim časom osvetlitve zaslonke.

V programu Agisoft Metashape sem fotogrametrično zajete fotografije pregledala in izdelala 3D model. Program samodejno prepozna uporabljene kodirane tarče, kar pripomore k bolj kakovostno izdelanemu fotogrametričnemu 3D modelu. Kodirane tarče smo uporabili tudi za georeferenciranje na podlagi meritev s tahimetrom Leica MS50. Čas izdelave gostega fotogrametričnega oblaka točk in fotogrametričnega 3D modela je naraščal glede na število zajetih fotografij, zato so nas med drugim zanimale razlike med kakovostjo fotogrametričnega 3D modela za uporabo v inženirski geologiji. V sklopu geometrične analize sem primerjala razdalje med pari točk. Primerjavo razdalje med točkami sem izvedla pred postopkom georeferenciranja (Slika 4.16 e) ter po njem (Slika 4.16 f). Pri izboru elementov za določitev dolžin sem po priporočilih uporabila najdaljšo vodoravno in najdaljšo vertikalno razdaljo. Na podlagi izbranih elementov in določene razdalje program oceni preostale razdalje med oslonilnimi točkami in korigira 3D model. Razlike med razdaljami so pri negeoreferenciranem 3D modelu porazdeljene asimetrično v levo (koeficient asimetrije - 0,67), torej prevladujejo

razlike v pozitivni smeri, manj je večjih razlik v negativni smeri. Velikost razlik med razdaljami znaša med -2 mm in +4 mm (povprečje +1,7 mm) in standardnim odklonom 1,5 mm (Slika 4.16 e). Podobne razlike med razdaljami so se izkazale pri primerjavi georeferenciranega fotogrametričnega 3D modela in referenčnega lidarskega oblaka točk. Porazdeljene so bile asimetrično v levo (koeficient asimetrije - 0,68). Prevladujejo razlike v pozitivno smer, medtem ko je manj večjih razlik v negativni smeri, in sicer znašajo med -2 mm in +4 mm (povprečje 1,6 mm) in standardnim odklonom 1,5 mm (Slika 4.16 f).

Fotogrametrične oblake točk, rekonstruiranih iz obeh načinov fotografiranja, sem nato primerjala z referenčnim lidarskim oblakom točk iz tahimetra (Slika 4.10 in Slika 4.11). Za fotogrametrične oblake točk, narejenih iz fotografij z brezžičnim fotoaparatom, podajam v nadaljevanju disertacije oznako fotogrametrični oblak točk (fotoaparati). Primerjavo sem izvedla v programu CloudCompare. Na sliki 4.10 je predstavljena primerjava fotogrametričnega oblaka točk iz SfM fotogrametrije z referenčnim lidarskim oblakom točk iz tahimetra Leica MS50. Zajem podatkov je potekal s frontalnim fotografiranjem v horizontalni smeri ter konvergenčnim fotografiranjem na robovih izbranega območja izkopnega čela. Zajetih je bilo 52 fotografij na oddaljenosti od izkopnega čela 4 m in 6 m. Program Agisoft Metashape je za procesiranje gostega lidarskega oblaka točk (108.821.774 točk) zelo visoke kvalitete potreboval 1 dan in 1 uro. Iz primerjave z referenčnim lidarskim oblakom točk sledi, da je razlika med njima od -4 mm do +2 mm, kar je zelo majhna razlika in vsekakor zadovoljivo majhna za uporabo v inženirski geologiji. Razlike so izrazite predvsem na predelih izdanka, kjer zaradi različnih stojišč in morfologije skenirane površine, ne prihaja do odboja laserskega žarka ter na levi strani izbranega območja.

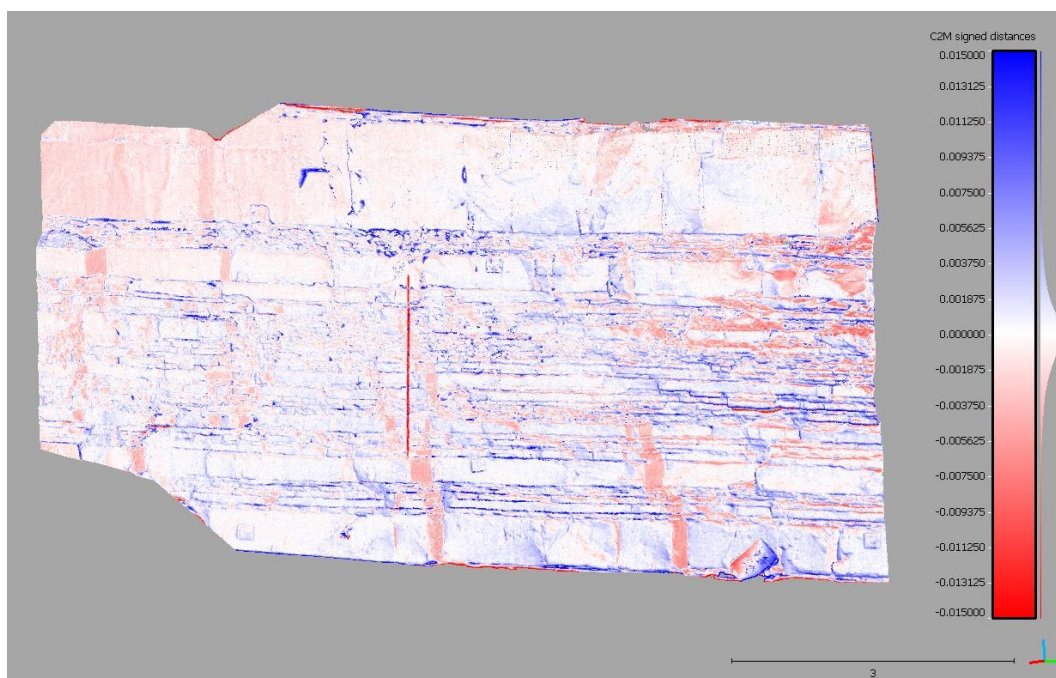
Na podlagi priporočil Wilkinson et al. (2016) sem izvedla zajem podatkov s SfM fotogrametrijo iz več stojišč v različni horizontalni in vertikalni smeri. Primerjava fotogrametričnega oblaka točk (fotoaparati) z referenčnim lidarskim oblakom točk iz tahimetra je predstavljena na sliki 4.11. Zajem podatkov je potekal na treh razdaljah od izkopnega čela: 5 m, 7 m in 10 m, zajetih je bilo 469 fotografij. Izdelava gostega fotogrametričnega oblaka točk visoke kakovosti je potekala 3 dni in vsebuje 54.736.476 točk. Razlike z referenčnim lidarskim oblakom točk znašajo pod +/-2 mm, večji odkloni do +/-4 mm prevladujejo na desni strani izbranega območja izkopnega čela ter na območjih okluzije, ki je posledica predvsem različnih lokacij stojišč za zajem podatkov.



Slika 4.10: Primerjava fotogrametričnega oblaka točk (fotoaparata) iz SfM fotogrametrije z referenčnim oblakom točk iz tahimetra Leica MS50. Fotografiranje se je izvedlo frontalno v horizontalni smeri in s konvergenčnim fotografiranjem na skrajnih stojiščih. Oddaljenost od izkopnega čela je bila med 4 m in 6 m. Razlike med njima se gibljejo med -4 mm in +2 mm. Večje razlike (do +/-5 mm) so bile zabeležene predvsem na območjih, kjer zaradi morfologije skenirane površine ne prihaja do odboja laserskega žarka ter v levem delu izbranega območja.

Figure 4.10: Comparison of photogrammetric 3D point cloud (camera) using SfM photogrammetry and the reference point cloud from the multistation Leica MS50. Photos were taken frontal in horizontal direction, with convergent photo acquisition on both sides. Distance from the excavated face was between 4 m and 6 m. Differences are between -4 mm and +2 mm. Greater differences (up to +/-5 mm) appear mostly in areas with no reflection of the laser beam due to the morphology of the scanned surface and on the left side of the outcrop.

Zaradi položaja meritev s tahimetrom in posledično prestrmega vpadnega kota skeniranja ter morfologije terena ni prišlo do odboja laserskega žarka na spodnjih ploskvah ter na robovih modela, zato so na teh mestih največje razlike. Pojav imenujemo okluzija. Iz rezultatov sledi, da so pri ustrezno izvedenih meritvah razlike z referenčnim lidarskim oblakom točk iz tahimetra razmeroma majhne. V potek dela geološke spremljave izkopnega čela ali izdanka lahko vključimo zajem podatkov s SfM fotogrametrijo, ob upoštevanju da imamo dovolj kontrolnih točk, ki so natančno izmerjene za preverbo geometrije ter priporočil za zajem dobrih fotografij.



Slika 4.11: Primerjava fotogrametričnega oblaka točk (fotoaparat) iz SfM fotogrametrije z referenčnim oblakom točk iz tahimetra Leica MS50. Fotografiranje se je izvedlo iz več stojišč v različni horizontalni in vertikalni smeri. Oddaljenost od izkopnega čela je bila 5 m, 7 m in 10 m. Razlike med njima se gibljejo do ± 2 mm. Podobno so bile izmerjene večje razlike (do ± 4 mm) na območjih okluzije ter na desni strani izbranega območja.

Figure 4.11: Comparison of photogrammetric point cloud (camera) using SfM photogrammetry with the reference point cloud from the multistation Leica MS50. Photos were taken from several positions in different horizontal and vertical direction. The selected distances from the excavated face were 5 m, 7 m and 10 m. Differences are below ± 2 mm. Greater differences (up to ± 4 mm) were measured mostly in areas with no reflection of the laser beam due to occlusion and on the right side of the outcrop.

4.3.2 Zajem podatkov s pametnim telefonom

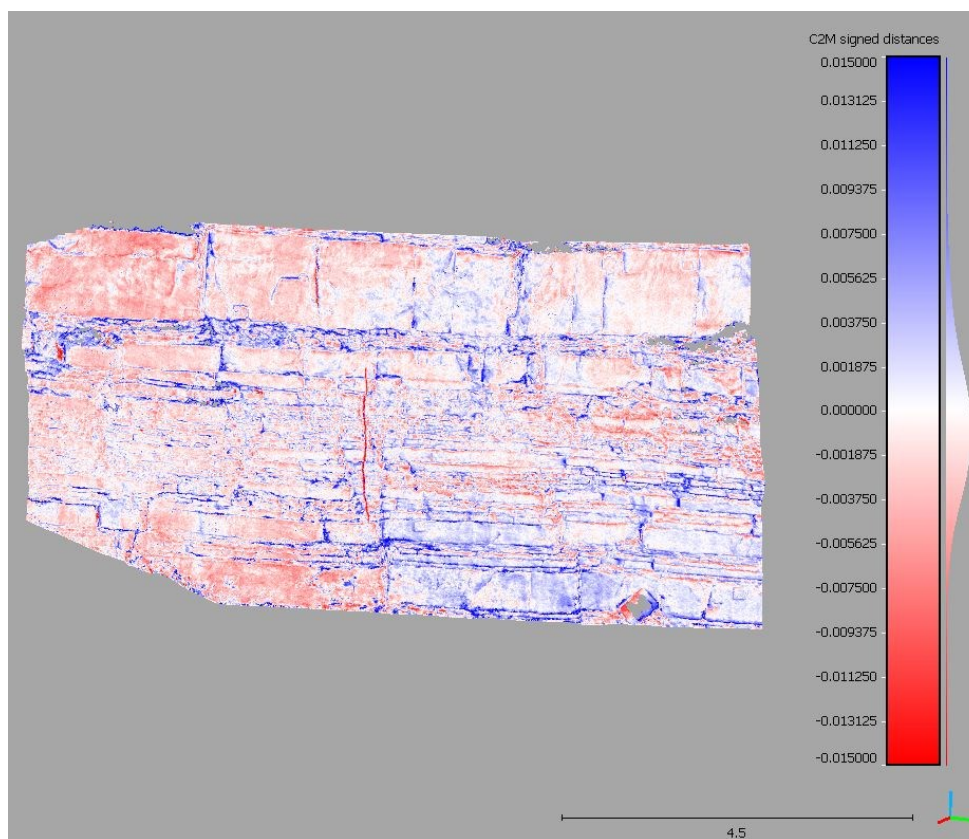
Fotografiranje s pametnim telefonom smo izvedli v načinu samodejnega ostrenja posameznega posnetka (AF-S). Uporabljen je bil pametni telefon Huawei P20 Pro z Android sistemom (Preglednica 4.6). Poleg GNSS nastavitvev za beleženje lokacij ima telefon trojno Leica kamero ter možnost dodatnih nastavitvev fotografiranja in shranjevanja fotografij v surovem (RAW) formatu. Zajem podatkov je potekal na razdalji od izkopenega čela 4 m in 6 m, fotografirali smo frontalno v horizontalni smeri, s konvergenčnim fotografiranjem na skrajnih stojiščih. Izdelava gostega fotogrametričnega oblaka točk visoke kakovosti iz 27 fotografij je trajala 15 minut in vsebuje 6.351.699 točk. Fotogrametričnemu oblaku točk, ki je narejen iz fotografij s pametnim telefonom podajam v nadaljevanju besedila oznako fotogrametrični oblak točk (pametni telefon).

Preglednica 4.6: Tehnične specifikacije pametnega telefona Huawei P20 Pro.

Table 4.6: Technical specification of the smart phone Huawei P20 Pro.

Tehnična specifikacija	Huawei P20 Pro
Ločljivost	5184 x 3888
Svetlobno tipalo	40 mega pikslov
Format	4 : 3
Senzor	4/3
Širina x Višina x Diagonala [mm]	17,3 x 13,0 x 21,6

Iz primerjave fotogrametričnega oblaka točk (pametni telefon) z referenčnim lidarskim oblakom točk iz tahimetra (Slika 4.12), ki sem ga izvedla v programu CloudCompare, sem ugotovila, da so razlike do +/-8 mm. Večja odstopanja (do +/-10 mm) so bila zabeležena na robovih obravnavanega območja ter na mestih izkopenega čela, kjer zaradi neugodnega stojišča tahimetra in posledično okluzije ni prišlo do odboja laserskega žarka tahimetra. Rezultati analize so pokazali, da je s primernim načrtovanjem zajema podatkov in natančno izmero oslonilnih točk možno doseči zadovoljivo natančnost fotogrametričnega oblaka točk iz fotografij pametnega telefona. Razlike so namreč precej majhne in sprejemljive za uporabo v inženirski geologiji oz. za terensko delo zajema podatkov.



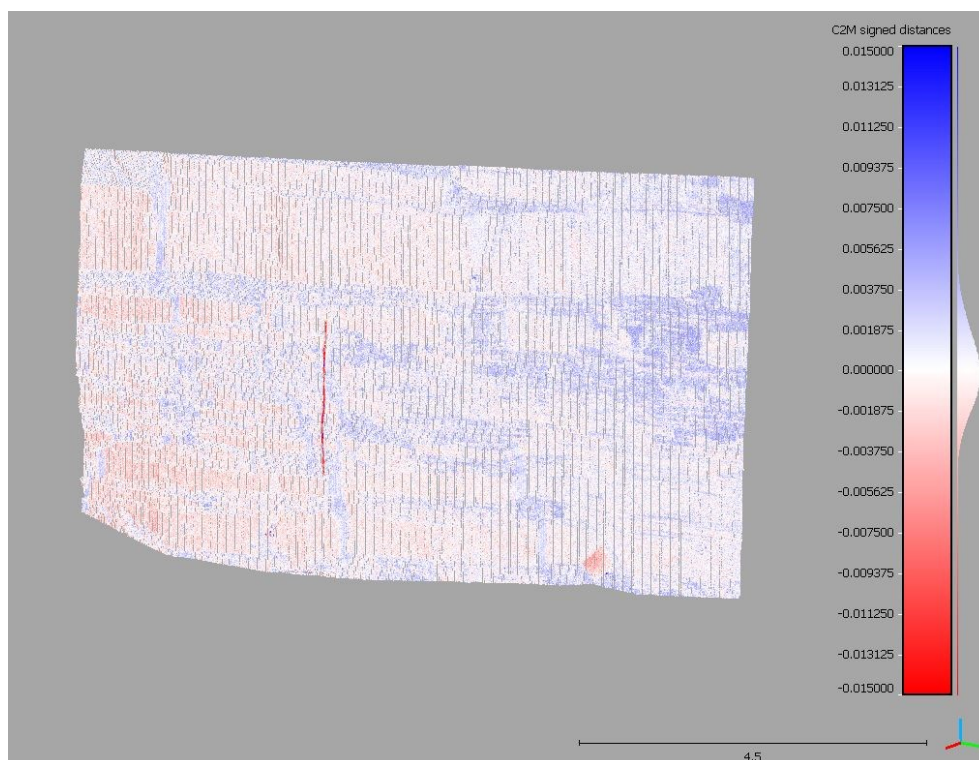
Slika 4.12: Primerjava fotogrametričnega oblaka točk iz pametnega telefona z referenčnim lidarskim oblakom točk iz tahimetra Leica MS50. Fotografije sem zajela frontalno v horizontalni smeri in konvergenčno na skrajnih stojščih, in sicer na razdaljah 4 m in 6 m. Razlike med oblakoma točk se gibljejo do +/-8 mm, večje razlike (do +/-10 mm) so bile zabeležene predvsem na območjih, kjer zaradi morfologije skenirane površine ne prihaja do odboja laserskega žarka.

Figure 4.12: Comparison of photogrammetric point cloud, acquired by smart phone with Android system and the reference point cloud from the multistation Leica MS50. Photographs were taken frontal in horizontal direction, with convergent photo acquisition on both sides., with distances approximately 4 m and 6 m. Differences between point clouds are below +/-8 mm, whereas greater differences (up to +/-10 mm) were measured mostly on areas with no reflection of the laser beam due to the morphology of the scanned surface.

4.3.3 Terestrično lasersko skeniranje s TLS skenerjem Riegl VZ-400

Terestrično lasersko skeniranje smo izvedli s TLS skenerjem Riegl VZ-400 z nameščenim DSLR fotoaparatom Nikon D700, s katerim smo izvajali vsa 3D laserska skeniranja. Skeniranje iz osmih stojišč je izvedla Andreja Anžur iz podjetja DFG Consulting d.o.o. (Slika 4.9 d.). Za vsako stojišče smo naredili pregledni sken izkopnega čela med profiloma P1 in P5 z ločljivostjo 2 cm / 30 m ter 1 cm / 30 m, čelo med profiloma P1 in P3 pa smo skenirali z ločljivostjo 0,5 cm / 30 m. Poleg laserskega skeniranja smo čelo tudi fotografirali s 50 % preklopom. Za vsako skeniranje smo preverili potreben čas skeniranja, v odvisnosti od zajetega območja, oddaljenosti od izkopnega čela in izbrane ločljivosti. S tem smo želeli preveriti, koliko časa bi potrebovali za pregledno in detajlno 3D lasersko skeniranje čela pri geološki spremljavi izkopa predora. Zaradi procesa izkopa in vgradnje podpornih ukrepov tekom izgradnje predora so bile posamezne faze časovno omejene, še posebej v primeru nestabilnega izkopnega čela, ko mora biti to v najkrajšem možnem času zaščiteno za nadaljnji potek izkopa. Pregledno lasersko skeniranje izkopnega čela velikosti 6 m x 4 m lahko z ločljivostjo 2 cm / 30 m izvedemo v času do 1 minute, z ločljivostjo 1 cm / 30 m do 6 minut, za detajlno skeniranje pa potrebujemo tudi do 21 minut, kar je že težko izvedljivo pri geološki spremljavi izkopnega čela. S terestričnim laserskim skeniranjem smo obenem detajlno skenirali tudi tarče, ki so pomembne pri georeferenciranju oblaka točk. Za lidarske oblake točk iz TLS skenerja Riegl VZ-400 podajam v nadaljevanju disertacije oznako lidarski oblak točk (Riegl).

Analizo lidarskega oblaka točk (Riegl) smo izvedli v programu RiSCAN Pro. Pred postopkom georeferenciranja v lokalni koordinatni sistem smo preverili še natančnost meritev. Oslonilne točke skenerja smo nato združili z ostalimi stojišči, izračunali povprečje v projektnem koordinatnem sistemu ter jih primerjali z referenčnimi oslonilnimi točkami tahimetra. Razlike so na podlagi primerjave razdalj med pari točk (Slika 4.16 d) normalno porazdeljene, z odstopanji od -3,0 mm do +2,5 mm (povprečje -0,08 mm) in standardnim odklonom meritev 1,2 mm. Na podlagi statistične analize se pojavljajo predvsem slučajni pogreški. Rezultati analize kažejo, da so razlike med izmerjenimi tarčami iz TLS in referenčnega tahimetra zelo majhne, zato je terestrični laserski skener uporaben v inženirski geologiji, tako kot tahimeter.



Slika 4.13: Primerjava lidarskega oblaka točk iz TLS Riegl VZ-400 z referenčnim oblakom točk iz tahimetra Leica MS50, skeniranih iz enakega stojišča. Prevladujejo razlike med oblakoma točk do +/- 4 mm, večje razlike (do +/- 20 mm) so bile zabeležene predvsem na robovih ter na ploskvah, kjer zaradi pogleda in vpadnega kota skeniranja ne prihaja do odboja laserskega žarka.

Figure 4.13: Comparison of lidar point clouds, acquired by TLS Riegl VZ-400 and the reference point cloud from the multistation Leica MS50, scanned from the same position. Generally, point clouds differ up to +/- 4 mm, higher differences (up to +/- 20 mm) appear mostly on the edge and on surfaces with no reflection of the laser beam due to the line of sight and incidence angle.

V programu CloudCompare sem primerjala lidarski oblak točk (Riegl) z referenčnim lidarskim oblakom točk iz enakega stojišča. Rezultati nakazujejo na minimalne razlike med njima, saj prevladujejo razlike do +/-4 mm (Slika 4.13), povprečne razlike pa znašajo le 0,5 mm (standardni odklon je 6,5 mm). Podobno kot pri predhodno predstavljenih primerih, se pojavljajo največje razlike (do +/-20 mm) predvsem na robovih območja ter na ploskvah, na katerih zaradi smeri pogleda in vpadnega kota skeniranja ni prišlo do odboja laserskega žarka (pojav okluzije). V predstavljenem primeru smo dobili redek lidarski oblak točk na spodnjih ploskvah plasti ter na stranskih površinah razpok.

Razlike med lidarskima oblakoma točk iz TLS in tahimetra so izredno majhne, zato lahko terestrični laserski skener vključimo v geološko kartiranje in geološko spremljavo.

4.3.4 3D laserski skener Leica BLK360

V okviru geometrične analize smo želeli preveriti tudi kakovost izmere izkopenega čela z enostavnim prenosnim 3D laserskim skenerjem Leica BLK360 (Slika 4.9 c in Preglednica 4.7). Za razliko od TLS predstavlja instrument 3D laserski skener z integriranim sferičnim slikovnim zajemom in panoramskim termografskim senzorjem. Instrument je lahek, podobno kot TLS pa omogoča 360-stopinjske skene in fotografije, zato dobimo kot rezultat obarvan lidarski oblak točk. Lasersko skeniranje z ločljivostjo 5 mm / 10 m, je v kamnolomu Elerji izvedel dr. Tilen Urbančič iz Oddelka za geodezijo, UL FGG, dne 19. 09. 2018. V okviru meritev nas je zanimala predvsem njegova ustreznost pri inženirsko-geološkem kartiranju in spremljavi. Zaradi razlikovanja med lidarskimi oblaki točk, ki smo jih dobili z različnimi instrumenti, podajam v nadaljevanju besedila pri uporabi 3D laserskega skenerja Leica BLK360 oznako lidarski oblak točk (BLK).

Preglednica 4.7: Tehnične specifikacije prenosnega skenerja Leica BLK360.

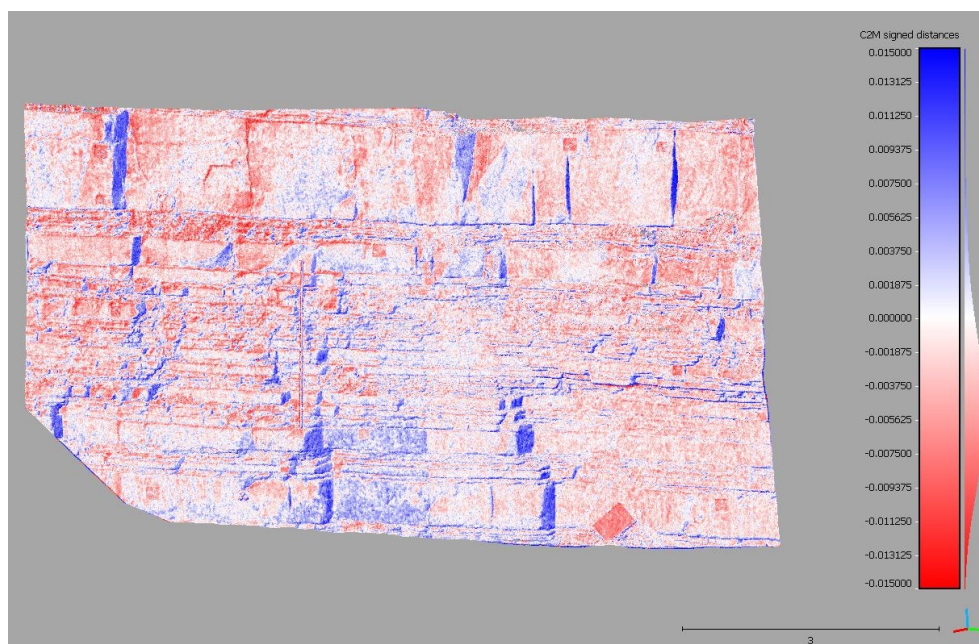
Table 4.7: Technical specifications for the portable scanner Leica BLK360.

Merilni doseg	0,6 m – 60 m
Valovna dolžina laserskega žarka	830 nm
Vidno polje	360° (horizontalno) x 300° (vertikalno)
Hitrost	360.000 točk / sekundo
Ločljivost	5 mm, 10 mm, 20 mm / 10 m
Natančnost merjenja dolžine	4 mm / 10 m , 7 mm / 20 m
Natančnost 3D	6 mm / 10 m, 8 mm / 20 m

V programu CloudCompare sem na lidarskem oblaku točk (BLK) določila središča oslonilnih točk ter jih georeferencirala v lokalni koordinatni sistem preko referenčnih oslonilnih točk, izmerjenih s tahimetrom Leica MS50. Stojišče je bilo postavljeno na oddaljenosti približno 5 m od izkopenega čela, kar se je odražalo pri kakovosti lidarskega oblaka točk, njegovi ločljivosti in napakah pri določitvi središča oslonilnih točk, saj je bil oblak predvsem v zgornjem delu redkejši. Razlike so na podlagi primerjave razdalj med pari točk (Slika 4.16 c) porazdeljene rahlo asimetrično v levo (koeficient asimetrije -0,23), z odstopanji med -30 mm in 25 mm (povprečje 0,80 mm), standardni odklon meritev znaša 10,8 mm.

Lidarski oblak točk (BLK) sem nato v programu CloudCompare primerjala z referenčnim lidarskim oblakom točk iz tahimetra. Rezultati nakazujejo zelo majhne razlike med njima,

prevladujejo razlike do ± 15 mm (Slika 4.14), povprečne razlike znašajo 0,8 mm (standardni odklon je 6,9 mm). Razlike se pojavljajo predvsem zaradi različnih stojišč, saj skeniranje s tahimetrom ni potekalo frontalno na izkopno čelo. Opazne so tudi razlike pri lidarskem oblaku točk (BLK) zaradi samega stojišča skeniranja, ki se povečujejo lateralno proti robovom izbranega območja izkopnega čela. Podobno kot pri oblaku točk iz TLS se večja odstopanja do ± 20 mm pojavljajo predvsem na robovih oblaka točk ter na mestih, kjer zaradi pogleda in vpadnega kota skeniranja (pojav okluzije) ne prihaja do odboja laserskega žarka, torej na zgornjih ploskvah plasti.



Slika 4.14: Primerjava lidarskega oblaka točk iz Leica BLK360 z referenčnim lidarskim oblakom točk iz tahimetra Leica MS50. Skeniranje se je izvedlo frontalno, na oddaljenosti ok. 5 m od izkopnega čela. Razlike med njima so do ± 15 mm in se povečujejo proti robovom skeniranega območja. Večje razlike (do ± 20 mm) so bile zabeležene predvsem na območjih, kjer zaradi morfologije skenirane površine ne prihaja do odboja laserskega žarka.

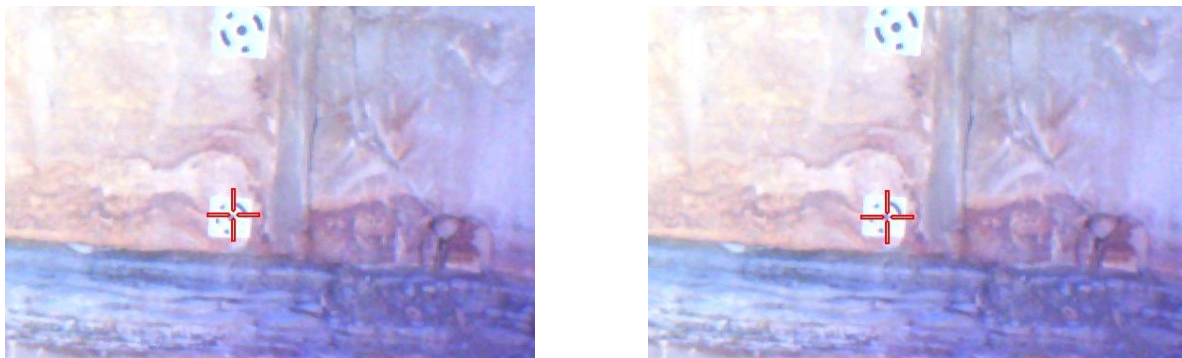
Figure 4.14: Comparison of lidar point clouds, acquired by Leica BLK360 and the reference lidar point cloud from the multistation Leica MS50. Scanning with BLK360 was performed frontal from the face, with distance approximately 5 m. Differences between point clouds are below ± 15 mm and increase towards the edges of the scanned area. Greater differences (up to ± 20 mm) appear mostly on areas with no reflection of the laser beam due to the morphology of the scanned surface.

Rezultati analize lidarskega oblaka točk iz laserskega skenerja Leica BLK360 so sicer nekoliko slabši od terestričnega laserskega skenerja Riegl VZ-400, vendar so še vedno razmeroma majhne v primerjavi z referenčnim lidarskim oblakom točk iz tahimetra. Na podlagi rezultatov lahko instrument vključimo v potek dela geološkega popisa izdanka ali izkopnega čela, ob natančno izmerjenih oslonilnih točkah.

4.3.5 Izmera razdalj z laserskim razdaljemerom Leica DISTO S910

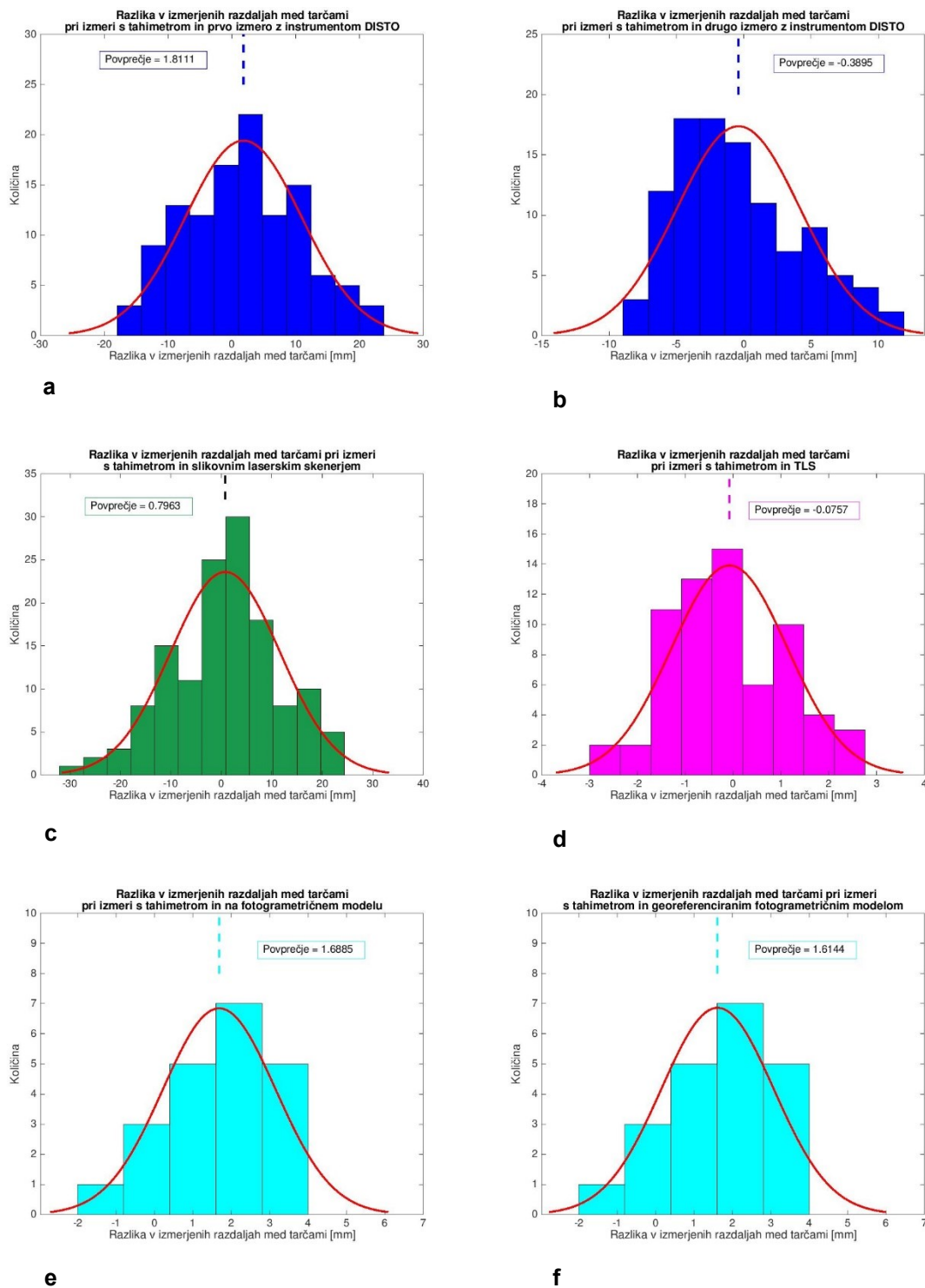
Zajem digitalnih vertikalnih izdankov in izkopskih čel s terestričnim daljinskim zaznavanjem predstavlja pomemben doprinos pri geološkem kartiranju in objektivnem geološkem popisu. Posebno pozornost je še vedno potrebno nameniti dovolj natančnemu georeferenciranju oblaka točk in 3D modelu. Terestrični laserski skenerji imajo vgrajeno GNSS napravo, zato so oblaki točk razmeroma hitro in zelo natančno orientirani v prostoru. Večji problem predstavlja orientacija modelov iz fotogrametrično zajetih fotografij, v kolikor nima fotoaparata že vgrajene naprave za pozicioniranje. Program ShapeMetriX 3D uporablja v ta namen sklop treh tarč (Poglavje 3.2.1.3.1), katerih velikost in orientacijo upoštevamo pri izdelavi 3D modela. Pri uporabi SfM fotogrametrije s fotoaparati pa je za ustrezno georeferenciranje modela potrebno sistematično zajeti položaje stojišč ter orientacijo in razdalje med oslonilnimi točkami. Orientacija posameznih geoloških vzorcev ni pomembna, zato za določitev velikosti modela uporabljamo ustrezne tarče in natančne merske trakove (Verma in Bourke, 2019). Pri georeferenciranju površinskih vertikalnih izdankov ob odsotnosti laserskega skeniranja, pa predstavlja določitev orientacije in dimenzij izziv. Na podlagi objave Tavani et al. (2016) smo preizkusili podoben pristop, ki bi pripomogel k enostavnejšemu zajemu podatkov in nadaljnji orientaciji 3D modela. V ta namen nam je podjetje Geoservis d.o.o. posodilo laserski razdaljemer Leica DISTO S910, z dosegom med 5 cm in 300 m, vgrajenim kompasom in možnostjo določitve središča meritve s fotografijo (Slika 4.9 b). V kamnolomu Elerji smo postavili instrument na stativ in izvedli dva sklopa meritev z deklarirano natančnostjo merjene dolžine ± 1 mm (Leica Geosystems AG, 2015). Pri meritvah na terenu se je izkazalo, da je z instrumentom težje določiti središče preko fotoaparata, zaradi slabe slike na zaslonu. Instrument poda rezultate lokacij v 3D prostoru v lokalnem koordinatnem sistemu, z navezavo na fotografije, ki pomagajo pri izboru natančnih meritev (Slika 4.15).

Primerjava razdalj med pari tarč pri meritvah z laserskim razdaljemerom in referenčnimi meritvami s tahimetrom je pokazala, da odstopanja niso velika. Razlike pri prvem sklopu meritev so do ± 30 mm (povprečje 1,81 mm) na razdalji do 7 m in so normalno porazdeljene (Slika 4.16 a). Pri upoštevanju vseh izmerjenih točk je standardni odklon 8,5 mm, v kolikor pa odstranimo meritve na tarčah z največjimi razlikami (82 in 90), pa znaša 6,3 mm. Napake so slučajne. Pri drugem sklopu meritev, ki smo jih izvedli na razdalji med 5 m in 7 m, so razlike manjše, in sicer do ± 15 mm (povprečje -0,39 mm), standardni odklon znaša 3,2 mm (Slika 4.16 b). Porazdelitev je rahlo desno simetrična (koeficient simetrije 0,60), torej prevladujejo razlike v negativno smer.



Slika 4.15: Primerjava fotografij določitve središča tarče z laserskim razdaljmerom Leica DISTO S910: nenatančna določitev središča tarče (levo) in razmeroma natančna določitev središča tarče (desno).

Figure 4.15: Comparison of photos from measurements of targets' centres using Leica DISTO S910: inaccurate centre definition (left) and relatively accurate centre definition of a target (right).



Slika 4.16: Primerjava razlik v izmerjenih razdaljah med tarčami: a. pri izmeri s tahimetrom in laserskim razdaljemerom; b. pri dveh izmerah z laserskim razdaljemerom; c. pri izmeri s tahimetrom in TLS; e. pri izmeri s tahimetrom in na fotogrametričnem modelu; f. pri izmeri s tahimetrom in georeferenciranim fotogrametričnim modelom.

Figure 4.16: Comparison of differences among measured targets' distances: a. measurements using multistation and laser distance meter; b. of two different measurements using laser distance meter; c. measurements using multistation and TLS; e. measurements using multistation and photogrammetric model; f. measurements using multistation and georeferenced photogrammetric model.

4.4 Kamnolom Elerji

Kamnolom Elerji leži na pobočju hriba Kaštelir nad Škofijami in je namenjen pridobivanju okrasnega kamna za zunanjo ureditev (Slika 4.17 in Slika 4.18). Aktivni del kamnoloma meri v dolžino približno 126 m, višina izkopnega čela je okoli 20 m. Zaradi dostopnosti, manjše izkopne aktivnosti ter prisotnosti fliša z nizko tektonsko poškodovanostjo sem ga izbrala za poligon, v katerem smo izvedli tri sklope meritev v letih 2014, 2016 in 2018 (Preglednica 4.8) in uporabili največ metod. Zato ga predstavljam kot prvo in najpomembnejšo lokacijo.



Slika 4.17: Prikaz lokacije kamnoloma Elerji pri Škofijah.

Figure 4.17: Location of the Elerji quarry near Škofije.

Preglednica 4.8: Pregled izvedenih meritev v kamnolomu Elerji: ročni zajem, terestrično lasersko skeniranje (TLS) ter stereo fotogrametrija in fotogrametrija SfM (PG).

Table 4.8: Overview of performed measurements in the Elerji quarry: manual data acquisition, terrestrial laser scanning (TLS) as well as stereo and SfM photogrammetry (PG).

Št.	Datum	Meritve			Opombe
		Ročni zajem	TLS	PG	
1	20.05.2014	o	o	o	TLS: Riegl VZ400 Fotogrametrija: ShapeMetriX 3D
2	23.03.2016	x	o	x	Odvzem vzorcev (5x laporovcev in 5x peščenjakov)
3	20.04.2016	o	x	x	Litološki popis profila
4	07.04.2017	o	x	x	Ročni zajem diskontinuitet
5	19.09.2018	x	o	o	PG: Olympus E-M1 II Geodetska izmera: Tahimeter Leica Nova Multistation MS50 Ročni skener: Leica BLK 360 Laserski razdaljemer: Leica DISTO S910
6	20.09.2018	x	o	o	TLS: Riegl VZ400 PG: Olympus E-M1 II
7	23.09.2018	x	x	o	PG: Olympus E-M1 II
8	25.09.2018	x	x	o	PG: Olympus E-M1 II
9	27.09.2018	x	x	o	PG: Olympus E-M1 II
10	29.09.2018	o	x	o	PG: Olympus E-M1 II Ročni zajem diskontinuitet

4.4.1 Uporabljene metode

Leta 2014 smo na SZ delu kamnoloma skenirali fliš s terestričnim laserskim skenerjem Riegl VZ-400. Skeniranje je izvajala Maja Bitenc iz podjetja DFG Consulting d.o.o. Stereofotogrametrijo z uporabo ShapeMetriX 3D pa nam je omogočil Inštitut za aplikativno geoznanost, Tü Graz (Avstrija), izbrana izkopna čela so bila tudi ročno geološko popisana z uveljavljenimi popisnimi listi (Priloga A.3).

V letu 2016 smo v okviru določevanja litološke sestave flišne kamnine na obravnavanem območju, detajlno skenirali del izkopnega čela s terestričnim laserskim skenerjem Riegl VZ-400. Skeniranje je izvedla Andreja Anžur iz podjetja DFG Consulting d.o.o. Obenem smo posneli detajlni litološki profil (Priloga A.4) ter odvzeli vzorce kamnin za mineraloško analizo (Živec et al., 2019). Izbrani profil je Kurtovič (2015) sedimentološko posnel za diplomsko nalogo.

Med 19. in 29. septembrom 2018 smo v kamnolomu izvedli detajlno geometrično analizo, ki je podrobneje predstavljena v poglavju 4.3. Poudarek meritev je bil predvsem na fotogrametričnemu zajemu po metodi SfM.



Slika 4.18: Pogled na fliš v kamnolomu Elerji pri Škofijah.

Figure 4.18: Overview on the flysch of the Elerji quarry near Škofije.

4.4.2 Pregled obravnavanega območja

Za kamnolom so značilne flišne kamnine eocenske starosti (3E_2), z menjavanjem svetlo sivega peščenjaka in temno sivega laporovca. Hribina je zaradi izpostavljanja atmosferskim pogojem srednje močno do močno preperela, plasti laporovca v zgornjem predelu kamnoloma že razpadajo. Plasti peščenjaka prevladujejo nad plastmi laporovca. Debelina plasti peščenjaka se giblje med 1 cm in 75 cm, plasti laporovca pa med 1 cm in 109 cm (Slika 4.18).

Plasti vpadajo na celotnem območju kamnoloma subhorizontalno proti ZSZ (303/03). V peščenjaku sta bila določena tudi dva sistema subvertikalnih razpok. Prvi sistem vpada proti JZ (247/88), drugi sistem pa proti SZ (283/89).

4.4.3 Rezultati

Kamnolom Elerji, ki sicer predstavlja aktiven kamnolom za pridobivanje predvsem okrasnega kamna, omogoča dostop do izkopnega čela, kar je pomembno pri korelaciji skeniranih podatkov z litološkimi značilnostmi obravnavanega območja. Kamnolom je predstavljal dober »testni poligon« za izvedbo meritev, ker ima vertikalno steno v flišu, za katerega so značilni enaki pogoji. Plasti laporovca in peščenjaka so bile razmeroma enakomerno preperete in hribina ni bila tektonsko poškodovana. Zaradi dostopnosti in tektonske nepoškodovanosti fliša smo del izkopnega čela izbrali za detajlno analizo vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka pri določanju litološke sestave heterogene hribine s pomočjo TLS. Z analizo smo želeli potrditi hipotezo, koliko lahko s terestričnim daljinskim zaznavanjem nadomestimo ročne metode zajema podatkov in jih uporabimo pri razlikovanju med posameznimi litološkimi enotami ter določevanju njihovega deleža.

4.4.4 Popis izdanka in litološki profil

Izbrano izkopno čelo leži na SZ delu izkopnega območja kamnoloma. Višina izbranega profila je znašala 930 cm (Slika 4.19). Zaradi omejenega dostopa do zgornjega dela profila ter nevarnosti krušenja materiala iz zgornjega dela kamnoloma je bil profil razdeljen v dva manjša profila. Za ustrezno primerjavo pridobljenih podatkov iz skeniranja in litološkimi značilnostmi obravnavanega območja je bilo izkopno čelo inženirsko geološko popisano po uveljavljenem popisnem listu (Priloga A.3). Profil je bil tudi detajlno litološko popisano z meritvami debelin posameznih plasti v merilu 1 : 100 (Priloga A.4).



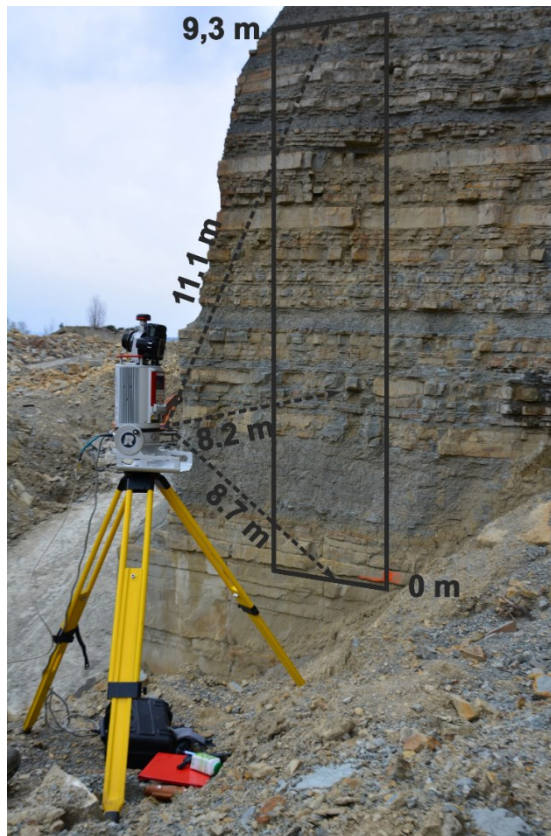
Slika 4.19: Posnetek obravnavanega izkopnega čela v kamnolomu Elerji s poudarjenim detajlnim profilom. Višina profila je bila 930 cm. Zaradi nedostopnosti in možnosti krušenja materiala iz zgornjih delov kamnoloma, smo zgornji del profila popisali na desni strani izkopnega čela kamnoloma (Živec et al., 2019, str. 1633).

Figure 4.19: Image of the investigated wall of Elerji quarry with emphasized profile. The profile height was 930 cm. Due to the limited access and possibility of ravelling material from the upper part of the quarry wall, we logged the upper part of the profile on the right side of the quarry wall (Živec et al., 2019, pp. 1633).

4.4.5 Terestrično lasersko skeniranje (TLS)

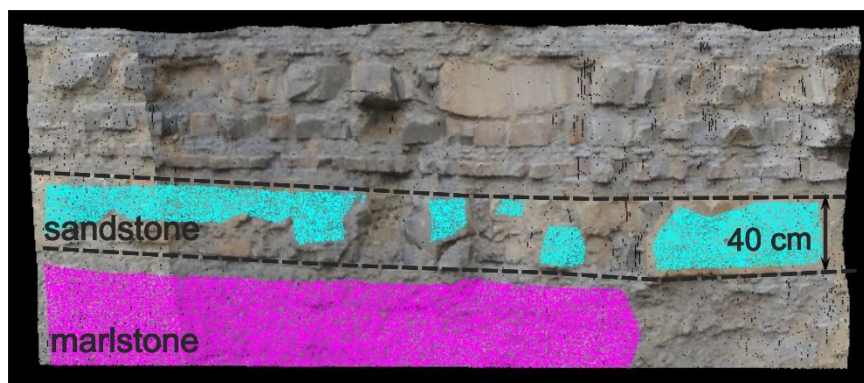
Podatke izbranega izkopnega čela kamnoloma smo zajeli z impulznim terestričnim laserskim skenerjem Riegl VZ-400 (Riegl LMS GmbH, 2011) z nameščenim DSLR (zrcalno refleksnim) fotoaparatom Nikon D700 (Slika 4.20).

Lidarske oblake točk smo ročno obdelali s programom RiSCAN PRO v.1.8.0 (Riegl LMS GmbH, 2011). Pri analizi vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka za različne litološke enote (peščenjak, laporovec, glinavec) in stopnje vlažnosti (suho, vlažno, mokro) smo izbrali notranja območja oblaka točk posameznih plasti vzdolž profila (Slika 4.21). Zbrane podatke intenzitete odboja smo statistično analizirali.



Slika 4.20: Skeniranje izkopnega čela kamnoloma s terestričnim laserskim skenerjem Riegl VZ400 z nameščenim DSLR (zrcalno refleksnim) fotoaparatom Nikon D700 (Živec et al., 2019, str. 1634).

Figure 4.20: Scanning the outcrop of the quarry wall using the terrestrial laser scanner Riegl VZ-400 with a mounted DSLR (digital single-lens reflex) camera type Nikon D700 (Živec et al., 2019, pp. 1634).



Slika 4.21: Postopek ročnega izbora analiziranih odsekov (npr. litologija, stopnja vlažnosti, stopnja preperelosti). Pri analizi smo uporabili samo izbrane segmente notranjega dela posameznih plasti oblaka točk. Na fotografiji sta prikazana segmenta laporovca (vijolične barve) ter peščenjaka (turkizne barve). Podobno smo izbrali segmente glede na stopnjo vlažnosti in preperavanja (Živec et al., 2019, str. 1635).

Figure 4.21: Workflow for manual selection of analysed features (i.e. lithology, moisture content, weathering degree). We used only selected segments of the inner part for an individual layer in the point cloud for the analysis. A segment of marlstone (magenta colour) and sandstone (cyan colour) is presented in the photo. Similar workflow for selecting segments were used for the analysis of the degree of moisture content (Živec et al., 2019, pp. 1635).

4.4.6 Analiza lidarskega oblaka točk (Riegl) glede na litološko sestavo in stopnjo vlažnosti

Namen analize je bila ocena korelacije vrednosti surovih TLS intenzitet odboja oddanega laserskega žarka (TLS-RAW) z litološko sestavo opazovanega izkopnega čela kamnoloma v tankoplastnati heterogeni hribini. Analiziran je bil lidarski oblak točk (Riegl) opazovanega litološkega profila. Da bi bili podatki za statistično analizo čim bolj reprezentativni, sem v več plasteh vzdolž litološkega profila izbrala notranje segmente različnih velikosti (Slika 4.21).

Splošno statistično analizo vrednosti intenzitete odboja iz lidarskega oblaka točk (Riegl) sem izvedla v programu Matlab. V analizo sem vključila 3.766.944 vrednosti laporovca in 2.911.588 vrednosti peščenjaka. Glede na to, da so vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW odvisne od oddaljenosti od opazovane tarče, sem upoštevala predlagano korekcijo s strani Humair et al. (2015), ki so na podlagi meritev določili diagram odvisnosti razpona intenzitete odboja od oddaljenosti od tarče. Litološki profil na izkopnem čelu kamnoloma smo lasersko skenirali z razdalje 8,2 m, ki leži pod spodnjo mejo omenjenega diagrama (Humair et al., 2015). Vrednosti intenzitet odboja TLS-RAW zato nisem korigirala glede na oddaljenost od opazovanega objekta.

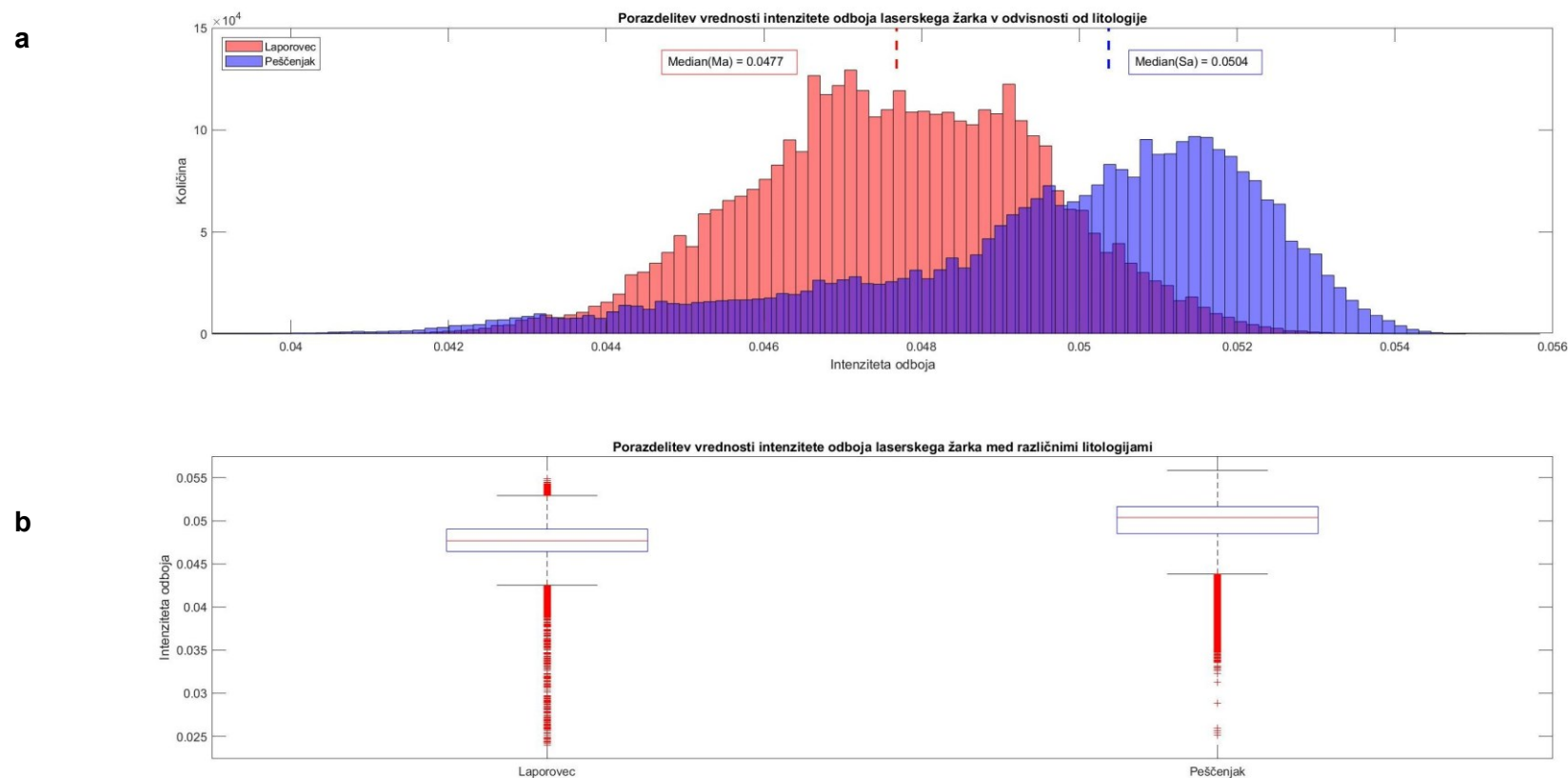
Histogram (Slika 4.22 a) prikazuje porazdelitev vrednosti Intenzitete odboja TLS-RAW za laporovce in peščenjake. Glede na to, da sem analizo izvedla na podlagi vrednosti lidarskega oblaka točk (Riegl), so bili rezultati statistično značilni. Za preverbo razlik je bil uporabljen standardni t-test s predpostavko (ničelno domnevo), da sta povprečji dveh testiranih skupin enaki, zato je bila stopnja značilnosti nastavljena na $\alpha = 0,05$ (stopnja zaupanja 5 %). Izračunana p-vrednost je bila pod 0,001, torej precej nižja od praga 0,05, kar pomeni, da lahko ničelno domnevo o enakih povprečjih zavrnilo, saj sta skupini laporovca in peščenjaka statistično različni. Za laporovce je značilna normalna porazdelitev, medtem ko je porazdelitev peščenjakov levo asimetrična, saj so vrednosti v splošnem višje od povprečja, kar nakazuje na večje število vrednosti z višjim razponom intenzitete odboja.

Porazdelitev vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW glede na posamezne litološke enote je predstavljena s škatlastim diagramom (Slika 4.22b), ki je ustvarjen z razponom med spodnjim in zgornjim kvartilom skupaj z mediano ter najmanjšo in največjo vrednostjo intenzitete odboja. Horizontalna linija v pravokotni škatli prikazuje mediano izmerjenih vrednosti intenzitete odboja. Škatlasti diagram nazorno prikazuje razlike, ki se navezujejo na različne litološke enote. Za laporovce so značilne brezdimenzijske vrednosti intenzitete odboja med 0,024 in 0,054 (povprečje 0,047), za peščenjake pa od 0,048 do 0,051 (povprečna vrednost 0,049).

Pri nadaljnjem izboru karakterističnih vrednosti razpona intenzitete odboja za posamezne litološke enote sem uporabila 25 %, 50 % (mediana) in 75 % kvartile (spodnjega in zgornjega kvartila) vrednosti intenzitete odboja, določenih iz škatlastega diagrama. Na podlagi le-teh sem nato izločila posamezne litološke enote iz litološkega profila obravnavanega izkopenega čela kamnoloma.

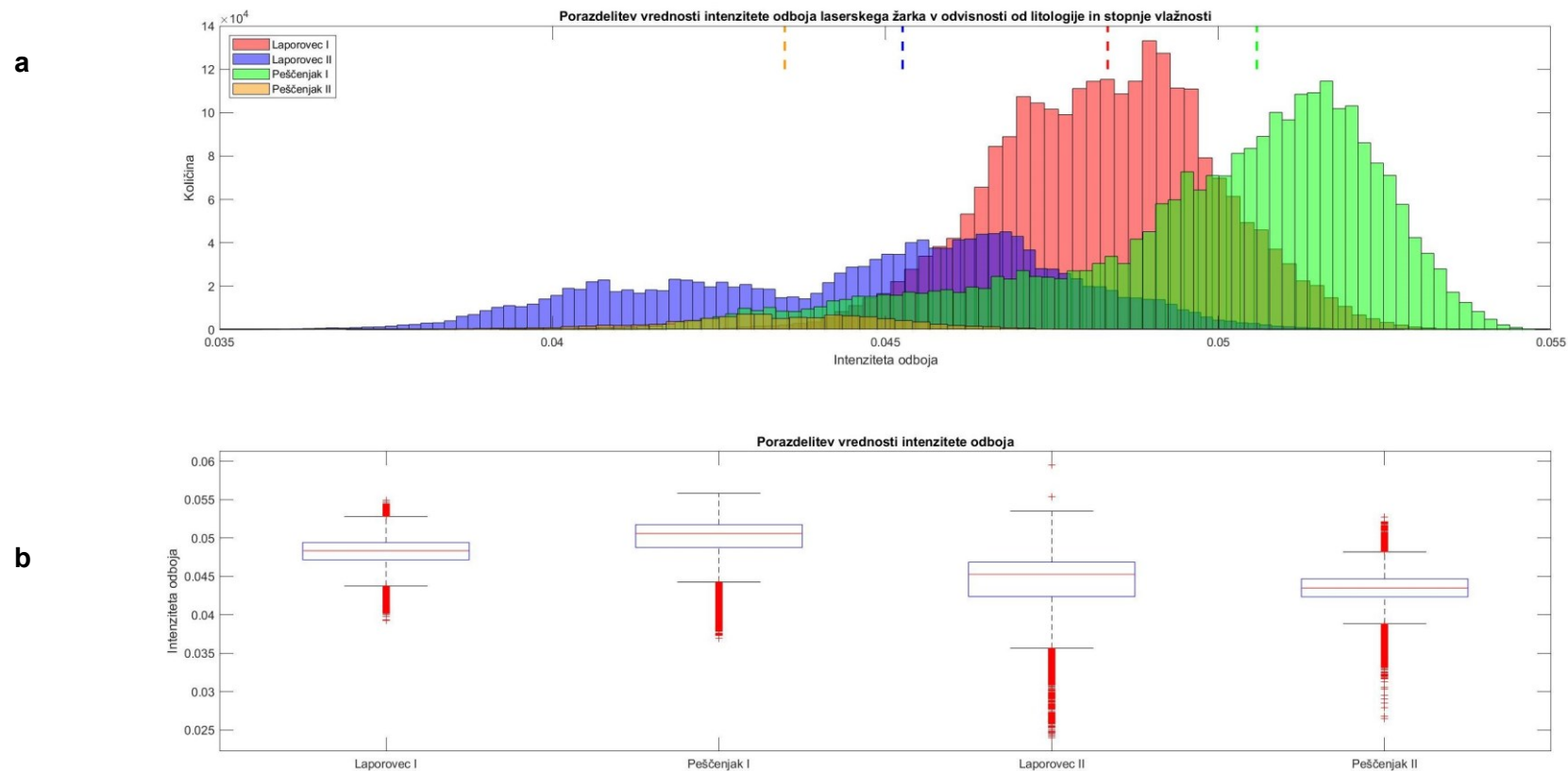
Poleg litoloških enot sem analizirala porazdelitve vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW glede na litološke enote in stopnjo vlažnosti. Podobno kot pri litoloških enotah sem iz lidarskega oblaka točk (Riegl) izbrala vrednosti intenzitete odboja ločeno za suhe in vlažne litološke enote (laporovce in peščenjake). Ovrednoteni podatki so izrazito statistično značilni (p-vrednost pri t-testu je pod 0,001). Iz histograma (Slika 4.23 a) je razvidno, da je za suhe laporovce značilna normalna porazdelitev vrednosti intenzitete odboja (rdeča), medtem ko izkazuje porazdelitev za vlažne laporovce dva vrhova (modra), ki se lahko navezujejo na dodatne razlike med vlažnimi in mokrimi površinami laporovcev. Porazdelitev vrednosti intenzitete odboja za suhe peščenjake je levo asimetrična (zelena), saj so vrednosti načeloma višje od povprečja. Vrednosti intenzitete odboja za vlažne peščenjake pa imajo normalno porazdelitev (rumena).

Porazdelitev vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW glede na stopnjo vlažnosti posameznih litoloških enot je predstavljena s škatlastim diagramom (Slika 4.23 b), ustvarjenim na podlagi mediane, spodnjega (25 %) in zgornjega (75 %) kvartila ter najmanjšo in najvišjo vrednostjo intenzitete odboja. Vodoravna linija v pravokotni škatli prikazuje mediano izmerjenih vrednosti intenzitete odboja. S pomočjo škatlastega diagrama so se lahko izdvojile razlike med litološkimi enotami in stopnjo vlažnosti (Slika 4.23 b). Razpon vrednosti intenzitete odboja znaša za suhe laporovce med 0,039 in 0,054 (povprečje 0,048), za vlažne laporovce pa od 0,024 do 0,059 (povprečje 0,044). Za suhe peščenjake so značilne vrednosti intenzitete odboja med 0,037 in 0,055 (povprečje 0,049), za vlažne peščenjake pa od 0,026 do 0,052 (povprečje 0,043). Razlike med suhimi in vlažnimi litološkimi enotami potrjujejo odvisnost vrednosti Intenzitete odboja TLS-RAW od vlažnosti.



Slika 4.22: a Histogram porazdelitve TLS-RAW vrednosti intenzitete odboja za laporovce z mediano 0,047 (rdeča črtkana črta) in peščenjake z mediano 0,050 (modra črtkana črta), izločenih iz opazovanega profila. b Porazdelitev TLS-RAW vrednosti intenzitete odboja za laporovce (levo) in peščenjake (desno) s škatlastim (angl. box plot) diagramom. Pravokotna škatla predstavlja razpon med spodnjim in zgornjim kvartilom skupaj z mediano (Živec et al., 2019, str. 1636).

Figure 4.22: a Histogram showing the distribution of TLS-RAW intensity values for marlstones with a median value of 0,047 (red dashed line) and sandstones with a median value of 0,050 (blue dashed line), evaluated from the investigated profile. b Distribution of TLS-RAW intensity values for marlstones (left) and sandstones (right) presented with box plots. The box represents the lower and upper quartiles as the outline, along with a median value (Živec et al., 2019, pp. 1636).



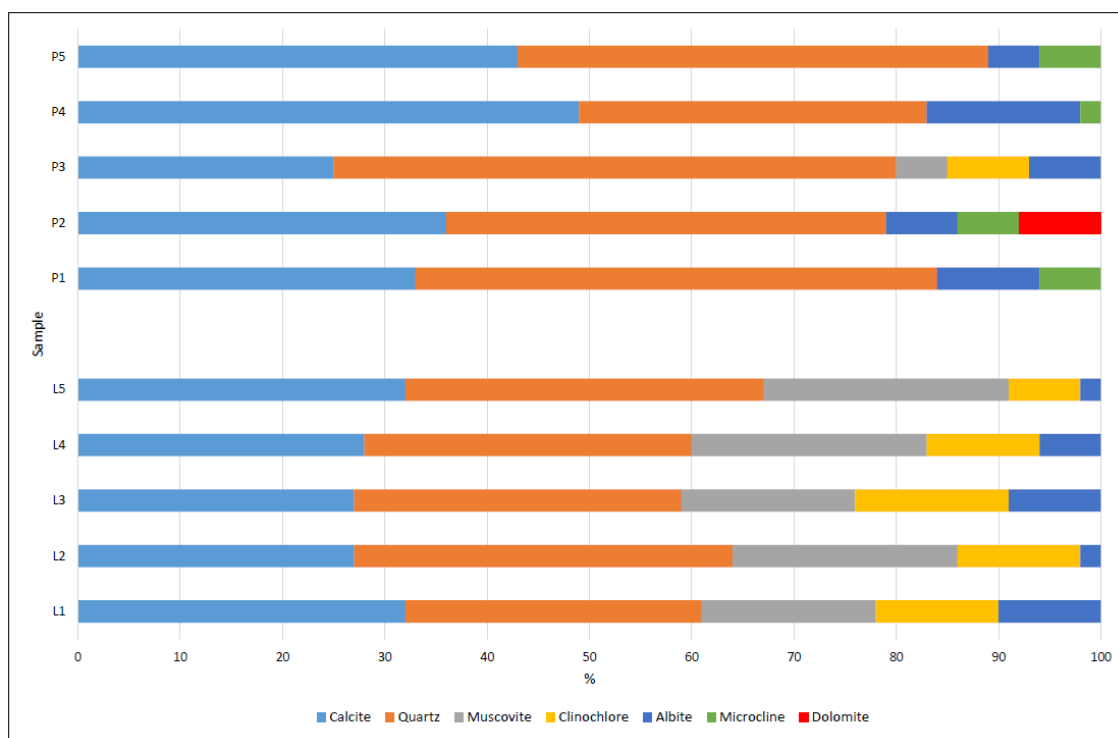
Slika 4.23: a Histogram porazdelitve TLS-RAW vrednosti intenzitete odboja za laporovce in peščenjake glede na stopnjo vlažnosti, izločene iz opazovanega litološkega profila, s poudarjeno mediano za: suhe (I) laporovce (rdeča črta), vlažne (II) laporovce (modra črta) ter suhe (I) peščenjake (zelena črta) in vlažne (II) peščenjake (rumena črta). b Porazdelitev vrednosti intenzitete odboja s škatlastim (box plot) diagramom. Pravokotna škatla predstavlja razpon med spodnjim in zgornjim kvartilom skupaj z mediano (Živec et al., 2019, str. 1637).

Figure 4.23: a Histogram showing the distribution of TLS-RAW intensity values for marlstones and sandstones, according to moisture content, evaluated from the investigated profile with emphasized median value for: dry (I) marlstone (red line), damp (II) marlstone (blue line), dry (I) sandstone (green line) and damp (II) sandstone (yellow line). b Distribution of intensity values presented with box plots. The box represents the lower and upper quartiles as the outline, along with a median value (Živec et al., 2019, pp. 1637).

4.4.7 Mineraloška in sedimentološka analiza fliša

V kamnolomu Elerji smo zaradi manjše aktivnosti in razmeroma stabilnega izkopa lahko izvedli več detajlnih meritev in dodatne raziskave, na podlagi katerih smo lahko preverili vpliv mineralne sestave na vrednost intenzitete odboja laserskega žarka iz terestričnega laserskega skeniranja. Pri analizi podatkov terestričnega daljinskega zaznavanja heterogenih hribin, kot je fliš, je mogoče litološko sestavo potrditi z različnimi metodami. Za določitev mineralne sestave litoloških enot, ki gradijo fliš, smo uporabili rentgensko difrakcijo.

Pri litološkem profiliranju smo odvzeli pet vzorcev laporovca (L1 do L5) ter pet vzorcev peščenjaka (P1 do P5) in s pomočjo rentgenske difrakcije kvantitativno določili mineralno sestavo izbranih plasti. Na podlagi rezultatov smo nadalje želeli mineralno sestavo primerjati z intenziteto odboja TLS ter vrednostmi RGB.



Slika 4.24: Mineralna sestava vzorcev peščenjakov (P1 do P5) in laporovcev (L1 do L5) (Živec et al., 2019, str. 1638).

Figure 4.24: Mineral composition of sandstones' (P1 to P5) and marlstones' (L1 to L5) samples (Živec et al., 2019, pp. 1638).

Analizo rentgenske difrakcije je izvedel izr. prof. dr. Matej Dolenc iz Oddelka za geologijo, UL NTF, ki je rezultate predstavil v programu X'Pert (PANalytical B.V.). Za preverbo razvrščanja vzorcev smo uporabili dendrogram.

Na podlagi analize smo ugotovili, da zastopata kalcit in kremen približno 60-90 % vseh mineralov, kljub temu pa se med laporovci in peščenjaki pojavljajo razlike. Peščenjaki vsebujejo večinoma kalcit in kremen ter mikroklin (ta se ne pojavlja v laporovcih), v enem vzorcu pa se je pojavljal dolomit. Vzorec peščenjaka P3 je bil zelo podoben laporovcem, saj je vseboval tako muskovit kot klinoklor, vendar ga je analiza razvrščanja kljub temu uvrstila k ostalim peščenjakom (Slika 4.24).

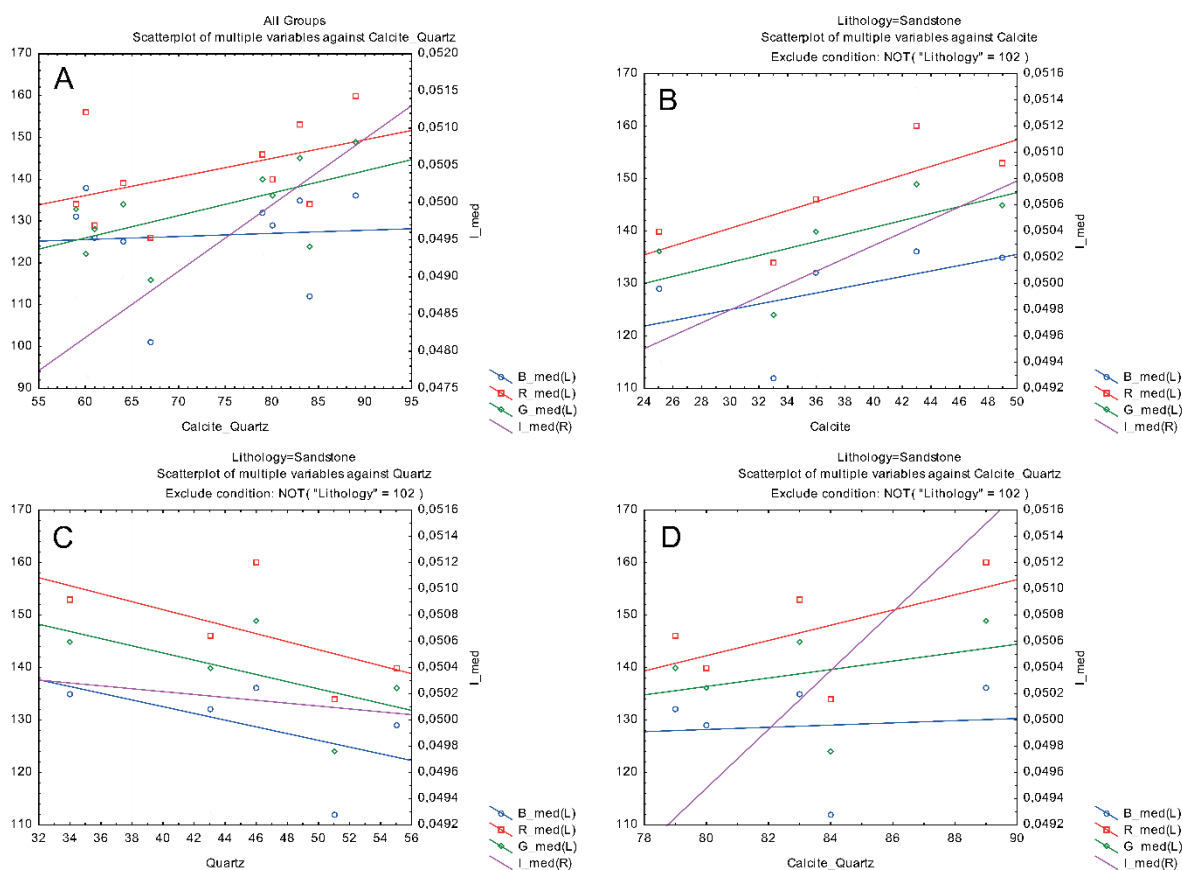
Preglednica 4.9: Koeficienti korelacije za intenziteto odboja ter tri barvne kanale (rdeča, zelena, modra) z mineralno sestavo (kalcit, kremen, njuna vsota). Številke v **krepkem** tisku nakazujejo statistično pomembne korelacije, število zvezdic pa statistično raven (*95 %, **99 %, ***99,9 %). Število zvezdic se navadno uporablja za raven statistične pomembnosti. V okviru rezultatov, sta v preglednici prikazani samo ravni 95 % in 99,9 %, medtem ko raven 99 % ni prikazana (Živec et al., 2019, str. 1638).

*Table 4.9: Correlation coefficient of intensity and three colour bands (red, green, blue) with mineralogical composition (calcite, quartz and their sum). Numbers in **bold** indicate statistically significant correlations, with the number of asterisks denoting the statistical level (+95 %, **99 %, ***99,9 %). The number of asterisks are usually used as notations for the statistical significance level. The outcome within the results showed only the 95 % and 99,9 % level, therefore, the level 99 % is not presented in the table (Živec et al., 2019, pp. 1638).*

Vse skupine (N=10)	Intenziteta odboja	Rdeča	Zelena	Modra
Kalcit	0,64*	0,51	0,59	0,22
Kremen	0,62	0,13	0,26	-0,10
Kalcit + kremen	0,91***	0,44	0,59	0,07
Laporovec (N=5)	Intenziteta odboja	Rdeča	Zelena	Modra
Kalcit	-0,13	-0,60	-0,64	-0,65
Kremen	0,69	0,01	0,01	-0,41
Kalcit + kremen	0,54	-0,46	-0,50	-0,99*
Peščenjak (N=5)	Intenziteta odboja	Rdeča	Zelena	Modra
Kalcit	0,51	0,76	0,64	0,50
Kremen	-0,10	-0,60	-0,57	-0,53
Kalcit + kremen	0,999***	0,56	0,33	0,08

Intenziteta odboja je odvisna od kombinirane sestave kalcita in kremenca z izrazito korelacijo (koeficient korelacije $r = 0,90$, Preglednica 4.9), kar velja za peščenjake (še izrazitejša korelacija $r = 0,999$), ne pa tudi za laporovce. Dobro korelacijo intenzitete odboja s sestavo kalcita in kremenca lahko razložimo z dvema faktorjema, ki sta odvisna od litologije: svetlost mineralov ter velikost zrn. V peščenjakih so namreč zrna večja, oba minerala pa tudi odsevata več svetlobe. Kljub temu pa je tako izrazito razmerje možno samo v primeru, da sta prisotna oba minerala. Korelacija je v peščenjakih višja za kalcit ($r = 0,51$) kot za kremen ($r = -0,10$), saj predstavlja kremen prozoren mineral, ki je zmožen razpršiti odbiti laserski žarek znotraj zrn in se posledično ne odbije proti skenerju v celoti (Preglednica 4.9).

Primerjava barvnih kanalov (rdeča, zelena, modra) z mineralno sestavo pa ni pokazala nobene smiselne povezave (Slika 4.25). Zaradi premajhnega števila podatkov in dejstva, da nima vsaka plast enake mineralne sestave, so podatki precej razpršeni. Dodatno smo na podlagi mineralne analize združili vzorce v enake litološke razrede, zato se niti krivulja podatkov ne prilega dovolj dobro. Koeficienti korelacije imajo velik razpon vrednosti, korelacije niso bile dovolj pomembne. Tudi korelacije za laporovce so bile za razliko od peščenjakov, večinoma blizu nič ali negativne. Korelacija barvnih kanalov pri peščenjakih je bila višja za kalcit, za kremen pa celo negativna, kar lahko pripišemo njegovi prosojnosti. Rezultati se tako ne skladajo z raziskavami Humair et al. (2015), kjer so se raziskave s fotogrametričnimi RGB barvnimi kanali (predvsem kanala B oz. modrega kanala) pri določitvi litologije izkazale kot bolj uporabne od vrednosti intenzitete odboja TLS. Pri tem pa je potrebno poudariti, da se raziskave Humair et al. (2015) razlikujejo od mojih raziskav, saj so se izvajale na menjavanju karbonatov in laporovcev ter podrejeno muljevca, medtem ko je za fliš JZ Slovenije značilno menjavanje plasti peščenjaka in laporovca. Karbonati izkazujejo precej višje intenzitete odboja ter imajo različne vrednosti RGB.



Slika 4.25: Korelacija vrednosti intenzitete odboja (I) ter rdečega (R), zelenega (G) in modrega (B) kanala z vsebnostjo kalcita in kremenca. Zaradi majhnega števila podatkov ter dejstva, da plasti nimajo enake sestave, so podatki razpršeni. Dodatni smo na podlagi mineraloške analize združili vzorce v isti litološki razred. Prileganje krivulje zato ni dobro. a. Korelacija I, R, G in B s kalcitom in kremenom tako v vzorcih peščenjaka kot laporovca. b. Korelacija v peščenjakih za vsebnost kalcita. c. Korelacija v peščenjakih za vsebnost kremenca. d. Korelacija v peščenjakih za vsebnost kalcita in kremenca (Živec et al., 2019, str. 1639).

Figure 4.25: Correlation of intensity values (I), as well as red (R), green (G) and blue (B) colour bands with calcite and quartz content. Due to the small number of data and the fact, that not every layer has an identical mineralogical composition, the values are scattered. In addition, based on mineralogical analysis, we have grouped the samples into the same lithology classes. Consequently, the fitting of the data curve is not very good. a. Correlation of I, R, G, B with calcite and quartz in both sandstone and marlstone samples. b. Correlation in sandstones for calcite content. c. Correlation in sandstones for quartz content. d. Correlation in sandstones for calcite and quartz content (Živec et al., 2019, pp. 1639).

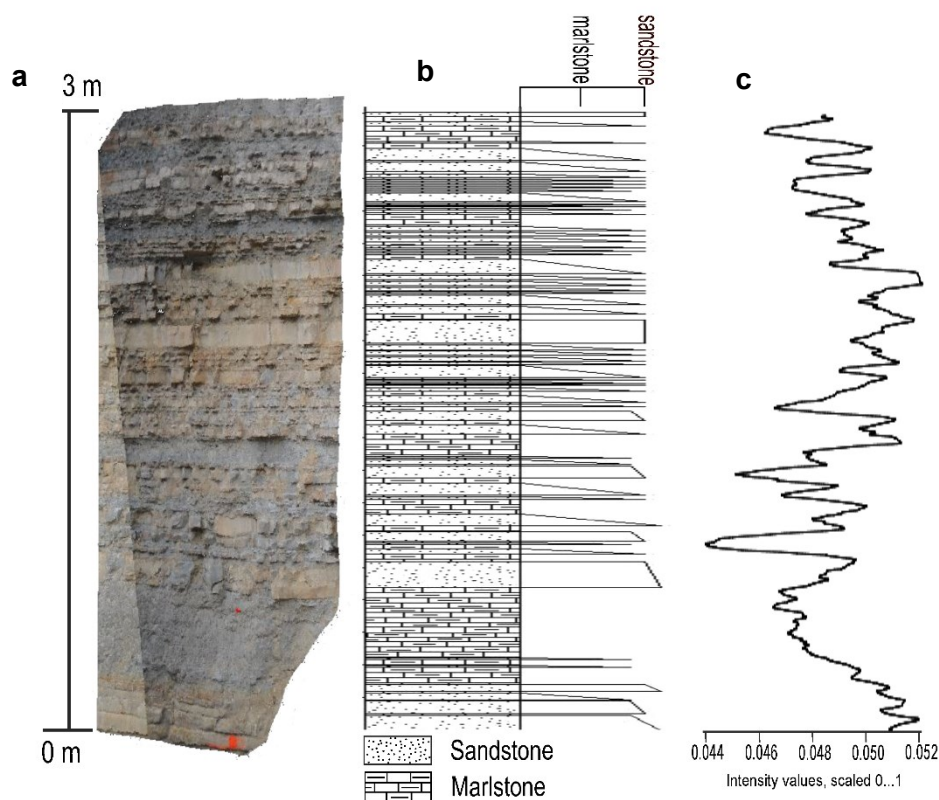
Obravnavani litološki profil je v okviru raziskovalne naloge dodatno sedimentološko analiziral Kurtovič (2018), s katero je želel določiti sestavo kamnin, ki gradijo fliš ter razvoj eocenskega fliša na območju kamnoloma. V sklopu sedimentološkega profila je odvil vzorce peščenjaka, ki jih je detajlno mikroskopsko analiziral. Ugotovil je, da je za drobnozrnati peščenjak (velikost zrn od 0,063 mm do 0,2 mm) značilno razmerje med zrn in vezivom 60:40. Med zrn prevladujejo (52 %) terigena zrna (kremen, litična zrna karbonatov in glinenci, manj pogosti so minerali sljud, idr.), delež ortokemičnih komponent je okoli 40 %, med katerimi sta najpogostejša kalcitni in kremenov cement. V vzorcih je bilo najmanj alokemičnih komponent (8 %), med katerimi so prevladovali delci rdečih alg, školjčne lupine, intraklasti, idr. Vezivo

peščenjaka predstavlja kalcitni cement. Srednjezrnati peščenjak (velikost zrn 0,2 mm–0,63 mm) sestavljajo zrna in vezivo v razmerju 52:41, preostalih 7 % sta osnova in pore. Za razliko od drobnozrnatih peščenjakov, so v srednjezrnatih peščenjakih prevladovale ortokemične komponente (50 %), terigenih zrn je bilo nekoliko manj (40 %), najmanjši delež so predstavljale alokemične komponente (10 %). Sestava zrn je podobna kot pri drobnozrnatih peščenjakih. V debelozrnatih peščenjakih (0,63 mm–2,0 mm) je razmerje med zrn in cementom 56:38, osnove in por je preostalih 6 %. V zrnih je prevladoval delež terigenih komponent (50 %), med katerimi so bila najpogostejša zrna kremenca, ortoklaza in sljude, pojavljala pa so se še litična zrna kvarcita, roženca, karbonatov in blestnika. Med ortokemičnimi komponentami (40 %) sta predstavljala največji delež kalcitni in kremenov cement, med alokemičnimi komponentami (10 %) pa delci rdečih alg, lupine školjk in foraminifere.

Če primerjamo rezultate sedimentološke analize (Kurtovič, 2018) z mineraloško analizo vzorcev peščenjaka izbranega profila v kamnolomu Elerji, lahko ugotovimo, da se skoraj v celoti ujemajo. Med zrn prevladujeta kalcit in kremen, pomemben delež pa predstavljajo tudi zrna glinencev. Dobljeni rezultati so pri nadaljnji analizi pomembni, saj pomagajo pri interpretaciji vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka v sklopu določanja litološke sestave oziroma pri razlikovanju med litološkimi enotami.

4.4.8 Korelacija med vrednostmi intenzitete odboja ter litologijo in stopnjo vlažnosti

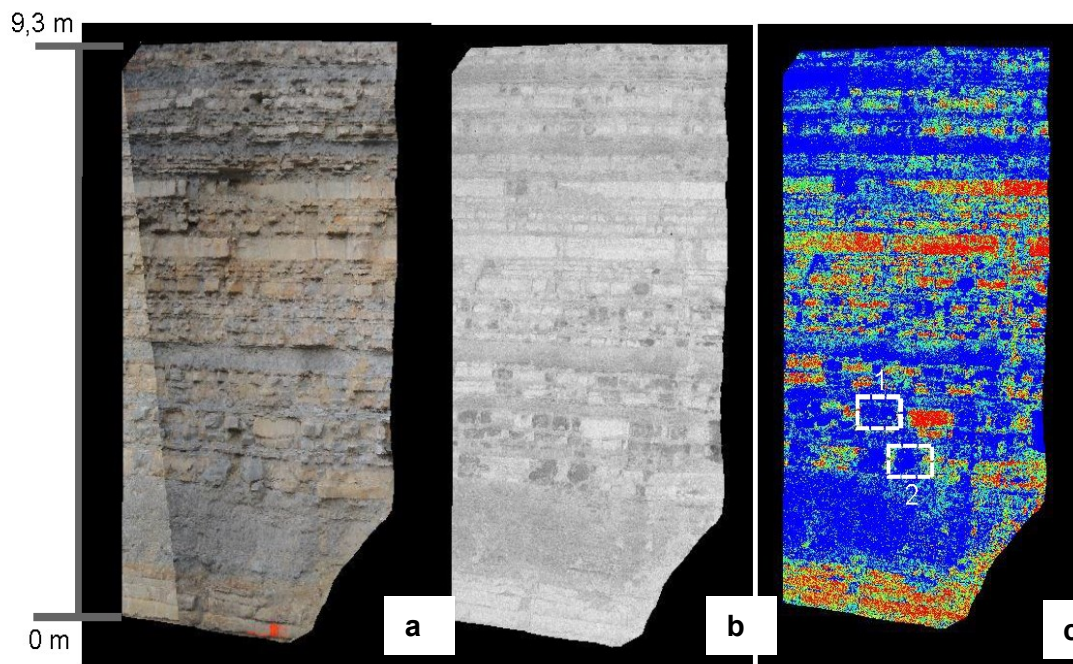
Rezultate analize podatkov intenzitete odboja sem uporabila pri njihovi korelaciji z izbranim litološkim profilom, za katerega je značilno menjavanje plasti peščenjaka in laporovca. Pri tem sem manjši izsek oblaka točk uporabila za oceno odvisnosti intenzitete odboja vzdolž profila. Kljub manjšemu izseku oblaka točk je bila količina podatkov še vedno velika (12.592.239 točk), zato sem se pri filtriranju poslužila metode drseče sredine. Rezultat diagrama drseče sredine prikazuje relativno dobro ujemanje vrednosti intenzitete odboja in litologije (Slika 4.26), pri čemer se višje vrednosti nanašajo na plasti peščenjaka, nižje vrednosti pa na plasti laporovca.



Slika 4.26: Detajlna analiza izbranega litološkega profila: a Fotografija skeniranega odseka. b Litološki profil. c Porazdelitev vrednosti intenzitete odboja vzdolž profila (Živec et al., 2019, str. 1640).

Figure 4.26: Detailed analysis of selected lithological profile: a Photograph of the scanned section. b Lithological profile. c Distribution of intensity values along the profile (Živec et al., 2019, pp. 1640).

Ustreznost določanja intervalov intenzitete odboja za posamezne litološke enote sem empirično testirala z izločitvijo posameznih plasti na istem izdanku. Preverbo sem izvedla z intervalom intenzitete odboja za peščenjak (0,048–0,051), ki predstavlja spodnji in zgornji kvartil škatlastega diagrama. Rezultati preverbe so predstavljeni na sliki 4.27 c, in sicer na podlagi modro-rdeče barvne palete. Vrednosti intenzitete odboja, ki so nižje od spodnje meje, so obarvane z modro, medtem ko so višje vrednosti od izbranega intervala, obarvane z rdečo barvo. Iz predstavljenega pogleda bi lahko razločili srednje debele in debele plasti peščenjaka, in laporovca, pri čemer se razločno vidijo tudi plasti peščenjaka, debeline okoli 2 cm. Kljub temu, da je mogoče izločiti posamezne litološke plasti, pa zasledimo na oblaku točk tudi nepravilnosti. Na sliki 4.27 izstopata območji, ki sta označeni s kvadratoma 1 in 2. Na podlagi obarvanega lidarskega oblaka točk (Slika 4.27 a) se na teh mestih raztezata plasti peščenjaka, ki pa izkazujeta nižje vrednosti intenzitete odboja od izbranega intervala. Poudarjeni napaki predstavljata parametre, ki vplivajo na vrednosti intenzitete odboja in se lahko nanašajo bodisi na nepreperelo kamnino (neprepereli peščenjak) bodisi na akumulacijo preperine laporovca.



Slika 4.27: Izbrano izkopno čelo kamnoloma za preverbo intervalov posameznih litoloških enot. a Obarvan lidarski oblak točk (Riegl) izkopnega čela kamnoloma, s tanko plastnatim flišem; b Vrednosti Intenzitete odboja TLS-RAW izbranega izkopnega čela. c Izločene plasti peščenjaka v svetlo modri-rumeni-rdeči barvi (razpon vrednosti intenzitete odboja med 0,048 in 0,051) ter plasti laporovca v temno modri barvi. Vz dolž plasti peščenjaka so opazni segmenti z nizkimi vrednostmi intenzitete odboja, kar se lahko navezuje na sveže (nepreperete) dele peščenjaka (okno 1) ali akumulacijo preperine (okno 2), (Živec et al., 2019, str. 1640).

Figure 4.27: Quarry section where the intervals for individual lithological units were empirically tested; a Coloured lidar point cloud (Riegl) of the observed quarry wall with thin-bedded flysch. b TLS-RAW intensity values of the quarry wall. c Extrapolated sandstone layers in light blue-yellow-red (intensity values ranging from 0,048 to 0,051) and marlstone layers in dark blue. Along the sandstone layers, segments with lower intensity values can be seen and could be referred to fresh (non-weathered) parts of sandstone layers (window 1) or the accumulation of residual soil (window 2), (Živec et al., 2019, pp. 1640).

Analiza vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW v odvisnosti od litološke sestave in stopnje vlažnosti je pokazala uporabne rezultate. Na izdankih fliša se plasti peščenjaka in laporovca sicer ločijo na pogled oz. na fotografiji, vendar se je na terenu izkazalo, da ni vedno tako. Z analizo sem preverila možnost razlikovanja med posameznimi litološkimi enotami s pomočjo intenzitete odboja TLS-RAW. Rezultati so pokazali, da ima TLS dodano vrednost, saj dobimo z intenziteto odboja laserskega žarka numerično vrednost, ki jo lahko vključimo v analize, kot je razvidno iz histogramov (Slika 4.22 in Slika 4.23) ter empirične preverbe (Slika 4.27). Iz same fotografije se to ne vidi oz. se ne more kvantitativno ovrednotiti. Rezultati pa so med drugim pokazali, da prihaja pri celoviti analizi oz. litološki segmentaciji izkopnega čela v heterogeni hribini do anomalij, kar je razvidno iz histogramov. Zaradi različne stopnje

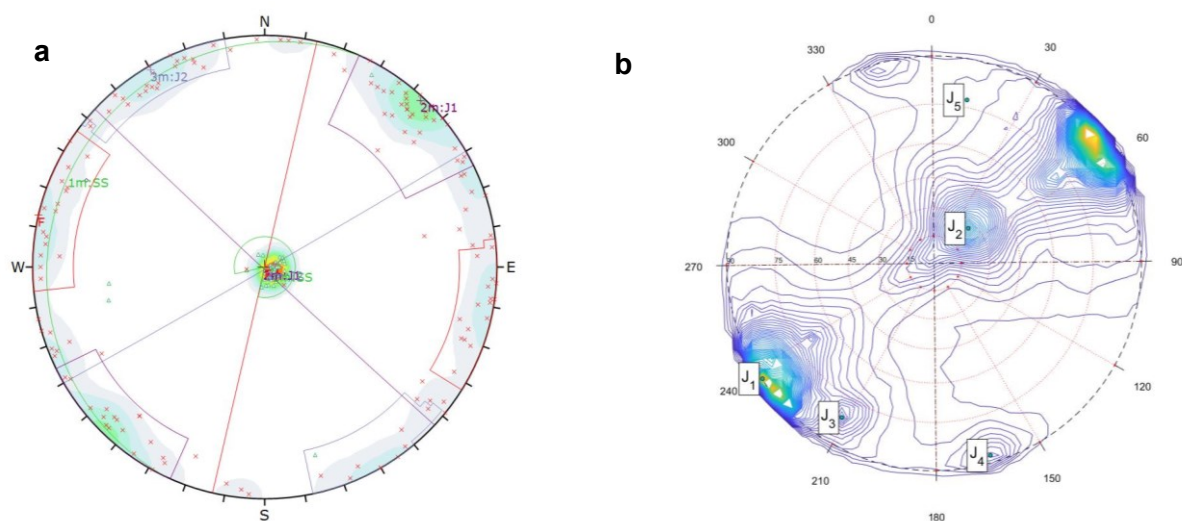
preperevanja ali stopnje vlažnosti znotraj iste litološke enote prihaja do prekrivanja vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka, zato jih težje ločimo med seboj (Slika 4.27 c).

4.4.9 Določitev geometrije diskontinuitet

V kamnolomu Elerji smo izvedli obsežen program meritev z ročnim popisom izkopnega čela, terestričnim laserskim skeniranjem in bližnjleslikovno fotogrametrijo. Natančnejša primerjava med meritvami v kamnolomu je bila predstavljena v poglavju 4.3. V kamnolomu poteka izkop z bagrom z nameščenim pnevmatskim kladivom, zato se diskontinuitete na izkopnem čelu ohranijo. V okviru določitve geometrije iz oblaka točk in 3D modela sem želela preveriti tudi programe, ki so bili v zadnjem času razviti z namenom analize geoloških struktur, ki bi jih lahko uporabili pri inženirsko geološkem popisu heterogene hribine. Na podlagi pridobljenih podatkov o sestavi in lastnostih diskontinuitet bi lahko izkopno čelo v flišu bolj objektivno karakterizirali po sistemu klasifikacije RMR.

Izkopno čelo v flišu sem ročno inženirsko-geološko popisala, popisi izkopnih čel so predstavljeni v prilogi A.3. Ocenila sem delež peščenjaka in laporovca, izmerila glavne parametre diskontinuitet in ocenila stopnjo preperevanja ter stopnjo vlažnosti. Vpade diskontinuitet sem izmerila z geološkim kompasom ter z Android aplikacijo FieldMove Clino, in sicer ločeno za plastnatost in razpoke. Izmerila sem 65 vpadov plastnatosti in 150 vpadov razpok. V programu Dips (programski paket RocScience) sem nato analizirala izmerjene vpade diskontinuitet ter določila njihove glavne sisteme in orientacije (Slika 4.28 a). Za sistem subhorizontalnih plastnatosti SS (295/04) je značilno, da imajo površino ploskev valovito in rahlo hrapavo do hrapavo. Razmiki med plastmi so bili izmerjeni od 2 cm do 170 cm, v dolžino se raztezajo od 3 m do 10 m. Ploskve plastnatosti so odprte do 10 mm in so večinoma odprte ali oksidirane. Poleg plastnatosti sta bila določena še dva sistema subvertikalnih razpok. Prvi sistem razpok (J1) vpada proti JZ oz. SV (223/89 oz. 043/89). Površina razpok je valovita in hrapava. Razmiki med razpokami so od 6 cm do 20 cm, njihova dolžina raztezanja pa do 10 m. Razpoke so odprte do 10 mm in večinoma oksidirane ali zaglinjene. Drugi sistem razpok (J2) vpada proti JV oz. SZ (150/89 oz. 330/89), površina razpok je ravna do valovita in rahlo hrapava do hrapava. Razmiki med razpokami so od 6 cm do 200 cm, v dolžino se raztezajo do 10 m. Podobno kot prvi sistem razpok, je tudi za drugi sistem značilno, da so odprte do 10 mm in zaglinjene ter oksidirane.

Analizo geometrije diskontinuitet sem izvedla za fotogrametrični oblak točk (fotoaparati). Uporabila sem program DSE (angl. *Discontinuity Set Extractor*; Riquelme et al., 2014), ki klasificira oblak točk v glavne sisteme diskontinuitet, določenih z algoritmi programa in predstavi rezultate s stereografsko analizo (Slika 4.28 b). Program omogoča polavtomatsko prepoznavanje diskontinuitet v hribini ter izris gostote normalnih vektorjev za različne ravnine, ki opisujejo diskontinuitete (Slika 4.29). Iz rezultatov, predstavljenih na stereografski projekciji, sem določila dva glavna sistema diskontinuitet, ki predstavljata razpoke: J1 (231/89) in J4 (164/88). Rezultati so primerljivi z orientacijami glavnih sistemov diskontinuitet iz ročnega popisa (Slika 4.28 a).



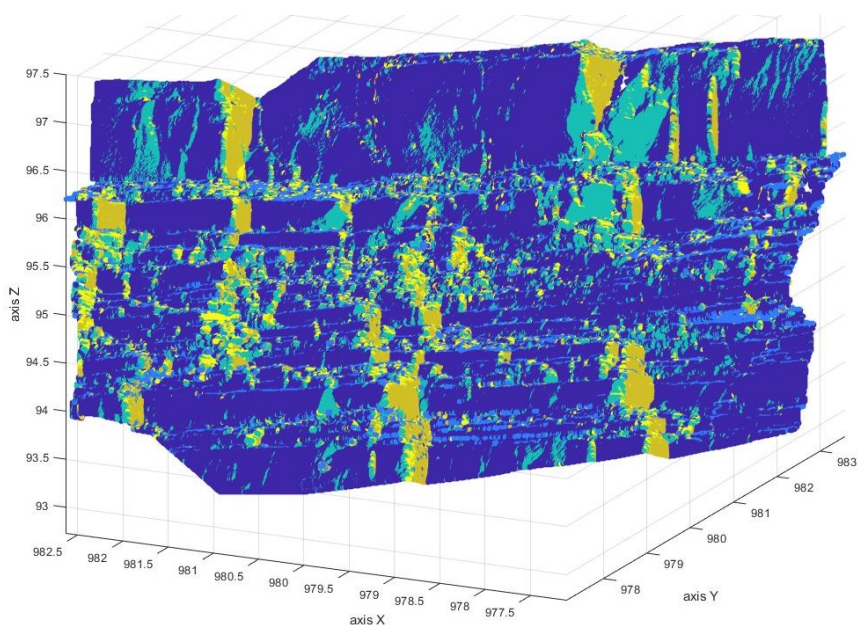
Slika 4.28: Analiza vpadov diskontinuitet v kamnolomu Elerji, s predstavljenimi poli diskontinuitet: a. Na podlagi geološkega popisa izkopnega čela v programu Dips. Določen je bil vpad plasti SS (295/04) in dva sistema razpok: J1 (223/89 oz. 043/89) in J2 (150/89 oz. 330/89); b. Na podlagi analize fotogrametričnega oblaka točk iz SfM fotogrametrije v programu DES. Določena sta bila dva sistema razpok: J1 (237/89) in J4 (164/88). Diskontinuiteta J2 je najverjetneje vezana na preperino, ki se kopiči na zgornjem delu plasti.

Figure 4.28: Orientation analysis for discontinuities in the Elerji quarry with presented poles: a. Based on face logging of the excavated face in Dips. Three sets of discontinuities have been determined: bedding (295/04) and two joint sets: J1 (223/89 or 043/89) and J2 (150/89 or 330/89); b. Based on the analysis of photogrammetric point cloud from SfM photogrammetry in DES. Two main discontinuity sets have been determined: J1 (237/89) and J4 (164/88). Discontinuity set J2 could be related to residual soil on the upper part of bedding planes.

Geometrijo diskontinuitet sem za izbrani fotogrametrični oblak točk (fotoaparati) izvedla tudi v vtičniku Facets (Dewez et al., 2016) programa CloudCompare in za polavtomatsko določitev diskontinuitet uporabila pristop Kd drevesa. Z analizo oblaka točk ustvari program majhne ravne poligone (angl. *facets*), ki so združeni v skupino s podobnim vpadom. Barva poligonov se navezuje na smer vpada. Rezultati analize (Slika 4.30) izkazujejo tri glavne sisteme diskontinuitet: plastnatost v temno vijolični barvi s subhorizontalnim vpadom proti SV (029/09)

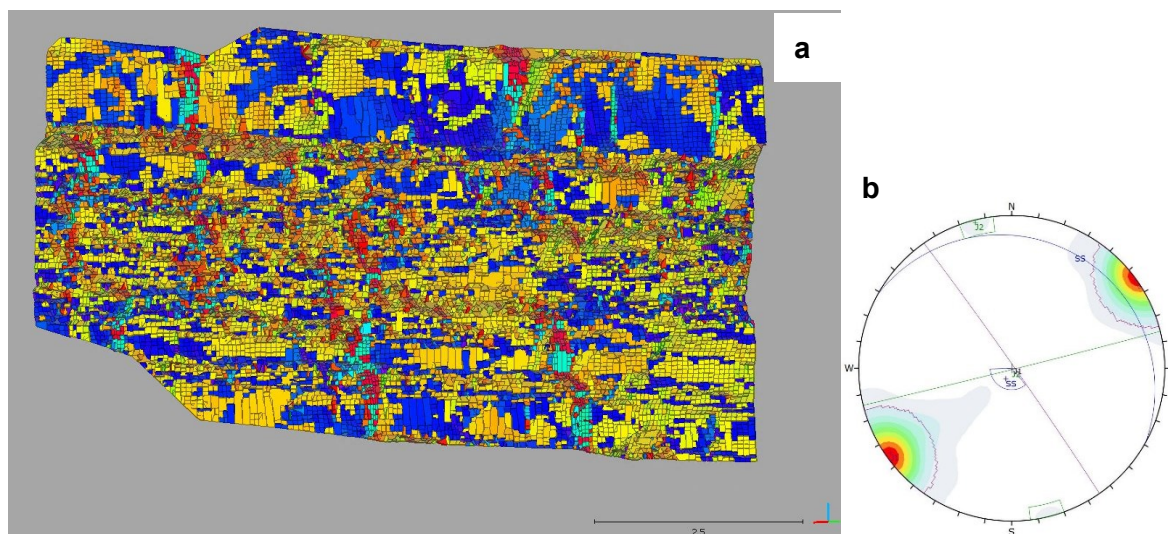
in dva sistema subvertikalnih razpok. Prvi sistem razpok (J1), ki je predstavljen z rumeno in modro barvo, vpada proti SV oz. JZ (055/88 oz. 235/88). Z rdečo in turkizno pa je predstavljen drugi sistem razpok (J2), z vpadom proti JV oz. SZ (166/89 oz. 346/89).

Rezultati analize fotogrametričnega oblaka točk (fotoaparata) so primerljivi z ročnimi meritvami na izdanku (Slika 4.28). Podrobnejša obdelava rezultatov je potrebna pri manj izrazitih ploskvah diskontinuitet, kot je subhorizontalna plastnatost, ki se na izdankih izkazuje predvsem v obliki linije.



Slika 4.29: Analiza fotogrametričnega oblaka točk (fotoaparata) izkopnega čela kamnoloma Elerji v programu DSE (Riquelme et al., 2014), ki klasificira oblak točk v glavne sisteme diskontinuitet. Iz klasificiranega oblaka točk sta razvidna predvsem dva glavna sistema diskontinuitet, obarvana s temno modro in rumeno barvo.

Figure 4.29: Photogrammetric point cloud (camera) analysis of the excavated face in the Elerji quarry, performed in DSE (Riquelme et al., 2014), which classifies the point cloud into main discontinuity sets. Two main discontinuity sets can be distinguished from the classified point cloud: dark blue and yellow colour.

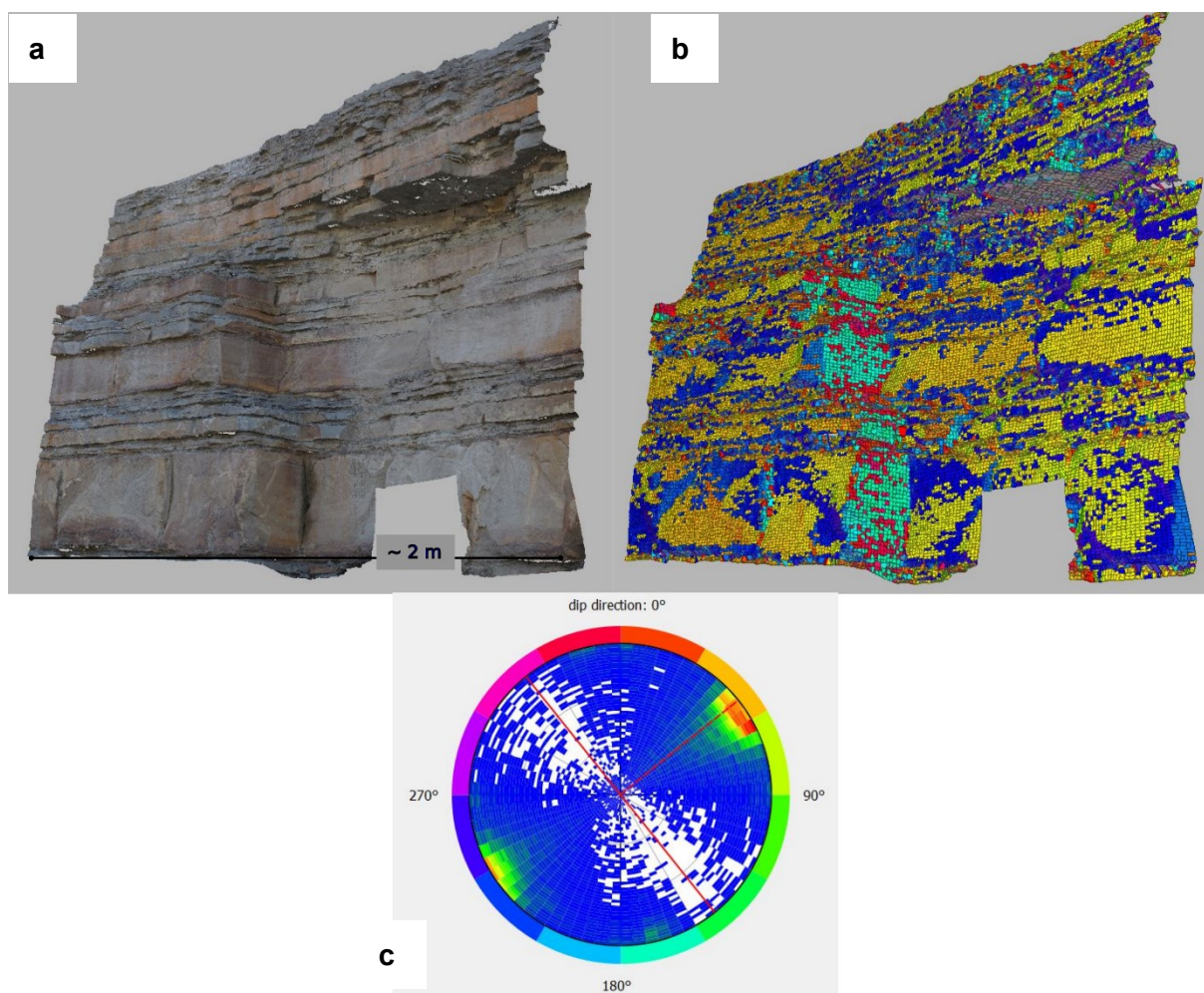


Slika 4.30: Analiza fotogrametričnega oblaka točk (fotoaparata) v vtičniku Facets programa CloudCompare: a. Ravni poligoni, združeni v skupino s podobnim vpadom (barva poligonov se navezuje na orientacijo); b. Stereografska analiza vpadov ravnih poligonov iz vtičnika Facets, izvedena v programu Dips.

Figure 4.30: Analysis of photogrammetric point cloud (camera) in the plugin Facets of the software CloudCompare: a. Facets extracted from point cloud, colours assigned to dip direction; b. Stereogram of facets, performed in Dips.

Pri določanju geometrije diskontinuitet na lidarskem oblaku točk (Riegl) izkopenega čela so bile diskontinuitete jasno izražene, posebno v plasteh peščenjaka, kjer sem določila dva sistema razpok (Slika 4.31 a). Zaradi večje trdnosti peščenjaka od laporovca, sem vpad diskontinuitet lahko izmerila tudi v plasteh z debelino do 6 cm, zato sam ponovila analizo na manjšem detailnem območju izkopa. Za detailno analizo sem v vtičniku Facets uporabila pristop Kd drevesa in delitev oblaka točk omejila na največji kot 20° , največjo relativno dolžino stranice poligona pa sem omejila na 6 cm. Dolžino sem izbrala na podlagi predlaganega razreda za zelo majhne razmike med diskontinuitetami (20-60 mm) po standardu SIST EN ISO 14689-1:2004. V primeru, da bi izbrala spodnjo mejo 2 cm, bi bil lidarski oblak točk preveč podrobno razdeljen in posledično bi bilo izločenih preveč neznanih predelov izbranega območja. Na podlagi analize (Slika 4.31 b) sem določila en sistem plastnatosti SS (330/02) in dva sistema subvertikalnih razpok. Prvi sistem razpok (J1) vpada proti SV (060/84), drugi sistem razpok (J2) pa proti JV (165/86).

Če rezultate primerjamo z obarvanim oblakom točk, vidimo, da so bile izločene tudi razpoke na plasteh, katerih debelina je večja od 6 cm (Slika 4.31 b, označene z rumenimi in modrimi poligoni). Sklepamo lahko, da je uporabljeni pristop s Kd drevesi primeren za določanje diskontinuitet na tankoplastnatih heterogenih hribinah. Ob tem pa je potrebno upoštevati, da je obdelava oblaka točk v tem primeru časovno precej daljša in velikost modela za nadaljnjo obdelavo večja.

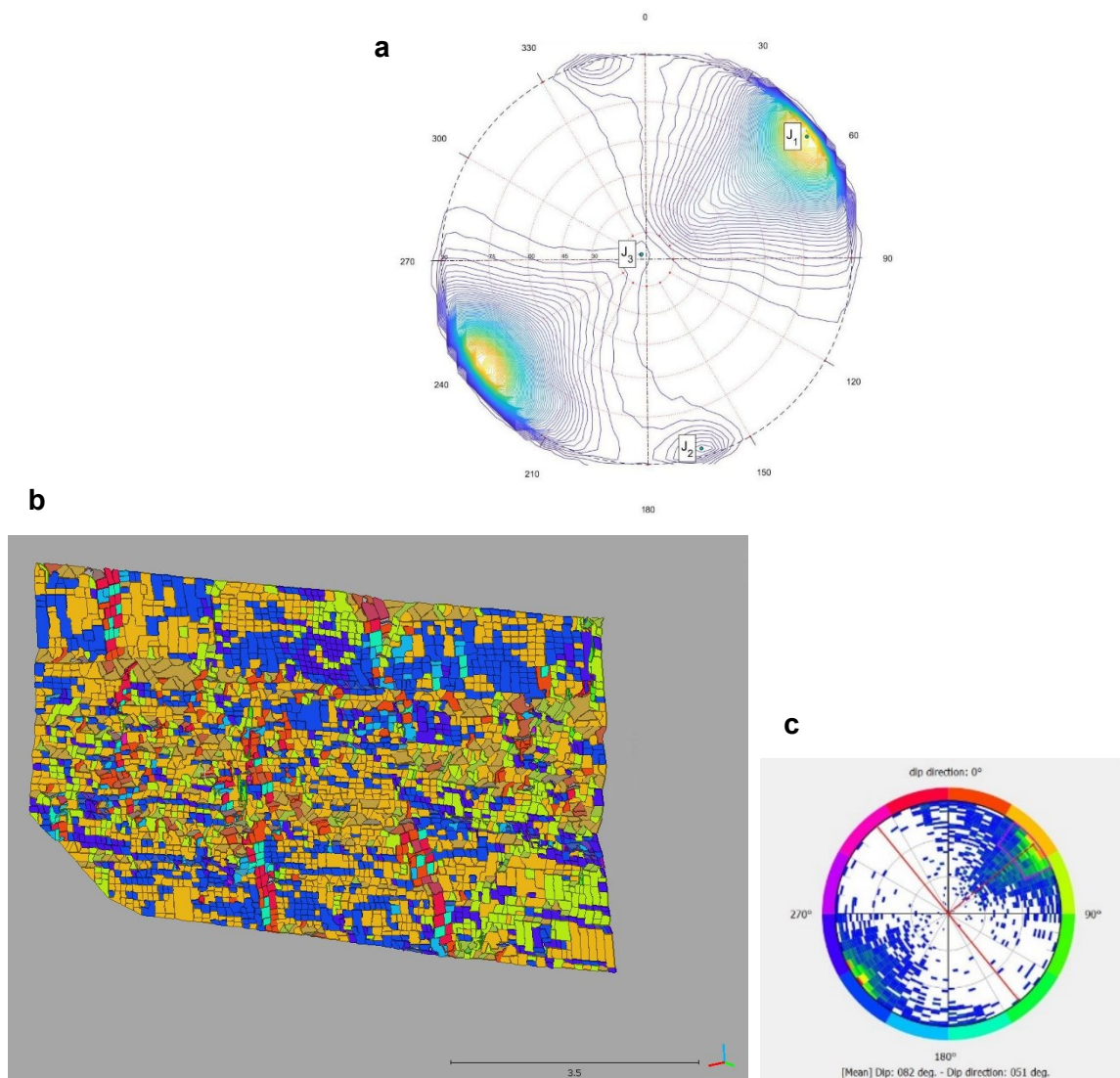


Slika 4.31: Analiza detajla lidarskega oblaka točk (Riegli) v vtičniku Facets programa CloudCompare izkopenega čela v kamnolomu Elerji: a. Obarvan lidarski oblak točk z RGB; b. Rezultat analize z majhnimi ravnimi poligoni, ki so združeni v ravnine s podobnim vpadom, na podlagi katerega so obarvani. Vidne so jasno definirane diskontinuitete na plasteh debeline okoli 6 cm; c. Stereografska analiza izločenih poligonov: plastnatost SS (330/02), prvi sistem razpok J1 (060/84) in drugi sistem razpok J2 (165/86).

Figure 4.31: Analysis of the detailed lidar point cloud (Riegli) in Cloud Compare's plugin Facets: a. Coloured point cloud with RGB; b. Result of the analysis with entities, combined and coloured into planes with similar dip. Extracted discontinuities on thin layers with thickness approximately 6 cm are clearly visible; c. Stereographic analysis of extracted entities: bedding planes SS (330/02), first joint set J1 (060/84) and second joint set J2 (165/86).

Z namenom celovite analize uporabljenih metod zajema podatkov sem geometrijo diskontinuitet določila tudi za lidarski oblak točk (BLK), zajetem s 3D laserskim skenerjem Leica BLK360 (Slika 4.32). Analizo sem izvedla programu DSE (Riquelme et al., 2014) ter vtičniku Facets (Dewez et al., 2016). Program DSE je iz lidarskega oblaka točk izločil tri glavne sisteme diskontinuitet (Slika 4.32 a): prvi sistem razpok (J1) vpada subvertikalno proti SV (055/87,5), drugi sistem razpok (J2) pa subvertikalno proti JV (164/88). Tretji sistem diskontinuitet (J3) predstavlja subhorizontalno plastnatost z vpadom proti SZ (315/04). Podobni rezultati so bili podani z analizo v vtičniku Facets (Slika 4.32 b in c), kjer se izločeni

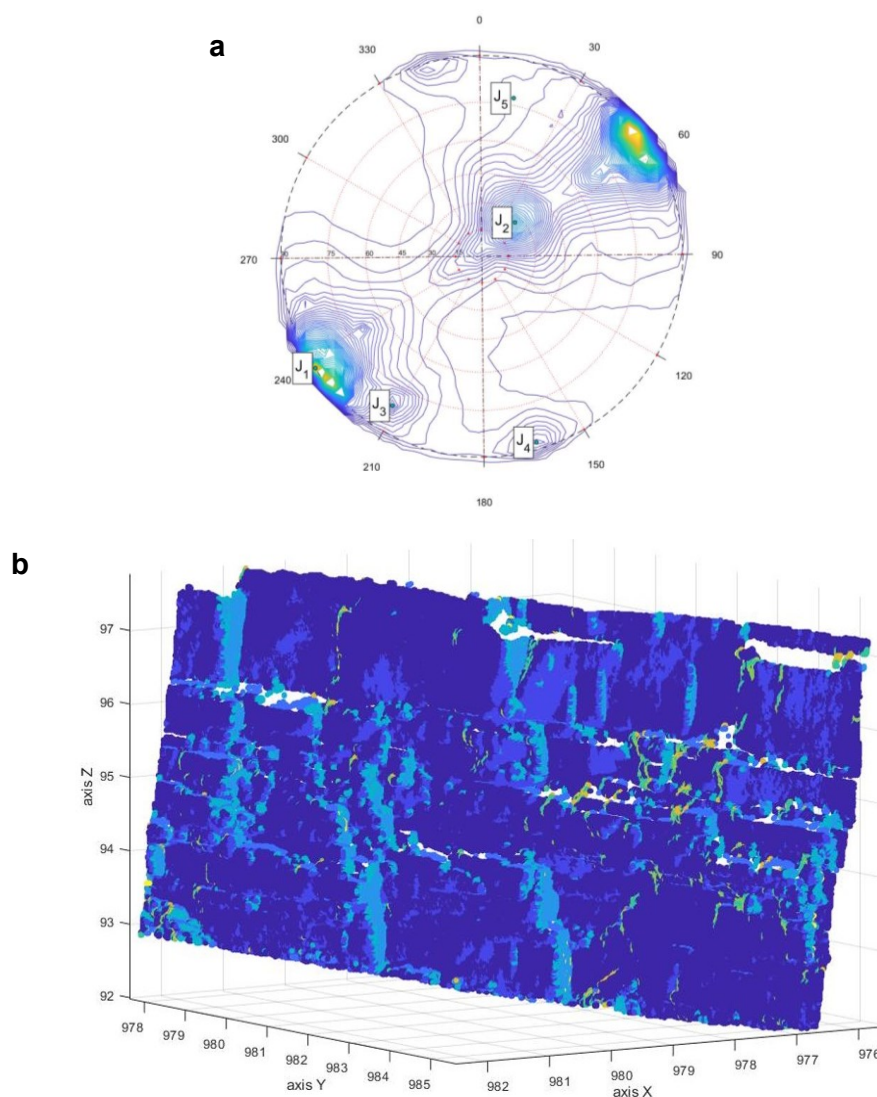
poligoni navezujejo na dva glavna sistema diskontinuitet, ki predstavljajo razpoke. Prvi sistem subvertikalnih razpok (J1) vpada proti SV oz. JZ (055/81 oz. 235/83), drugi sistem razpok (J2) pa zelo strmo proti JV oz. SZ (175/79 oz. 354/75).



Slika 4.32: Določitev geometrije diskontinuitet iz lidarskega oblaka točk (BLK): a. Analiza v programu DES, z izločenimi tremi sistemi diskontinuitet: J1 (055/87,5), J2 (164/88) ter J3 (315/04). Slednji se navezuje na sistem plastnatosti. b. Analiza v vtičniku Facets programa CloudCompare, z izločenimi poligoni, ki se navezujejo na dva glavna sistema zelo strmih diskontinuitet: J1 (055/81) označene z rumeno barvo oz. J1 (235/83) označene z modro barvo ter J2 (354/75) označene z rdečo barvo oz. J2 (175/79) označene s turkizno barvo. c. Stereografska analiza izločenih poligonov.

Figure 4.32: Geometry definition from lidar point cloud (BLK): a. Analysis in software DES with three extracted discontinuity sets: J1 (055/87,5), J2 (164/88) and J3 (315/04). The latter is referred to the bedding planes. b. Analysis in Cloud Compare's plugin Facets. Extracted facets represent two main discontinuity sets: first set J1 (055/81) in yellow colour and J1 (235/83) in blue colour, and the second set J2 (354/75) in red colour and J2 (175/79) in turquoise colour. c. Stereogram of extracted facets.

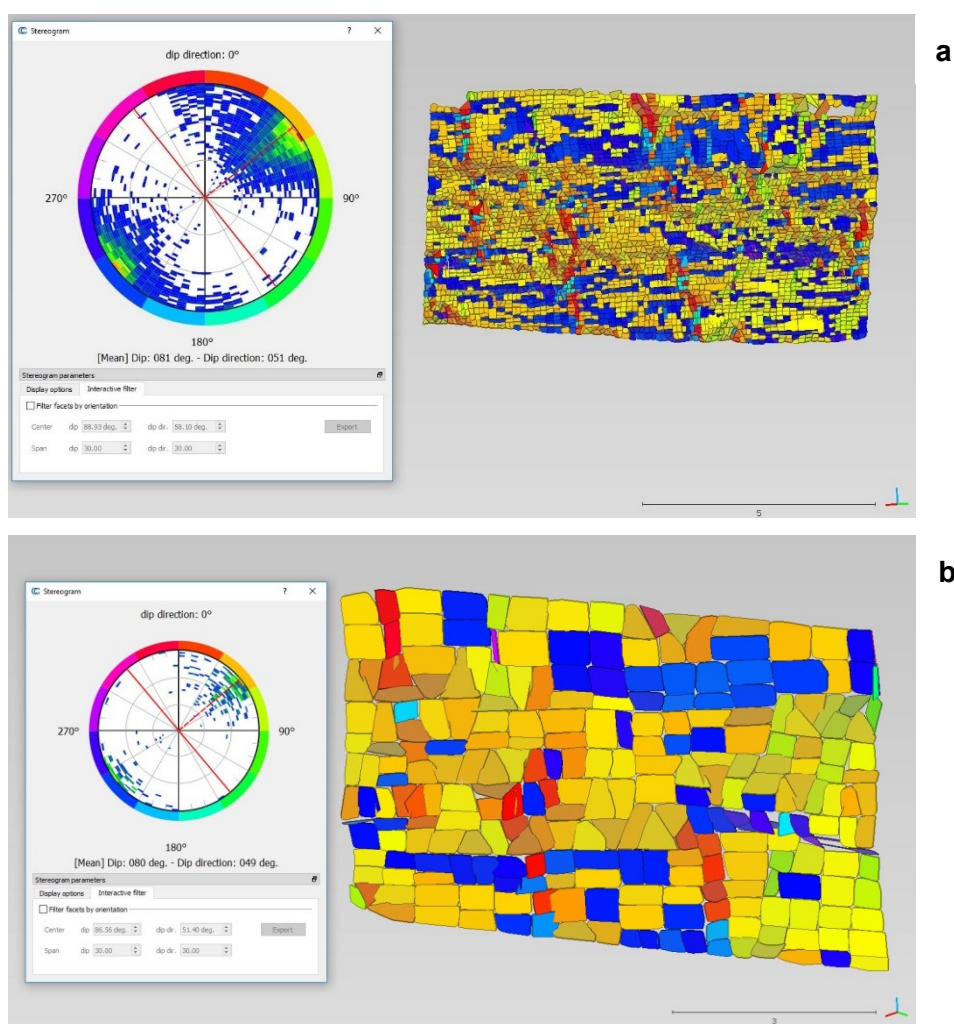
Geometrijo diskontinuitet sem določila tudi iz fotogrametričnega oblaka točk (pametni telefon). V programu DSE so bili izločeni trije glavni sistemi diskontinuitet (Slika 4.33): prvi sistem razpok (J1) vpada subvertikalno proti SV oz. JZ (059/88 oz. 214/83), drugi sistem subvertikalnih razpok (J2) pa proti JJV oz. SSV (170/89 oz. 016/88). Izločen je bil tudi sistem plastnatosti, ki vpada subhorizontalno proti SZ (314/03).



Slika 4.33: Analiza fotogrametričnega oblaka točk (pametni telefon) v programu DSE (Riquelme et al., 2014): a. Stereografska analiza z izločenimi tremi glavnimi sistemi diskontinuitet: J1 (059/88) oz. J2 (214/83), J3 (314/03) ter J4 (170/89) oz. J5 (016/88). b. Klasificiran oblak točk v glavne sisteme diskontinuitet, iz katerega sta razvidna predvsem dva, ki sta obarvana s temno in svetlo modro.

Figure 4.33: Analysis of photogrammetric point cloud (smart phone) performed in DSE (Riquelme et al., 2014). a. Stereogram with extracted three main discontinuity sets: J1 (059/88) or J2 (214/83), J3 (314/03) and J4 (170/89) or J5 (016/88). b. Classified point cloud into main discontinuity sets, from which two main sets can be distinguished (dark and light blue colour).

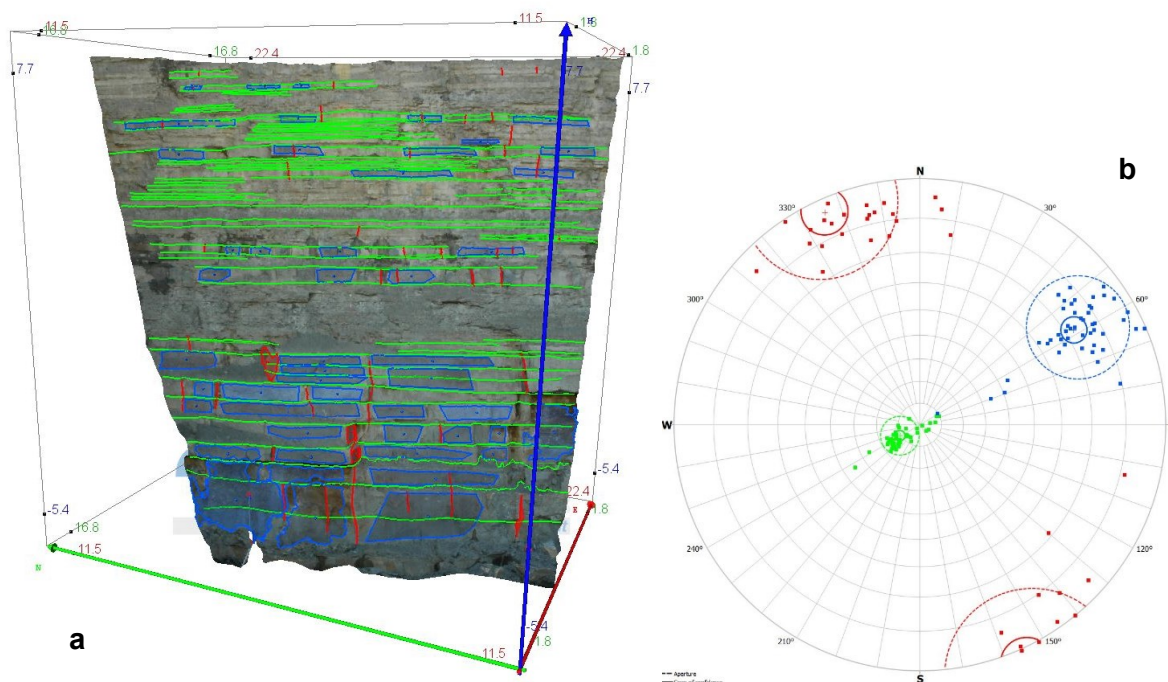
Z analizo geometrije diskontinuitet v vtičniku Facets so bili izločeni poligoni združeni v tri glavne sisteme diskontinuitet (Slika 4.34 a). Prvi sistem razpok (J1), predstavljen z rumeno in modro barvo, vpada subvertikalno proti SV oz. JZ (060/85 oziroma 240/85), drugi sistem razpok (J2) vpada zelo strmo proti SZ (340/75) in je predstavljen z rdečo barvo. Izločena je bila tudi plastnatost, ki vpada subhorizontalno proti SZ in je predstavljena s temno rumeno barvo. Dobljene rezultate iz fotogrametričnega oblaka točk (pametni telefon) sem primerjala z rezultati analize fotogrametričnega 3D modela (pametni telefon). Rezultati so bili primerljivi, pri čemer so bili dobljeni ravni poligoni večji v primeru analize fotogrametričnega 3D modela (Slika 4.34 b).



Slika 4.34: Analiza fotogrametričnega oblaka točk (a) in fotogrametričnega 3D modela (b) (pametni telefon) izvedena v vtičniku Facets programa CloudCompare. Izločeni so bili trije glavni sistemi diskontinuitet: J1 (060/85 oz. 240/85) predstavljeni z rumeno oz. modro barvo, J2 (340/75) predstavljeni z rdečo barvo ter sistem subhorizontalnih diskontinuitet, predstavljeni s temno rumeno barvo.

Figure 4.34: Analysis of photogrammetric point cloud (a) and photogrammetric 3D model (b) (smart phone) performed in Facets, a Cloud Compare's plugin. Three main discontinuity sets were extracted: J1 (060/85 or 240/85) presented in yellow colour, J2 (340/75) in red colour and subhorizontal discontinuity set, presented in dark yellow colour.

Digitalni vektorski geološki popis izkopnega čela v kamnolomu Elerji sem izvedla v programu ShapeMetriX 3D na fotogrametričnem 3D stereo-modelu (Slika 4.35). Plastnatost se je na izkopnem čelu izražala kot linija oziroma rob, katere sem lahko definirala iz virtualnega fotogrametričnega 3D modela za rekonstrukcijo ploskev diskontinuitet. Ploskve razpok so bile jasno izražene, zato jih je bilo lažje določiti.



Slika 4.35: Analizirani 3D model izbranega izkopnega čela kamnoloma Elerji v programu ShapeMetriX 3D: a. Digitalni vektorski geološki popis izkopnega čela s popisanimi diskontinuitetami, ki predstavljajo plastnatost in dva sistema razpok; b. Stereografska analiza s predstavljenimi poli diskontinuitet, na podlagi katere določimo glavne sisteme diskontinuitet in njihove orientacije. Z zeleno barvo so predstavljeni poli plastnatosti, z rdečo in modro pa poli dveh sistemov razpok. Program omogoča tudi statistično analizo diskontinuitet, na podlagi katere ocenimo njihove razmike in dolžine.

Figure 4.35: Analysis of the 3D model from the selected excavated face in the Elerji quarry, performed in ShapeMetriX 3D: a. Digital vector geological face logging with logged discontinuities representing bedding planes and two joint sets; b. Stereographic analysis of discontinuities' poles, based on which we determine main discontinuity sets and their orientation. It is also possible to perform statistical analyses of discontinuities, based on which the spacing and persistence is estimated.

Izločila sem en sistem plastnatosti in dva sistema razpok. Plastnatost je vpadala proti SV (060/10). Izmerjena razdalja med plastmi je bila v povprečju 0,5 m, dolžina raztezanja pa v povprečju 7,0 m. Prvi sistem razpok (J1) je imel zelo strm vpad proti JZ (238/72), razdalja med razpokami je znašala v povprečju 0,8 m, povprečno izmerjena dolžina razpok pa je bila 1,9 m. Drugi sistem razpok (J2) je vpadal subvertikalno proti JV (155/86), povprečna razdalja med razpokami je znašala 0,6 m, njihova povprečna dolžina raztezanja pa 3,0 m. Rezultati analize 3D stereo-modela so primerljivi z ročnim popisom (Slika 4.28 in Slika 4.35 b).

Preglednica 4.10 in Slika 4.36 povzemata glavne sisteme diskontinuitet, ki so bile izločene s predstavljenimi metodami iz fotogrametričnega in lidarskega oblaka točk ter fotogrametričnega 3D stereo-modela. Na podlagi ročnih meritev sem določila tri sisteme diskontinuitet: plastnatost ter dva subvertikalna sistema razpok. Generalni vpad plastnatosti (SS) je subhorizontalno proti ZSZ (295/04). Prvi sistem subvertikalnih razpok (J1) vpada proti SV oz. JZ (043/89 oz. 223/89), drugi sistem subvertikalnih razpok (J2) pa proti JV oz. SZ (150/89 oz. 330/89). Ročne meritve sem nato primerjala z glavnimi sistemi diskontinuitet ter njihovimi vpadi (Slika 4.36 a). Upoštevanih je bilo 29 podatkov vpadov sistemov diskontinuitet, katere sem nato ločeno analizirala po: načinu snemanja (Slika 4.36 b), uporabljenem instrumentu zajema podatkov (Slika 4.36 c) in uporabljenem programu za analizo (Slika 4.36 d).

Glavne sisteme diskontinuitet ter njihove vpade sem primerjala z ročnimi meritvami (Slika 4.36 a). Na podlagi primerjave 29 meritev sem ugotovila, da je največ razlik pri določenih vpadih plastnatosti. Zaradi subhorizontalnega vpada (295/04) se na izkopnem čelu izraža kot linija oz. rob, zato je bila izločitev iz oblaka točk odvisna predvsem od stojišča. Analiza lidarskega oblaka točk (BLK) v programu DSE (315/04) je imela podobno izmerjene vpade plastnatosti (SS), kot so bili izmerjeni ročno. Razpoke so imele na izkopnem čelu izrazite ploskve, zato sem glavna sistema (J1 in J2) lahko izločila z vsemi uporabljenimi metodami. Razlike v orientaciji se od ročno izmerjenih razlikujejo do 20°, medtem ko so razlike v naklonih do 10°. Izmerjene sisteme diskontinuitet sem po načinu snemanja ločila v lidarski in fotogrametrični zajem podatkov ter jih primerjala z ročno izmerjenimi meritvami (Slika 4.36 b). V primeru plastnatosti (SS) je stereografska analiza pokazala, da so se meritve z lidarskim zajemom podatkov bolj približale ročnim meritvam (318/03), medtem ko so bili vpadi sistemov razpok (J1 in J2) med seboj primerljivi v obeh načinih snemanja. Sisteme diskontinuitet sem nato ločila po uporabljenem instrumentu za zajem podatkov s fotoaparatom (foto), pametnim telefonom (tel), TLS Riegl VZ-400 (TLS) ter 3D laserskim skenerjem Leica BLK360 (BLK). Rezultati stereografske analize (Slika 4.36 c) kažejo, da so v primeru plastnatosti (SS) meritve s telefonom in laserskim skeniranjem (TLS in BLK) primerljive z ročnimi meritvami (318/02), pri meritvah s fotoaparatom pa so plasti vpadale v nasprotno smer, torej proti SV (045/09). Izmerjeni vpadi prvega sistema razpok (J1) so bili med sabo primerljivi. V primeru izmerjenih vpadov drugega sistema razpok (J2) pa so bile z ročnimi meritvami bolj primerljive meritve s TLS (Riegl) in pametnim telefonom (166/88). Za primerjavo sem vpade diskontinuitet ločila po uporabljenem programu za analizo oblaka točk in fotogrametričnega 3D stereo-modela v: program DSE, vtičnik Facets (F) programa CloudCompare in ShapeMetriX 3D (SMX) ter jih primerjala z ročno izmerjenimi vpadi (Slika 4.36 c). Plastnatost (SS), ki je bila izmerjena v programu DSE, je bila najbolj primerljiva z ročno izmerjenimi vpadi (318/03). Vpadi prvega

sistema razpok (J1) so bili z ročnimi meritvami primerljivi v vseh izbranih programih. V primeru drugega sistema razpok (J2) pa se je ročnim meritvam najbolj približal vpad glavnih diskontinuitet, določen v programu ShapeMetriX 3D (155/86), medtem ko sta si bila vpada v programih DSE in Facets podobna (166/88 in 167/86).

Na podlagi rezultatov analize ugotavljam, da je največ razlik pri vpadih plastnatosti, saj se zaradi subhorizontalnega vpada (295/04) na izkopnem čelu izražajo kot linije oz. robovi. Pri načinu zajema podatkov so se meritve v lidarskem oblaku točk najbolj približale ročnim meritvam, medtem ko so bile meritve, ločene po tehnologiji zajema podatkov med seboj primerljive. Iz laserskega skeniranja (Riegl in BLK) na terenu sklepam, da so razlike predvsem posledica ustrezno izbranih stojišč. Instrumenta sta bila postavljen ok. 5 m od izkopnega čela, zato smo s skeniranjem lahko zajeli tudi spodnje ploskve plastnatosti. Na podlagi primerjave vpadov glavnih diskontinuitet v različnih programih prihaja do največjih razlik pri analizah v vtičniku Facets (Dewez et al., 2016). Ploskve, ki jih program ustvari s 3D segmentacijo oblaka točk in nato združi v večje ploskve glede na podobno orientacijo, imajo že posplošen vpad in zato vsebujejo večje napake. Do dodatnih napak najverjetneje prihaja tudi zaradi večjega razpona debeline plasti peščenjaka v flišu, ki so na obravnavanem izkopnem čelu od 2 cm do 100 cm. Pri večjih diskontinuitetah so ploskve ravne in izrazite, zato programi lažje navežejo ravnine na ploskve ter izračunajo generalni vpad. Pri stereografski analizi so bili z ročnimi meritvami najbolj primerljivi vpadi prvega sistema razpok (J1), ki je vpadal pravokotno na smer zajema podatkov (Slika 4.8 in Slika 4.36). Pri debelejših plasteh peščenjaka (od 20 do 110 cm) so bile ploskve diskontinuitet sorazmerno velike, zato so jih programi lažje prepoznali. Pri segmentaciji oblaka točk moramo zato posebno pozornost nameniti določanju parametrov, na podlagi katerih program ustvari ploskve. Pri enakomerno velikih ploskvah diskontinuitet lahko program hitreje in z večjo zanesljivostjo ustvari poligone ustrezne velikosti za nadaljnje združevanje in določanje orientacije, kot pri neenakomerno velikih ploskvah. Ročno izmerjenim vpadom so se najbolj približali rezultati analize oblakov točk v programu DSE (Riquelme et al., 2014). Metodologija, ki so jo razvili za klasifikacijo oblaka točk, poda zadovoljive rezultate z manjšimi napakami pri vrednostih vpadov, vendar prihaja do težav pri obdelavi oblakov točk z večjo natančnostjo (gostejšim oblakom točk) in pri večjih površinah (npr. 20 m x 20 m). Primerjava uporabljenih metod z ročnimi meritvami je podala zadovoljive rezultate, zato jih lahko vključimo v aktivnosti geološke spremljave v tankoplastnati heterogeni hribini, ob upoštevanju, da morajo biti upoštevana priporočila stroke za kakovosten zajem podatkov.

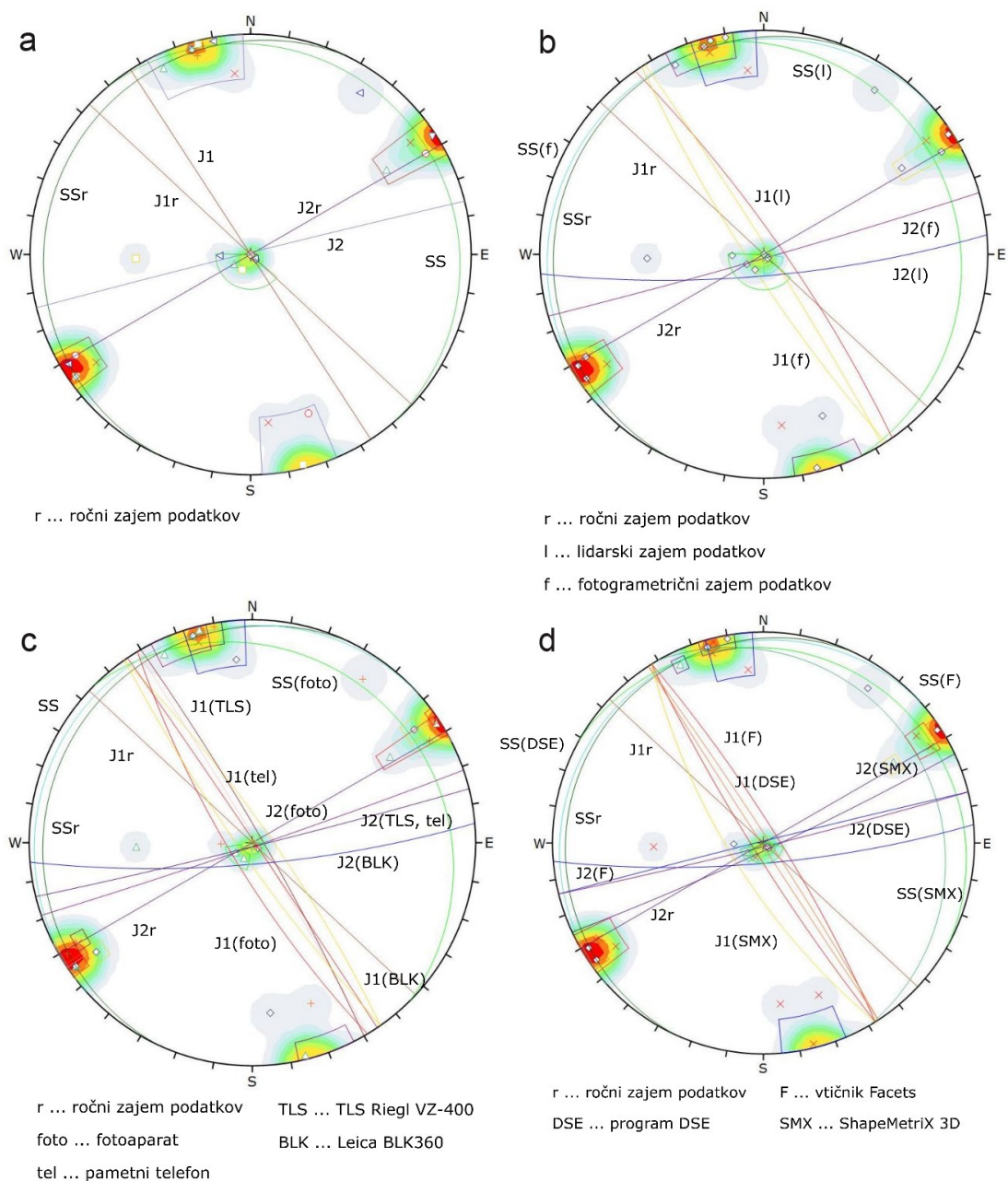
V sklopu analize nisem določala preostalih parametrov diskontinuitet, kot so hrapavost, odprtost in zapolnitev, ker so diskontinuitete vpadale v smeri izkopa in so bile zato ploskve

slabo vidne. Pri merjenju velikosti parametrov, ki opisujejo odprtost in zapolnitev pa je odprtost premajhna (do 1 cm), da bi ju iz oblaka točk ali 3D modela lahko dovolj natančno določili.

Preglednica 4.10: Pregled izločenih glavnih sistemov diskontinuitet glede na uporabljene metode ter razlika glede na referenčni vpad ročne izmere.

Table 4.10: Overview of extrapolated main discontinuity sets based on different method and the difference angle compared to the reference dip angle of the manual measurement.

Uporabljena metoda	Izločeni glavni sistemi diskontinuitet					
	Plastnatost SS / razlika v kotu z ročno izmero		Sistem razpok J1 / razlika v kotu z ročno izmero		Sistem razpok J2 / razlika v kotu z ročno izmero	
Ročna izmera	295/04 (SSr)		043/89 223/89 (J1r)		150/89 330/89 (J2r)	
Fotogrametrični oblak točk (fotoaparati) – analiza v DSE	/	/	237/89	14°	164/88	14°
Fotogrametrični oblak točk (fotoaparati) – analiza v Facets	029/09	10°	055/88 235/88	12° 12°	166/89 346/89	16° 16°
Lidarski oblak točk (Riegl) – analiza v Facets	330/02	3°	060/84	18°	165/86	15°
Lidarski oblak točk (BLK) – analiza v DSE	315/04	1°	055/88	12°	164/88	14°
Lidarski oblak točk (BLK) – analiza v Facets	/	/	055/81 235/83	14° 13°	175/79 354/75	27° 28°
Fotogrametrični oblak točk (pametni telefon) – analiza v DSE	314/03	2°	059/88 214/83	16° 11°	170/89 016/88	20° 46°
Fotogrametrični oblak točk (pametni telefon) – analiza v Facets	000/00	4°	060/85 240/85	17° 17°	340/75	17°
Fotogrametrični 3D stereo-model (ShapeMetriX 3D)	060/10	13°	238/72	23°	155/86	6°



Slika 4.36: Primerjava stereografske analize izločenih glavnih sistemov diskontinuitet z uporabo različnih metod (Preglednica 4.10) in ročnih meritev: a. Skupne meritve; b. Ločitev po načinu snemanja (lidarski in fotogrametrični zajem podatkov); c. Ločitev po uporabljenem instrumentu (fotoapararat, pametni telefon, TLS Riegl VZ-400, Leica BLK360); d. Ločitev po uporabljenem programu (program DSE, vtičnik Facets, ShapeMetriX 3D).

Figure 4.36: Stereogram analysis of extrapolated main discontinuity sets using different methods (Table 4.10) compared to manual measurements (added letter "r"): a. Total measurements; b. Data separation by type of acquisition (lidar, photogrammetric); c. Data separation by data acquisition technology (camera, smart phone, TLS Riegl VZ-400, Leica BLK360); d. Data separation by used software (DSE, plugin Facets, ShapeMetriX 3D).

4.4.10 Karakterizacija fliša po sistemu klasifikacije RMR

Obravnavano heterogeno hribino (fliš) sem karakterizirala po sistemu klasifikacije RMR. Pri določanju parametrov klasifikacije sem uporabila rezultate analize vrednosti Intenzitete odboja TLS-RAW in geometrije diskontinuitet.

Za oceno prevladujoče enoosne tlačne trdnosti (A1) sem uporabila rezultate analize intenzitete odboja laserskega žarka v odvisnosti od litologije. Na obravnavanem izkopnem čelu kamnoloma prevladujejo plasti peščenjaka (okoli 70 %) nad plastmi laporovca (okoli 30 %). Karakteristično vrednosti enoosne tlačne trdnosti sem ocenila na podlagi izkušenj laboratorijskih preiskav na podobnih vzorcih fliša.

Rezultate analize fotogrametričnega 3D modela v programu ShapeMetriX 3D sem uporabila pri izboru vrednosti parametrov, ki določajo razmik med diskontinuitetami (A3) in njihovo dolžino (A4.1). Pri korekciji zaradi vpada diskontinuitet v predorih (B) sem se opirala na izmerjene vpadne diskontinuitet s prevladujočo plastnatostjo in dvema sistemoma razpok. Vpadi so bili določeni ročno ter z analizo oblaka točk in fotogrametričnega 3D modela, katerih rezultati glavnih sistemov diskontinuitet in njihovih vpadov so bili med seboj primerljivi. Na podlagi pregleda 3D modela, oblaka točk in ročnega popisa sem ocenila še ostale parametre. Izračunana vrednost RMR je bila rahlo višja (52) od izračunane vrednosti iz ročnega popisa (48), v obeh primerih predstavlja zadovoljivo hribino (III). Primerjava izračunanih vrednosti je predstavljena v preglednici 4.11.

Preglednica 4.11: Primerjava karakterizacije hribine na izkopnem čelu kamnoloma Elerji na podlagi sistema klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989) iz ročnega popisa ter digitalnega popisa s pomočjo programa ShapeMetriX 3D.

Table 4.11: Comparison between characterization of rock mass on the excavated face of the Elerji quarry based on the classification system RMR (Bieniawski, 1989) from manual face logging and digital face logging using the software ShapeMetriX 3D.

Meritev	A1	A2	A3	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4	A4.5	A5	B	RMR
Ročni popis	5	13	10	2	1	5	2	5	10	-5	48 (III)
Daljinsko zaznavanje	5*	13*	10	3	4*	4*	2*	3	13	-5	52 (III)

* Vrednosti, ki so bile ocenjene in ne izmerjene iz 3D modela.

* Values which were estimated instead of measured from the 3D model.

4.4.11 Razprava – kamnolom Elerji

4.4.11.1 Določitev litologije, stopnje preperevanja in stopnje vlažnosti

Izkopno čelo v kamnolomu Elerji smo terestrično lasersko skenirali, da bi preverili odvisnost vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka od litološke sestave, stopnje vlažnosti in stopnje preperelosti. Zaradi odsotnosti nepreperele kamnine na izkopu, nismo analizirali srednje močno preperelega do močno preperelega fliša. Za fliš v kamnolomu Elerji je značilno, da prevladuje delež peščenjaka nad deležem laporovca (70 % : 30 %), pri čemer se debelina plasti peščenjaka giblje od 2 cm do 60 cm, debelina plasti laporovca pa med 2 cm in 2 m v zgornjem predelu kamnoloma. Hribina je na izkopnem čelu tektonsko nepoškodovana.

Poleg terestričnega laserskega skeniranja smo na izbranem odseku fliš tudi litološko popisali ter odvzeli vzorce za mineraloško in sedimentološko analizo. Odvzeti vzorci laporovca in peščenjaka so bili mineraloško analizirani. Primerjava vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW z mineraloško sestavo laporovcev in peščenjakov je podala dobro korelacijo v primeru večjih količin kalcita in kremenca. Taka kombinacija pa velja samo pri peščenjakih, zaradi večjih zrn. Rezultati analize vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka kažejo dobro povezavo tako z litološko sestavo, kot tudi s stopnjo vlažnosti. Iz dobljenih rezultatov analize bi lahko razlikovali med litološkimi enotami tankoplastnatega fliša in določili razmerja med njimi. Na podlagi analize je mogoče ločiti plasti posameznih litoloških enot, katerih debelina plasti je najmanj 6 cm. Podajanje razmerja med litološkimi enotami z različnimi geomehanskimi parametri, je pomembno predvsem pri inženirski geologiji in geotehničnem projektiranju, saj vpliva na geotehnično obnašanje hribine v primeru izkopa tako na površini, kot tudi pri podzemnih izkopih.

Analiza vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW v odvisnosti od stopnje vlažnosti za posamezno litološko enoto je pokazala dobro medsebojno korelacijo. Dobljene ugotovitve lahko vključimo v inženirsko geološki popis izdanka ali izkopnega čela, s čimer izpostavimo območja mezenja in prisotnosti morebitnih dotokov vode. Rezultate bi lahko uporabili v sklopu geotehničnega projektiranja in izgradnje geotehničnih objektov, kot je izkop predora, gradbene jame ali pregrade.

4.4.11.2 Določitev geometrije diskontinuitet

V kamnolomu Elerji smo izvedli večje število natančnih merenj, saj nismo bili časovno omejeni kot pri meritvah v predoru Markovec in podzemni garaži Park San Giusto. Meritve so vključevale terestrično lasersko skeniranje, stereofotogrametrijo ShapeMetriX 3D, SfM fotogrametrijo s fotoaparatom in pametnim telefonom ter ročne meritve z geološkim kompasom in pametnim telefonom. Poleg tega smo v sklopu geometrične analize uporabljenih tehnologij izvedli še geodetsko izmero tarč in detajlno 3D lasersko skeniranje s tahimetrom. Podatke izmerjenih tarč smo uporabili za georeferenciranje oblaka točk in fotogrametričnega 3D modela.

Pri določitvi geometrije diskontinuitet in njihovih parametrov sem uporabila izbrane računalniške programe, ki so trenutno dostopni na tržišču in bi jih inženirski geolog lahko vključil v inženirsko geološki popis izdanka in izkopnega čela. Geometrijo diskontinuitet sem analizirala v programih ShapeMetriX 3D, DSE in Facets (CloudCompare). Paket ShapeMetriX 3D omogoča rekonstrukcijo fotogrametričnega 3D stereo-modela, na katerem lahko vektorsko določimo diskontinuitete na osnovi izrisa linije ali poligona tudi pri popisu tankoplastnate heterogene hribine. Rezultati so zato še vedno subjektivni. Izločene diskontinuitete statistično analizira in jih združi v glavne sisteme diskontinuitet ter izračuna razmike med diskontinuitetami in njihovo dolžino raztezanja. Zaradi funkcij, ki omogočajo analizo nekaterih parametrov diskontinuitet, predstavlja pomembno orodje v inženirski geologiji, pri vključevanju v postopek popisa izdanka in izkopnega čela.

Programa DSE (Riquelme et al., 2014) in CloudCompare z vtičnikom Facets (Dewez et al., 2016) omogočata polavtomatsko analizo oblaka točk in fotogrametričnega 3D modela za določitev glavnih sistemov diskontinuitet in njihovih vpadov. Obdelava je bila razmeroma hitra. Rezultati analize izkopnega čela v heterogeni hribini so v obeh programih izločili dva do tri sisteme diskontinuitet, ki so predstavljale dva sistema subvertikalnih razpok ter sistem plastnatosti. Pri kamninah z jasno izraženimi ploskvami diskontinuitet so analize pokazale, da lahko izločimo iz oblaka točk glavne sisteme diskontinuitet ter jim določimo vpade, če so debeline plasti večje od 6 cm. Postopek lahko uporabimo pri geometrijskih analizah v tankoplastnatih heterogenih hribinah. Razlike v orientaciji se od ročno izmerjenih razlikujejo do 20°, medtem ko so razlike v naklonih do 10°. Na podlagi primerjave z ročnimi meritvami sem ugotovila, da se jim rezultati analize v programu DSE bolj približajo, medtem ko so imeli rezultati v vtičniku Facets večje napake. Razlike med rezultati so posledica geoloških razmer na izkopnem čelu in metodologije, na katerih temeljita programa. Za fliš je namreč značilen

velik razpon debeline plasti posameznih litoloških enot, kar vpliva pri vtičniku Facets na 3D segmentacijo oblaka točk, na podlagi katere ustvari ploskve določene velikosti za nadaljnjo analizo. Za uspešnost analize je zato pomembno razumevanje vhodnih parametrov v povezavi z geološkimi razmerami na čelu izkopa. Programa pa trenutno ne omogočata določitve ostalih parametrov diskontinuitet (razmikov med diskontinuitetami, raztezanja, ipd.), ki so pomembni pri klasifikaciji hribine.

4.4.11.3 Karakterizacija fliša po sistemu klasifikacije RMR

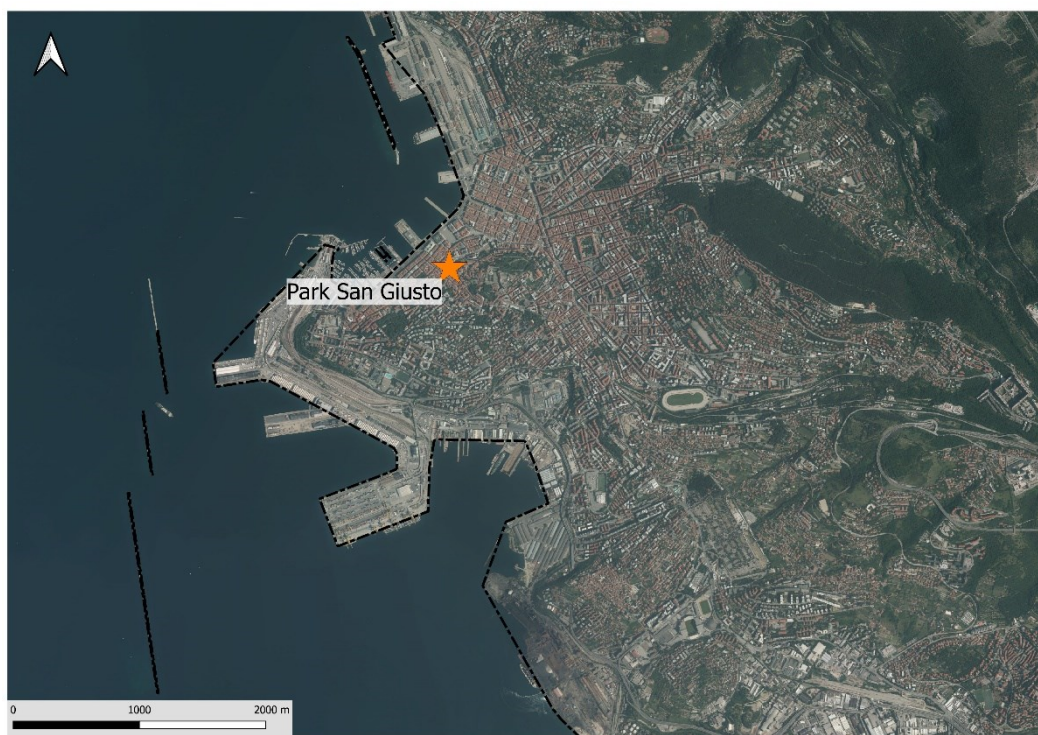
Rezultate analize določanja litološke sestave, stopnje vlažnosti in geometrije diskontinuitet sem preverila z vključevanjem v inženirsko geološki popis izdanka in izkopnega čela, predvsem kot podporo pri karakterizaciji fliša po sistemu klasifikacije RMR. Dobljene rezultate o litološki sestavi je mogoče vključiti pri oceni enoosne tlačne trdnosti, rezultate analize določanja stopnje vlažnosti pa pri lociranju mezenja vode in oceni dotokov vode.

Parametre diskontinuitet sem ocenila predvsem iz rezultatov popisa izkopnega čela v programu ShapeMetriX 3D. Upoštevala sem izračunane razmike med razpokami ter dolžino diskontinuitet. Dobljeni vpadi glavnih sistemov diskontinuitet so bili primerljivi in sem jih lahko upoštevala, preostale parametre pa ocenila na podlagi izkušenj ter iz podatkov ročnega popisa. Izračunana vrednost RMR iz rezultatov analize bližnjelikovne fotogrametrije in terestričnega laserskega skeniranja je bila za heterogeno hribino v kamnolomu Elerji nekoliko višja od izračunane vrednosti iz ročnega popisa, v obeh primerih pa predstavlja zadovoljivo hribino. Najbolj pomembno pa je, da so bile vrednosti vrednotene na podlagi izmerjenih deležev posamezne kamnine in geometrijskih lastnosti diskontinuitet, kar poveča objektivnost geološkega popisa.

Uporaba terestričnega daljinskega zaznavanja pri geološkem popisu heterogenih hribin pripomore k natančnejšim izmeram geometrijskih lastnosti diskontinuitet, na podlagi razlikovanja med kamninami pa do mersko podprtega deleža med njimi. Iz rezultatov terestričnega daljinskega zaznavanja lahko ocenimo večji del parametrov sistema klasifikacije RMR. Ugotovitve analize med drugim kažejo, da je mogoče z analizo oblaka točk in fotogrametričnega 3D modela določiti parametre, vezane na litologijo in diskontinuitete tudi za tankoplastnate heterogene hribine. Karakterizacija fliša na osnovi RMR pa kljub vsemu še ni enoznačna, predvsem zaradi pomanjkljivih smernic za pristop h klasifikaciji heterogene hribine, za katere je v praksi uveljavljena klasifikacija z orodjem GSI (Marinos et al., 2007), ki pa zahteva drugačen pristop k izboru parametrov.

4.5 Podzemna garaža Park San Giusto

Podzemna garaža Park San Giusto (Slika 4.37) je bila zgrajena med letoma 2012 in 2015 v vzpetini San Giusto, ki se nahaja v središču Trsta (Italija). Investitor izgradnje je bil Park San Giusto S.p.a. V sklopu projekta sta bili zgrajeni dve obsežni kaverni dimenzij 125 x 16,5 x 19 m (d x š x v), vertikalni jašek premera 106 m in globine 60 m ter vmesni dostopni predor dolžine 161 m.



Slika 4.37: Prikaz lokacije podzemne garaže Park San Giusto v Trstu (Italiji).

Figure 4.37: Location of the underground parking garage Park San Giusto in Trieste (Italy).

Izkop podzemne garaže sem izbrala kot drugo lokacijo meritev v sklopu doktorske disertacije. Aprila 2013 smo izvedli štiri terenske dni meritev izkopnih čel (Preglednica 4.12). V času meritev je potekal izkop kalote višine 6,7 m in širine 19,3 m. Izkopni korak je bil 2,7 m. Izkopno čelo smo ročno in digitalno popisali, terestrično lasersko skenirali ter stereo fotografirali. Zaradi izvajanja meritev v času izkopa smo imeli na voljo omejen čas 15 do 30 minut.

Preglednica 4.12: Pregled izvedenih meritev v podzemni garaži Park San Giusto (Trst, Italija) s predstavljenimi lokacijami meritev v južni kaverni (Cav_S). Izkopno čelo smo ročno in digitalno inženirsko-geološko popisali, skenirali s terestričnim laserskim skenerjem (TLS) ter stereo fotogrametrično fotografirali (PG) z opremo ShapeMetriX 3D. Enega skeniranja zaradi tehničnih težav s skenerjem nismo mogli izvesti.

Table 4.12: Overview of performed measurements in the underground garage Park San Giusto (Trieste, Italy) with measurements performed in the southern cavern (Cav_S). We manually and digitally logged the excavated tunnel face, then we scanned it using Terrestrial Laser Scanner (TLS) and finally we used the stereo photogrammetry (PG) with equipment ShapeMetriX 3D. Due to technical issues we were not able to perform one laser scanning.

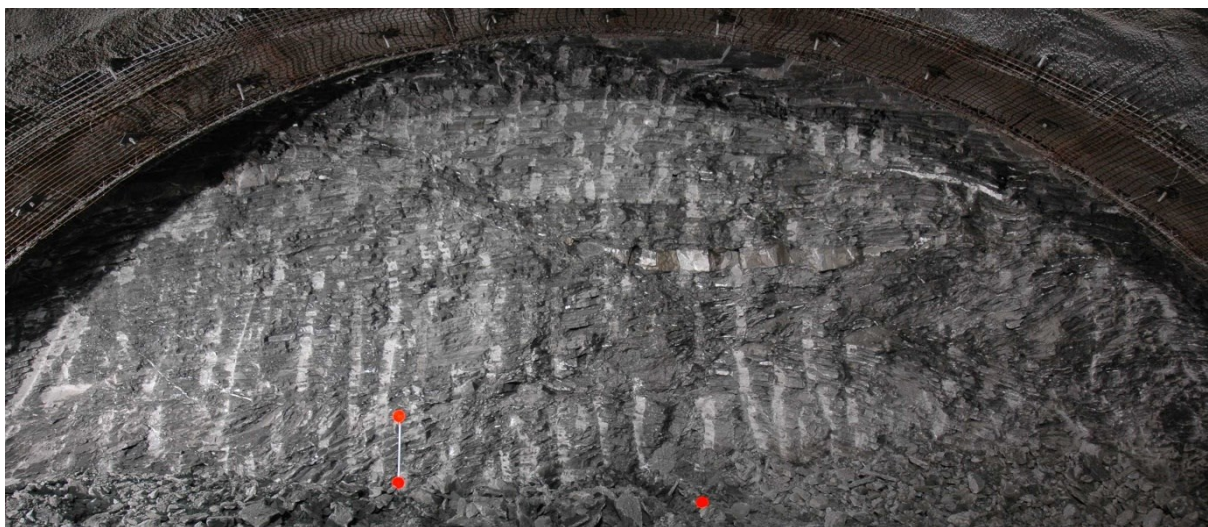
Št.	Datum	Cev	Stacionaža [m] in oznaka profila	Meritve			Opombe
				Ročni zajem	TLS	PG	
1	04.04.2013	Cav_S	091,95 (63CD)	o	o	o	TLS: Riegl VZ PG: ShapeMetriX 3D
2	17.04.2013	Cav_S	108,35 (74CD)	o	o	o	TLS: Riegl VZ PG: ShapeMetriX 3D
3	18.04.2013	Cav_S	109,88 (75CD)	o	x	o	PG: ShapeMetriX 3D
4	19.04.2013	Cav_S	111,36 (76CD)	o	o	o	TLS: Riegl VZ PG: ShapeMetriX 3D

4.5.1 Uporabljene metode

Izkopno čelo sem ročno inženirsko-geološko popisala po uveljavljenem popisnem listu (Priloga A.2), pri čemer smo testirali tudi razviti prototip za digitalni popis izdankov in izkopnih čel (Slika 4.38). Zaradi prepovedi zadrževanja v nepodprtem delu izkopa iz varnostnih razlogov, sem večji del parametrov ocenila. V sklopu popisa sem izrisala izkopno čelo za prikaz glavnih litoloških in strukturnih značilnosti hribine, ki vplivajo na obnašanje hribine med izkopom. Glede na to, da je izkop potekal v flišu, sem podala razmerje med peščenjakom in laporovcem, določila stopnjo preperevanja ter ocenila trdnost kamnine in stopnjo vlažnosti. Podala sem morebitne prelome in glavne tipe diskontinuitet, izmerila njihovo orientacijo, opisala obliko in hrapavost, ter ocenila gostoto pojavljanja in njihovo dolžino ter odprtost in zapolnitev. Na podlagi določenih parametrov sem izračunala vrednost RMR in GSI ter ovrednotila geotehnično obnašanje nepodprte hribine.

Izkopno čelo smo skenirali s terestričnim laserskim skenerjem Riegl VZ400 pod vodstvom Maje Bitenc iz podjetja DFG Consulting d.o.o. V sklopu skeniranja smo zajeli izkopno čelo in del predorske cevi, s čimer smo želeli zajeti tudi merske tarče. Le-te smo uporabili za georeferenciranje oblaka točk ter predorske cevi v okviru preverbe konvergenčnih pomikov.

Na Inštitutu za aplikativne geoznanosti TU Graz (Avstrija) so nam posodili opremo za stereo fotogrametrijo ShapeMetriX 3D. Pred izvedbo fotogrametričnega fotografiranja smo pred izkopno čelo postavili tri predpisane tarče za uporabo opreme ShapeMetriX 3D: dve tarči sta bili postavljeni navpično za izmero natančne razdalje med njima, tretjo pa smo postavili v vodoravni smeri ter izmerili usmerjenost. Vse tri tarče so pomembne za georeferenciranje in nadaljnje določanje orientacije diskontinuitet v prostoru. Z navpičnimi tarčami določimo izmerjeno razdaljo, s tretjo tarčo pa orientiramo model v prostor.



Slika 4.38: Pogled na izkopno čelo v flišu desne kaverne podzemne garaže Park San Giusto na stacionaži m 111,36.

Figure 4.38: Overview of the excavated face in flysch in the right cavern of the underground parking garage Park San Giusto at chainage m 111,36.

4.5.2 Pregled obravnavanega območja

Izgradnja podzemne garaže je potekala v flišnih kamninah eocenske starosti (2E_3) z značilnim menjavanjem plasti laporovcev in peščenjakov (Slika 4.38). Debelina plasti laporovcev znaša od nekaj milimetrov do 50 cm, plasti peščenjakov pa od nekaj centimetrov do 1 m. Na obravnavanem območju se razmerje med laporovcem in peščenjakom zelo spreminja. V zgornjem delu vzpetine so prevladovali plasti peščenjaka, medtem ko so v spodnjem delu prevladovali plasti laporovca (Mecasol, iC GmbH, 2006).

Plasti so v splošnem vpadale proti V (047/32, 105/34) ter proti Z (263/13). Glede na to, da poteka v bližini Črnokalski oz. Palmanovski narivni prelom v dinarski smeri, je v podobni smeri vpadal tudi glavni prelom, in sicer med 30° in 50° proti JZ. Zabeležena sta bila še dva narivna prelomna sistema, ki sta vpadala do 20° proti SV oz. ZSZ (Mecasol, iC GmbH, 2006).

Hribina je bila večji del izkopa razmeroma stabilna, v bližini narivnih prelomov pa tektonsko močno poškodovana in zaglinjena. V sklopu priprave osnov za projektiranje so bile na osnovi prevladujoče litološke enote in stopnje poškodovanosti izdvojene štiri inženirsko geološke enote (Slika 4.38 in Preglednica 4.13).

4.5.3 Izvedba meritev in rezultati

V podzemni garaži Park San Giusto smo izvajali geološko spremljavo izkopa, zato smo zaprosili naročnika za dovoljenje izvedbe meritev s stereo fotogrametrijo ShapeMetriX 3D in terestričnim laserskim skenerjem. Tudi na tem delovišču smo želeli preveriti možnost uporabe terestričnega daljinskega zaznavanja kot podporo pri geološki spremljavi izkopnih čel v heterogeni hribini, in sicer pri razlikovanju med litološkimi enotami, ki sestavljajo heterogeno hribino, določanju glavnih sistemov diskontinuitet in njihovih značilnosti ter izmeriti konvergenčne pomike primarne obloge podzemne kaverne. Izkop kaverne je potekal s predorskim bagrom, zato so bile litološke značilnosti (menjavanje laporovca in peščenjaka) in diskontinuitete (plastnatost, razpoke in prelomi) v hribini na izkopnih čelih razmeroma dobro vidne. Zaradi bližine narivnega preloma je bila hribina mestoma tektonsko poškodovana, pretrta in zaglinjena, zaradi bližine površja pa se je lokalno izcejala voda, kar je vplivalo na nadaljnjo analizo zajetih geoloških podatkov. Meritve smo izvajali v sklopu geološke spremljave izkopa predorskih cevi, zato smo imeli omejen čas za izvedbo vseh načrtovanih meritev.

V nadaljevanju podajam primer izkopnega čela desne (južne) kaverne na stacionaži 111,36 m. Predstavljeni so rezultati ročnega inženirsko geološkega popisa, analize oblaka točk glede na litološko sestavo in stopnjo vlažnosti, geometrijska analiza diskontinuitet ter karakterizacija fliša na osnovi sistema klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989).

Preglednica 4.13: Pregled inženirsko geoloških lastnosti fliša, določenih v podzemni garaži Park San Giusto (Mecasol, iC GmbH, 2006). Inženirsko-geološke enote (GT) so določene na podlagi značilnega razmerja med peščenjakom in laporovcem na območju vzpetine San Giusto, ki vpliva na vrednosti geomehanskih parametrov.

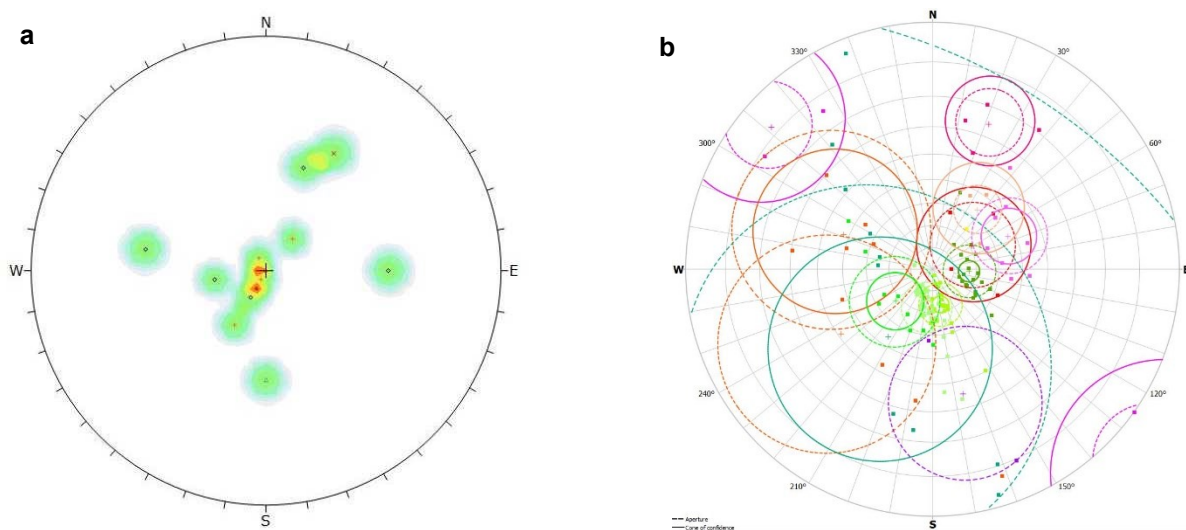
Table 4.13: Overview of engineering geological characteristics for flysch defined in the underground garage Park San Giusto (Mecasol, iC GmbH, 2006). Engineering geological units (GT) are determined based on the percentage between sandstone and marlstone layers in the San Giusto hill area, affecting the geomechanical parameters.

GT	Opis	Stopnja tekt. poškodovanosti	Razdalja med razpokami (mm)					Stanje razpok						RQD	GSI	RMR			UCS qu [MPa]	Prost. teža γ [kN/m ³]	Youngov modul elast. E [MPa]	Strižni kot ϕ [°]	Kohezija c [kPa]				
								Oblika			Hrapavost																
			200-600	60-200	20-60	6-20	< 6	ravna	stopničasta	valovita	hrapava	gladka	zglajena	min	max	min	max	min	max	razred							
C3.1a	Fliš: prevladuje peščenjak	nizka	X								X	X		50	90	35	45	45	61	III	40 - 60	24	2500 - 5000	50 - 55	0.2 - 0.4		
C3.1b		srednja do visoka		X	X							X	X	<25	50	20	35	22	45	IV	25 - 30	24	900 - 2300	41 - 48	0.12 - 0.2		
C3.2a	Fliš: prevladuje laporovec	nizka	X	X							X	X		50	90	20	30	36	52	IV-III	10 - 15	23	550 - 1200	31 - 38	0.08 - 0.12		
C3.2b		srednja do visoka			X	X						X	X	<25		15	25	19	27	V-IV	5 - 10	23	300 - 750	24 - 33	0.05 - 0.08		
C4	Tektonsko poškodovana hribina	zelo visoka				X	X					X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	20	50 - 200	15 - 20	0.02 - 0.08		

4.5.4 Popis izkopnega čela

Ročni inženirsko geološki popis smo izvedli na vsakem izkopnem čelu podzemne kaverne, na katerem smo izvedli meritve. Izkopno čelo sem popisala na podlagi uveljavljenega popisnega lista (Priloga 2). Po pregledu rezultatov sem izmerjene vpade diskontinuitet analizirala v programu Rocscience Dips, v sklopu katerega sem določila glavne sisteme diskontinuitet za primerjavo z rezultati TLS in bližnjleslikovne fotogrametrije (Slika 4.39 a).

Hribino na izkopnem čelu sestavlja neprepereli, tankoplastnati fliš, z značilnim menjavanjem plasti laporovca in peščenjaka. Razmerje med laporovcem in peščenjakom sem ocenila na 70-80 % : 30-20 %. Zaradi tektonske poškodovanosti hribine na izkopnem čelu, sem izločila štiri sisteme plastnatosti, ki jih prekinjajo prelomi: SS1 (030/30), SS2 (030/05), SS3 (150/05-10) in SS4 (220/20). Debeline plasti so bile majhne, in sicer do 10 cm, njihova dolžina ni presegla 5 m. Površina plasti je bil večinoma ravna in rahlo hrapava. Diskontinuitete plasti so bile zaprte in brez polnitve.



Slika 4.39: Primer analize vpadov plastnatosti v desni kaverni podzemne garaže Park San Giusto (stacionaža 111,36 m): a. Na podlagi geološkega popisa izkopnega čela v programu Dips; b. Na podlagi analize stereo fotogrametrije v programu ShapeMetriX 3D. V obeh primerih prevladuje položna plastnatosti proti SV (030-050/05-30), določena sta bila tudi enaka sistema razpok z vpadom proti JZ (200-220/50-60), pri preostalih diskontinuitetah pa so opazne določene razlike, predvsem zaradi večjega števila meritev.

Figure 4.39: An example of orientation analysis for bedding planes in the right cavern of the underground parking garage Park San Giusto (chainage 111,36 m): a. Based on face logging of the excavated face in Dips; b. Based on the analysis of stereo photogrammetry in ShapeMetriX 3D. In both cases, prevails a set of bedding planes towards NE (030-050/05-30), also the same joint set dipping towards JZ was determined (200-220/50-60), whereas other discontinuities show some differences, especially due to a higher number of measurements.

Izkopno čelo sta sekala dva sistema prelomov ter dva naključna preloma (Slika 4.38, Priloga A.2). Prvi sistem prelomov je potekal vzdolž izkopnega čela in je vpadal proti JZ (200/50), z razmikom ok. 100 cm in dolžino preko 3 m. Površina prelomne ploskve je bila ravna in zglajena, hribina je bila vzdolž prelomov pretrta in zaglinjena. Drugi sistem prelomov je vpadal proti VJV (080-100/25-50). Razmiki med prelomnimi ploskvami so bili ocenjeni med 200 in 600 cm, dolžina raztezanja pa preko 3 m. Prelomi so bili odprti do 1 cm in zaglinjeni, z vmesnimi kalcitnimi žilami. Pri popisu je bil določen tudi prelom z vpadom proti SV (030/15) in dolžine preko 3 m. Ploskev preloma je bila ravna in gladka ter zaprta. Prelom z vpadom (270/55) je potekal v desnem delu izkopnega čela. Ploskev preloma je bila ravna in gladka, njegova dolžina je bila ocenjena preko 3 m. Prelom je bil odprt do 1 cm in zapolnjen z glino ter kalcitnimi žilami.

V sklopu popisa sta bila določena tudi dva sistema razpok z vpadom proti SZ (200-220/60) in proti VJV (100/55). Za prvi sistem razpok je bil značilen razmik več kot 200 cm in dolžina med 1 m in 3 m. Površina ploskev je bila ravna in rahlo hrapava, odprte so bile do 1 cm in brez polnitve oziroma s kalcitnimi žilami. Drugi sistem razpok je imel razmik med 200 cm in 600 cm ter dolžino med 1 m in 3 m. Površina ploskve je bila valovita in gladka. Razpoke so bile odprte do 5 mm ter brez polnitve oziroma zaglinjene.

Hribina je bila delno stabilna in brez večjih dotokov vode. Lokalno je bilo opazno mezenje do kapljanje, predvsem vzdolž prelomov.

4.5.5 Analiza oblaka točk glede na litološko sestavo in stopnjo vlažnost

3D lasersko skenirana izkopna čela podzemne garaže Park San Giusto smo obdelali in dobljene oblake točk georeferencirali v programu RiSCAN Pro. Glede na to, da je bila obravnavana hribina na območju izkopa nepreperela, sem lidarski oblak točk analizirala glede na litološko sestavo fliša in stopnjo vlažnosti. Izbrane razrede sem primerjala z vrednostmi intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka. Na podlagi pregleda rezultatov predstavljam v nadaljevanju primer analize izkopnega čela desne (južne) podzemne kaverne na stacionaži 111,36 m. Možnost ločevanja posameznih litoloških enot v flišu sem preverila tako na detajlnem odseku, kot tudi na celotnem izkopnem čelu (Slika 4.43). Pri pregledu hribine na izkopnem čelu, sem ročno določila posamezne plasti in jih ločila glede na litološko sestavo, na plasti peščenjaka in plasti laporovca.

Segmente sem določala vizualno in na podlagi popisa izkopnega čela, kjer sem imela težave z določanjem plasti laporovca. Fliš je bil na izkopnem čelu tankoplastnat (debelina plasti do

10 cm) in s prevladujočo peščeno komponento. Ob podrobnem pogledu fotografij in oblaka točk sem ugotovila, da so prevladovale plasti s postopnim prehodom iz peščenega laporovca v spodnjem delu plasti, v laporovec v zgornjem delu plasti, zato sem ločeno izločila še plasti peščenega laporovca. Na sliki 4.40 je predstavljen primer jedra vrtine v tankoplastnatem flišu, v katerem spremljamo postopen prehod peščenjaka v laporovec. Postopen prehod predstavlja problem pri določanju posamezne plasti in razlikovanju med peščenjakom in laporovcem. Izbor posameznih litoloških enot je oteževala tudi tektonska poškodovanost hribine. Izkopno čelo je namreč v osrednjem delu sekal prelom, vzdolž katerega je bila hribina pretrta in zaglinjena ter z lokalnim mezenjem vode. V programu Matlab sem izbrane segmente statistično analizirala. Vključenih je bilo 3.747 vrednosti laporovca, 73.482 vrednosti peščenega laporovca in 86.568 vrednosti peščenjaka.



Slika 4.40: Fotografija primera jedra vrtine v tankoplastnatem flišu, z nejasno izraženimi plastmi, znotraj katerih peščenjak postopno prehaja v laporovec (fotografija iz arhiva avtorice).

Figure 4.40: Photo of a borehole core in a thin layered flysch, where bedding planes cannot be easily distinguished, as the sandstone gradually transit to marlstone (author's photo archive).

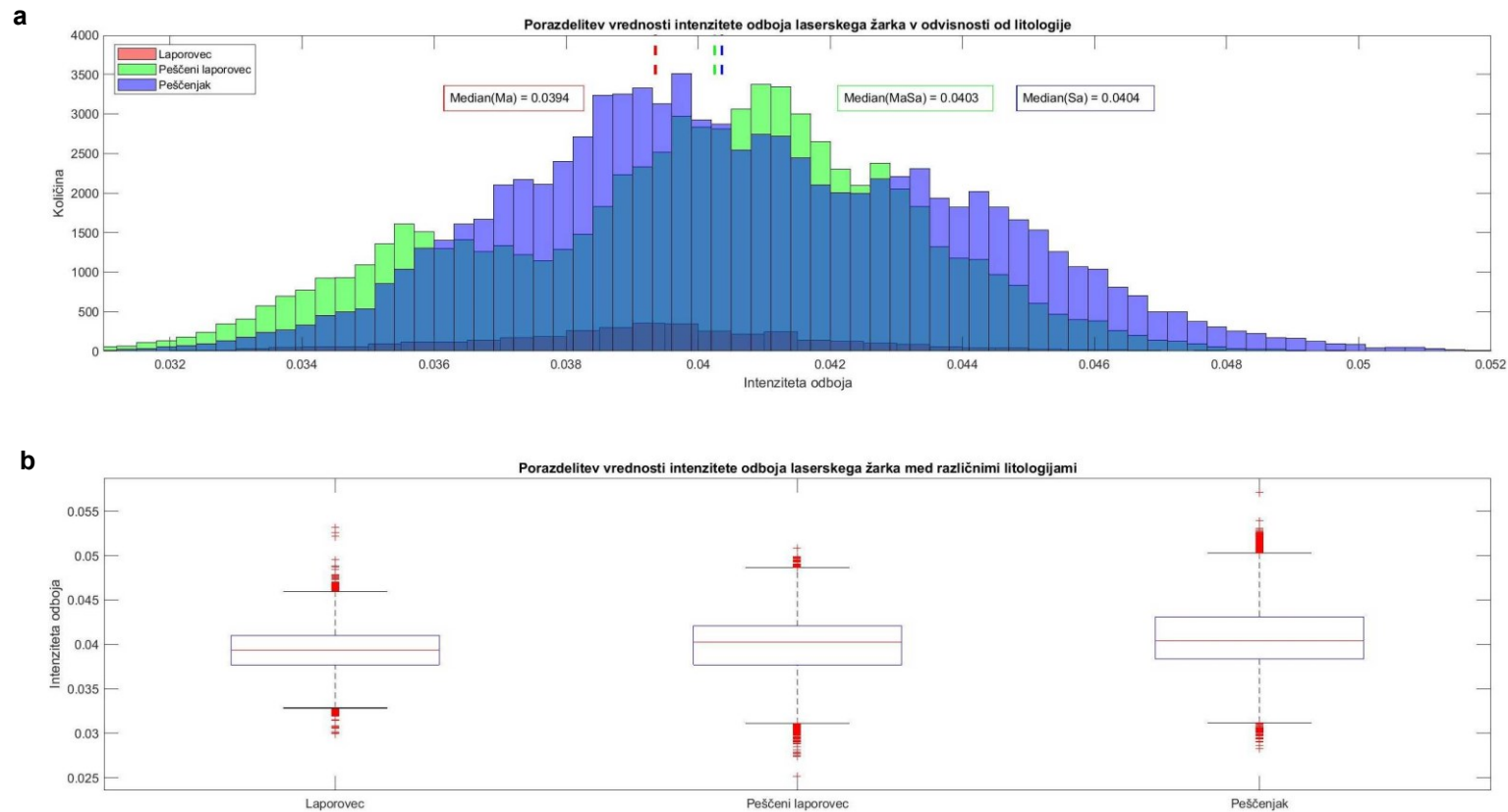
Histogram (Slika 4.41 a) predstavlja porazdelitev vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka za plasti laporovca, peščenega laporovca in peščenjaka. Iz histograma je razvidno, da se vrednosti intenzitete odboja precej prekrivajo, kar je lahko posledica podobne sestave kamnin, ki gradijo fliš ali slabo izbranih segmentov. Porazdelitev vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW je za plasti laporovca sicer normalno porazdeljena, vendar precej razpotegnjena, kar nakazuje na veliko razpršenost vrednosti. V primeru peščenega laporovca ima porazdelitev vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW dva vrhova, kar bi lahko razložili s različno zrnastostjo. Na podlagi prevladujočih višjih vrednosti lahko sklepamo, da prevladuje peščena komponenta. Podobno porazdelitev vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW z dvema

vrhovoma ima peščenjak, ki je bodisi posledica slabega izbora segmenta plasti peščenjaka, bodisi zaradi vključitve plasti peščenjaka z določeno stopnjo vlažnosti. Statistično analizo sem izvedla na vrednostih oblaka točk, preverbo razlik pa s standardnim t-testom s predpostavko (ničelno domnevo), da sta povprečji dveh testiranih skupin enaki, stopnja značilnosti je bila nastavljena na $\alpha = 0,05$ (5 % stopnja zaupanja). Izračunana p-vrednost je bila pod 0,01, torej precej nižja od praga 0,05, na podlagi katere lahko ničelno domnevo o enakih povprečjih zavrnemo, zaradi statistično različnih skupin.

S škatlastim diagramom sem predstavila porazdelitev vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW po posameznih tipih kamnin (Slika 4.40 b). Škatlasti diagram je bil ustvarjen z razponom med spodnjim in zgornjim kvartilom skupaj z mediano (vodoravna linija znotraj škatle) ter najmanjšo in največjo vrednostjo intenzitete odboja. Iz škatlastega diagrama niso opazne razlike med plastmi laporovca, peščenega laporovca in peščenjaka, saj se praktično v celoti prekrivajo. Plasti laporovca imajo značilne brezdimezijske vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW med 0,037 in 0,041 (povprečje 0,039), peščeni laporovci od 0,037 do 0,042 (povprečje 0,039), medtem ko imajo plasti peščenjaka značilne vrednosti med 0,038 in 0,043 (povprečje 0,040). Na podlagi rezultatov analize vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW v odvisnosti od litološke sestave preverbe na izbranem oblaku točk nisem izvedla zaradi prekrivanja vrednosti. Glede na to, da je na več predelih izkopnega čela prihajalo do mezenja vode, sem vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW primerjala še glede na stopnjo vlažnosti.

Izkopno čelo sem dodatno pregledala in ročno izbrala ločene odseke posameznih litoloških plasti (laporovca, peščenega laporovca in peščenjaka) glede na stopnjo vlažnosti (Slika 4.43 in Slika 4.44). Vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW sem analizirala za suhe kamnine (I) in za vlažne kamnine (II).

Izbrane segmente sem statistično analizirala v programu Matlab. V analizo sem vključila 1.559 vrednosti suhega laporovca (I) in 2.008 vrednosti vlažnega laporovca (II), 51.349 vrednosti suhega peščenega laporovca (I) in 22.133 vrednosti vlažnega peščenega laporovca (II) ter 25.293 vrednosti suhega peščenjaka (I) in 89.864 vrednosti vlažnega peščenjaka (II).

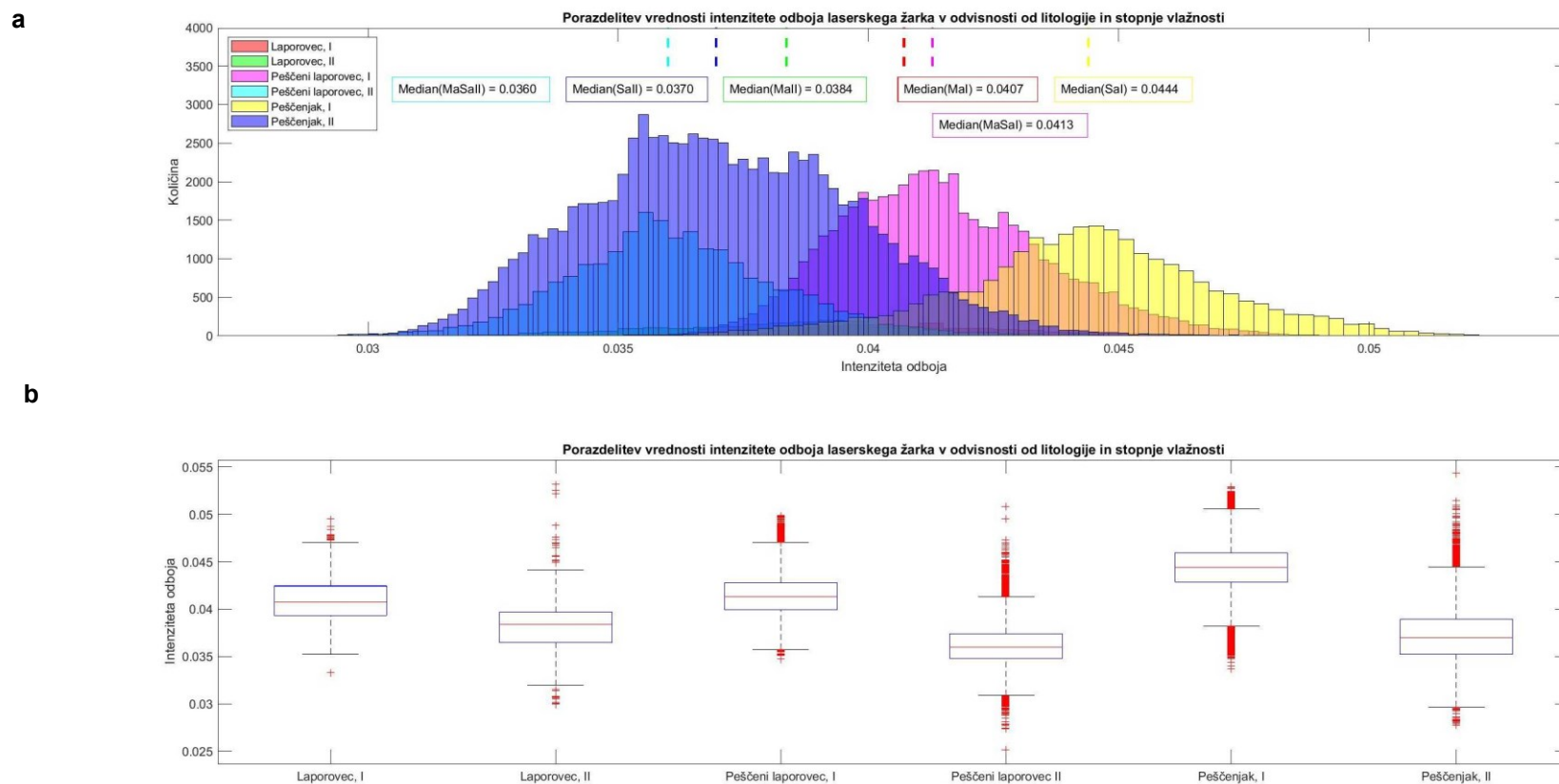


Slika 4.41: a Histogram porazdelitve TLS-RAW vrednosti intenzitete odboja za izbrano izkopno čelo Park San Giusto za laporovce z mediano 0,039 (rdeča črtkana črta), peščene laporovce z mediano 0,040 (zelena črtkana črta) in peščenjake z mediano 0,040 (modra črtkana črta). b. Porazdelitev vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW za laporovce (levo), peščene laporovce (sredina) in peščenjake (desno) s škatlastim diagramom. Pravokotna škatla predstavlja razpon med spodnjim in zgornjim kvartilom skupaj z mediano, osamelci (najmanjša in največja vrednost) pa razpon celotne množice podatkov.

Figure 4.41 a. Histogram showing the distribution of TLS-RAW intensity values for selected face in Park San Giusto for marlstones with a median value of 0,039 (red dashed line), sandy marlstone with a median value 0,040 (green dashed line) and sandstones with a median value of 0,040 (blue dashed line) b. Distribution of TLS-RAW intensity values for marlstones (left), sandy marlstones (centre) and sandstones (right) presented with box plots. The box represents the lower and upper quartiles as the outline, along with a median value. The outliers show values above the third quartile or values below the first quartile.

Slika 4.41 a prikazuje histogram porazdelitve vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka v odvisnosti od litologije in stopnje vlažnosti. Glede na to, da je bila statistična analiza izvedena na vrednostih oblaka točk, so bile vrednosti rezultati statistično značilni. Preverbo razlik sem izvedla s standardnim t-testom stopnja značilnosti je bila nastavljena na $\alpha = 0,05$ (5 % stopnja zaupanja). Izračunana p-vrednost je bila pod 0,01, torej precej nižja od praga 0,05, na podlagi katere lahko ničelno domnevo o enakih povprečjih zavrnemo, zaradi statistično različnih skupin. Iz histograma lahko vidimo, da so vrednosti po posameznih skupinah normalno porazdeljene. Vrednosti vlažnega peščenega laporovca in peščenjaka ter suhega laporovca in peščenega laporovca se prekrivajo, kar nakazuje na podobno litološko sestavo. Porazdelitev vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW je za plasti suhega in vlažnega laporovca normalna, vendar precej razpotegnjena in nakazuje na veliko razpršenost vrednost.

Škatlasti diagrami (Slika 4.41 b) prikazujejo trend padanja vrednosti intenzitete odboja z naraščanjem stopnje vlažnosti. Mediana suhega laporovca (I) je 0,040, vlažnega (II) pa 0,038. Suh peščen laporovec (I) ima vrednost mediane 0,041, medtem ko ima vlažen peščen laporovec (II) vrednost mediane 0,036. Mediana suhega peščenjaka (I) znaša 0,044, vlažnega peščenjaka (II) pa 0,037. Nižje vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka so posledica njene odvisnosti od vlažnosti, saj prihaja na omočenih predelih do izrazite absorpcije valovnih dolžin blizu infrardeče svetlobe laserskega žarka.

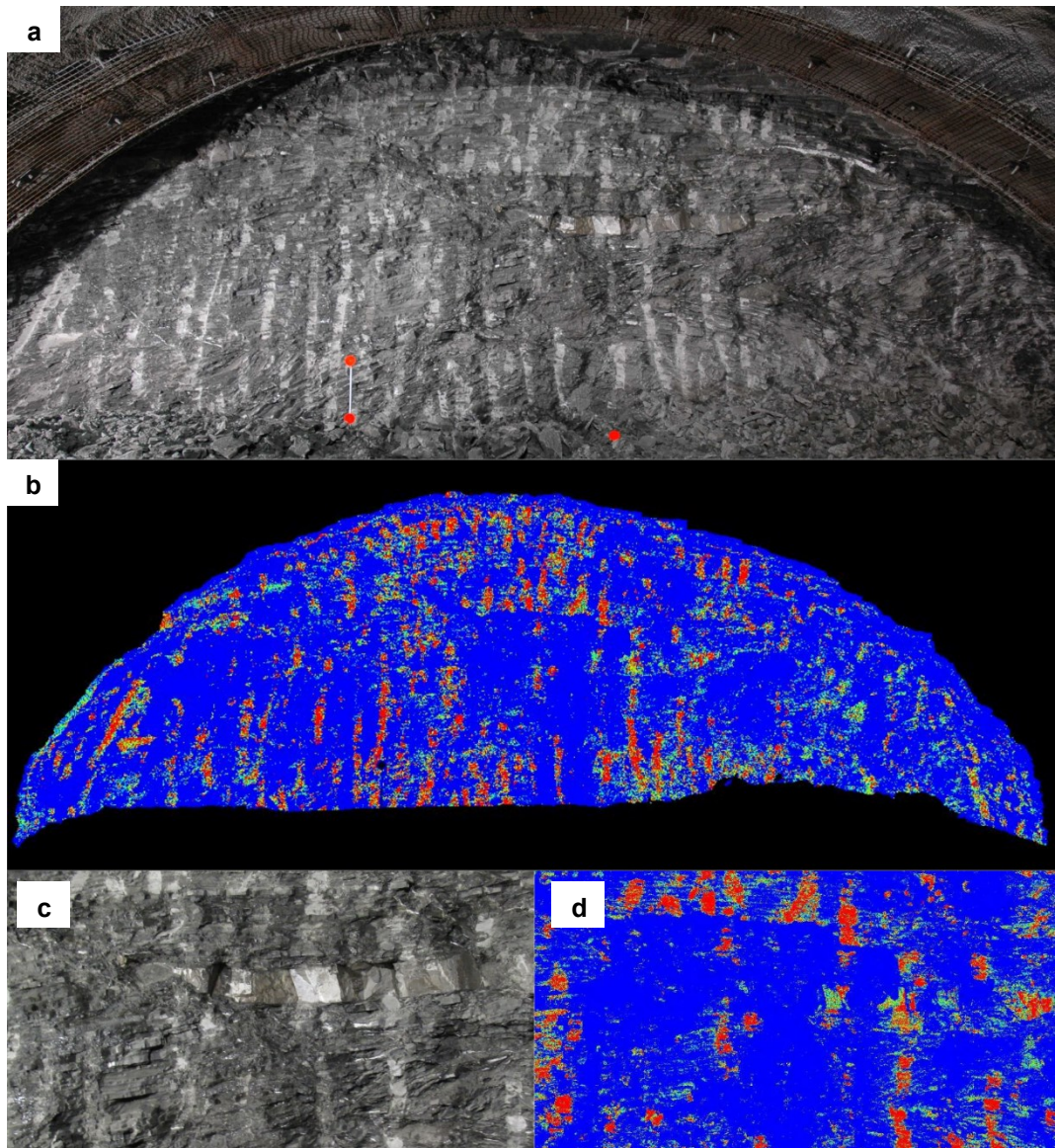


Slika 4.42: a. Histogram porazdelitve TLS-RAW vrednosti intenzitete odboja za izbrano izkopno čelo Park San Giusto, v odvisnosti od litologije in stopnje vlažnosti (I - suh, II - vlažen) in poudarjeno mediano: suhi laporovci (rdeča črta), peščeni laporovci (vijolična črta), peščenjaki (rumena črta) ter vlažni laporovci (zeleno črta), peščeni laporovci (turkizna črta) in peščenjaki (modra črta). b Porazdelitev analiziranih vrednosti intenzitete odboja s škatlastim diagramom. Pravokotna škatla predstavlja razpon med spodnjim in zgornjim kvartilom skupaj z mediano, osamelci (najmanjša in največja vrednost) pa razpon celotne množice podatkov.

Figure 4.42 a Histogram showing the distribution of TLS-RAW intensity values for selected face in Park San Giusto depending on the lithology and seepage (I – dry, II - damp) with emphasized median value for: dry marlstones (red line), sandy marlstone (violet line), sandstones (yellow line) and for damp marlstone (green line), sandy marlstone (green line) and sandstone (blue line). b Distribution of analysed intensity values presented with box plots. The box represents the lower and upper quartiles as the outline, along with a median value. The outliers show values above the third quartile or values below the first quartile.

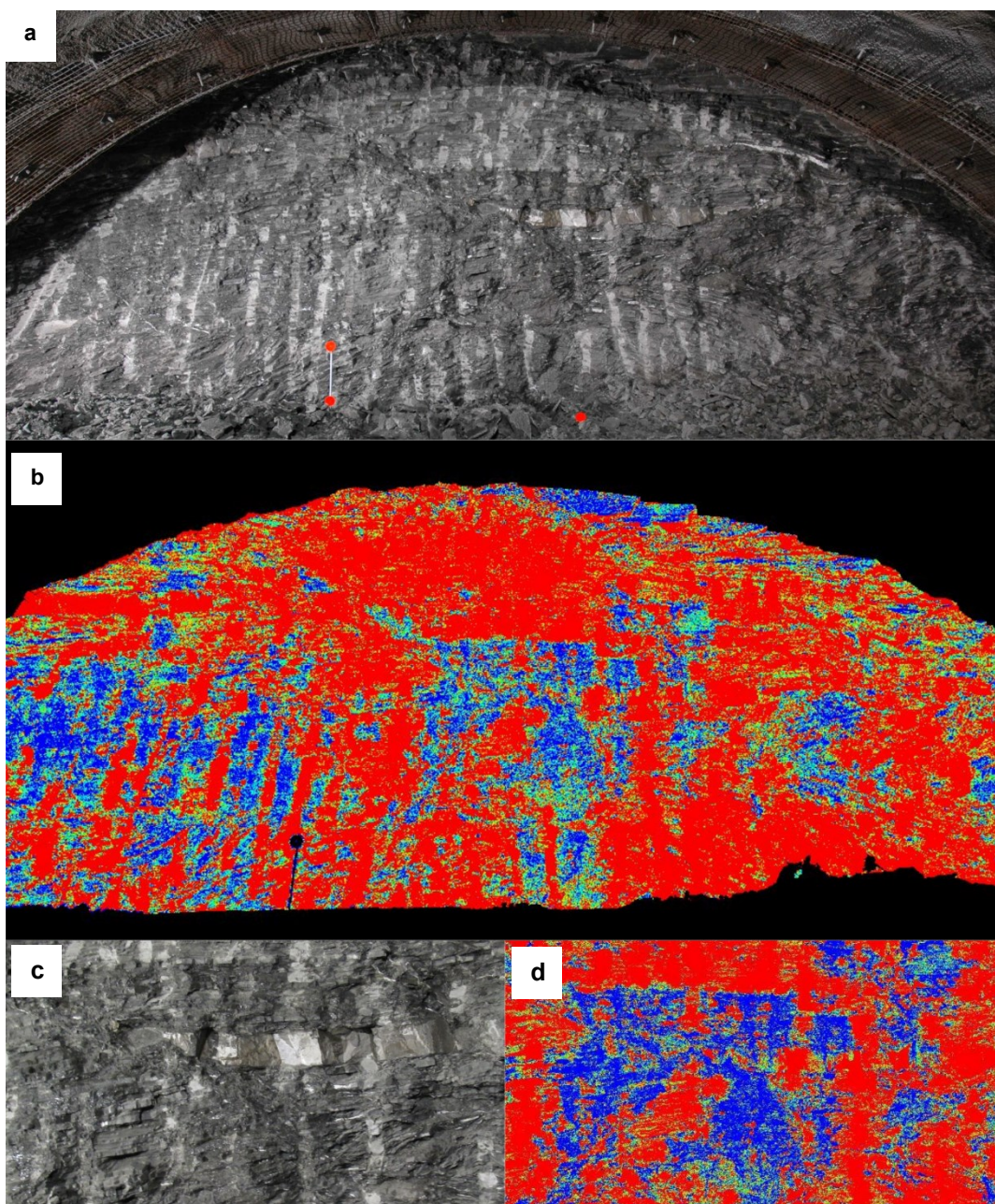
Preverbo vrednosti Intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka sem izvedla za primer suhega peščenjaka (Slika 4.43) in vlažnega peščenjaka (Slika 4.44). V prvem primeru sem za preverbo uporabila brezdimenzijske vrednosti med spodnjim in zgornjim kvartilom suhega (I) peščenjaka (0,042–0,045). Analizirala sem manjše območje izkopnega čela, ki je bilo detajlno 3D lasersko skenirano (Slika 4.43 c in d) ter celotno izkopno čelo (Slika 4.43 a in b). Na sliki 4.43 so predstavljeni rezultati izločenih plasti suhega peščenjaka med zeleno in oranžno barvo. Iz rezultatov lahko izločimo tanke plasti debeline pod 6 cm, koder je razmeroma dobro viden prehod iz zelene barve v modro, kar nakazuje na postopno zrnavost peščenega laporovca. Modra področja so vezana na vrednosti intenzitete odboja, ki so nižje od izbranega praga (0,042-0,045). Primerjava s fotografijo izkopnega čela je pokazala, da so ta območja vezana na tektonsko pretrto in zaglinjeno hribino ter na območja omočene hribine, zato sem težko izločila plasti laporovca. Na izkopnem čelu so vidne tudi izrazite navpične sledi rdeče barve z vrednostmi intenzitete odboja, ki so višje od izbranega intervala in so vezane na izkopno metodo. Izkop podzemnih kavern je potekal s predorskim bagrom, zato so sledi navpične in svetle, kar vpliva na vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka in posledično vodi do napačne interpretacije.

V drugem primeru sem pri preverbi uporabila brezdimenzijske vrednosti med spodnjim in zgornjim kvartilom vlažnega (II) peščenjaka (0,035–0,038), na podlagi katere sem želela preveriti uporabnost pri določanju območij vlažne in mokre hribine ter potencialnih dotokov vode. Analizirala sem tako območje detajlnega 3D laserskega skeniranja (Slika 4.44 c in d), kot tudi celotno izkopno čelo (Slika 4.44 a in b). Rezultati izločenih območij s povečano vlažnostjo in morebitnimi dotoki vode so predstavljeni na sliki 4.44. Območja, kjer je bila hribina vlažna, so obarvana v razponu od zelene do rumene barve. Območja, kjer je bila hribina suha, imajo višje vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW in so zato obarvana rdeče. Nižje vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW obarvajo izkopno čelo modro in so najverjetneje vezane na mokro hribino in potencialne dotoke vode. V spodnjem in levem delu izkopnega čela so vidne napake pri izločitvi vlažne hribine, ki je posledica načina izkopa. Zaradi izkopa s predorskim bagrom ima hribina navpične sledi. Ker je hribina vzdolž teh sledi suha, so višje tudi vrednosti intenzitete odboja.



Slika 4.43: Primer analize oblaka točk izkopnega čela desne kaverne podzemne garaže Park San Giusto (stacionaža 111,36 m): a. Pogled na izkopno čelo; b. Lidarski oblak točk z določenimi vrednostmi Intenzitete odboja TLS-RAW za suhi peščenjak (0,042 do 0,045), pri čemer so plasti peščenjaka slabo vidne, opazne pa so sledi izkopa s predorskim bagrom, ki so svetle in imajo zato visoke vrednosti intenzitete odboja; c. Fotografija izbranega detajla, koder je razvidna debelejša plast peščenjaka ter tanjše plasti peščenega laporovca. Osrednji del detajla seka prelom, vzdolž katerega je hribina pretrta, opazno je tudi izcejanje vode; d. Oblak točk detajla z vrednostmi Intenzitete odboja TLS-RAW za suhi peščenjak (0,042 do 0,045).

Figure 4.43: Example of the point cloud analysis from the excavated face of the right cavern from the underground parking garage Park San Giusto (chainage 111,36 m): a. View of the excavated face; b. Lidar point cloud with extrapolated TLS-RAW intensity values for dry sandstone (0,042 to 0,049). Sandstone layers are not clearly visible, whereas the scratches from the tunnel excavator show high intensity values and are coloured red; c. Photo of the detail with thicker sandstone layer and thin-layered sandy marlstone. In the centre of the photo, the rock mass is cut by a fault, along which the rock mass is tectonized and wet; d. Point cloud with extrapolated TLS-RAW intensity values for dry sandstone (0,042 to 0,045).



Slika 4.44: Primer analize oblaka točk izkopnega čela desne kaverne podzemne garaže Park San Giusto (stacionaža 111,36 m): a. Pogled na izkopno čelo; b. Lidarski oblak točk z določenimi vrednostmi intenzitete odboja TLS-RAW za vlažen peščenjak (0,035 do 0,038); c. Fotografija izbranega detajla heterogene hribine z debelejšo plastjo peščenjaka in tanjšimi plastmi peščenega laporovca. Osrednji del detajla seka prelom, vzdolž katerega je hribina pretrta, opazno je tudi izcejanje vode; d. Oblak točk detajla z vrednostmi intenzitete odboja TLS-RAW za vlažen peščenjak (0,035 do 0,038).

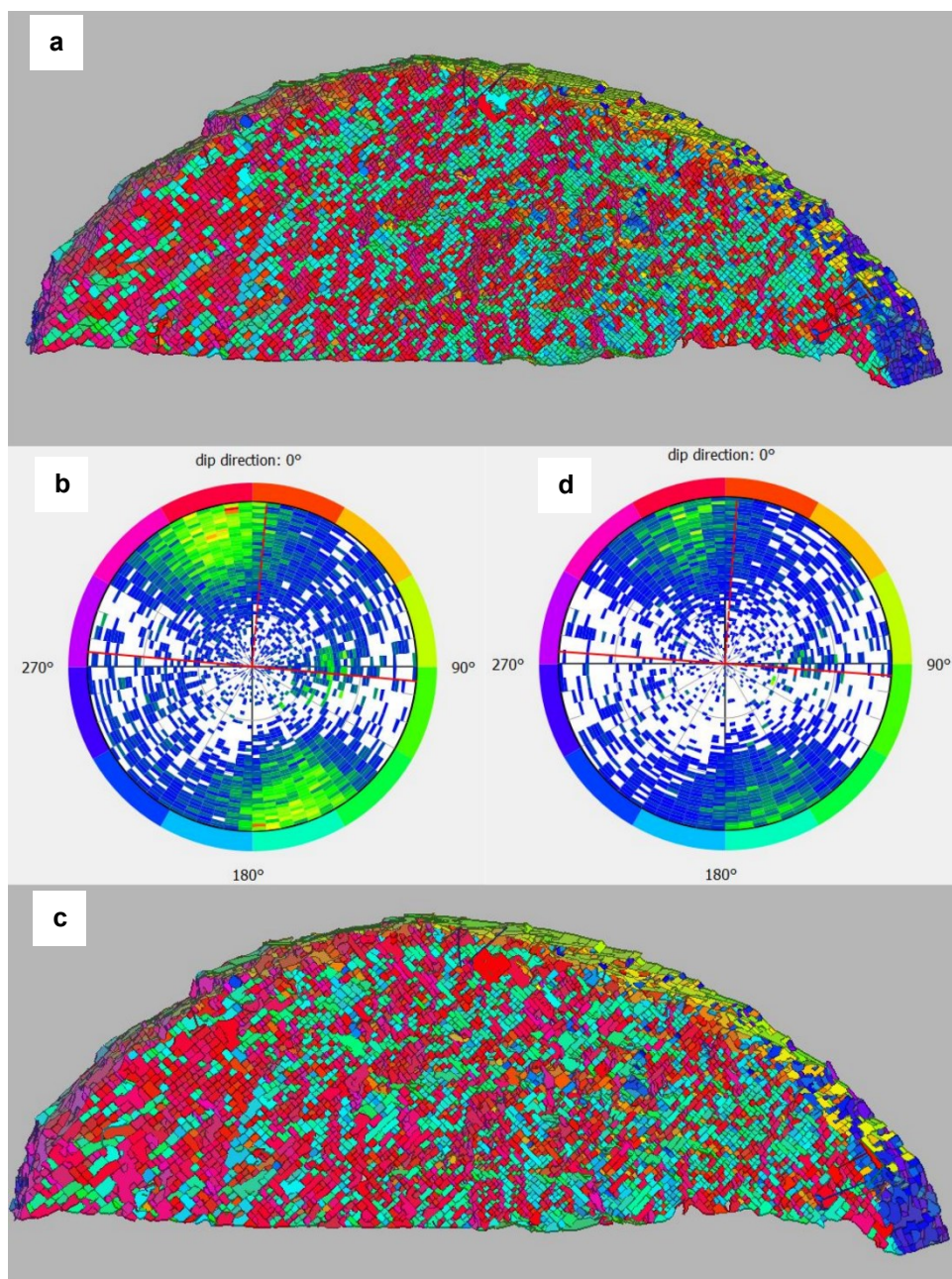
Figure 4.44: Example of the point cloud analysis from the excavated face of the right cavern from the underground parking garage Park San Giusto (chainage 111,36 m): a. View of the excavated face; b. Lidar point cloud with extrapolated TLS-RAW intensity values for damp sandstone (0,035 to 0,038); c. Detail of the heterogeneous rock mass with thicker sandstone layer and thin-layered sandy marlstone. In the centre of the photo, the rock mass is cut by a fault, along which the rock mass is tectonized and wet; d. Point cloud with extrapolated TLS-RAW intensity values for damp sandstone (0,035 to 0,038).

4.5.6 Analiza geometrije diskontinuitet

Namen analize geometrije diskontinuitet je bila preverba uporabe terestričnega laserskega skeniranja in bližnjeliskovne stereofotogrametrije pri določanju parametrov diskontinuitet, ki predstavljajo pomemben člen klasifikacije hribine po sistemu RMR (Bieniawski, 1989).

Lidarski oblak točk iz TLS sem najprej pregledala v programu RiSCAN Pro, kjer sem preverila možnost izločanja diskontinuitet. Izkop v kavernah podzemne garaže Park San Giusto se je izvajal s predorskim bagrom, zato so bile strukturne lastnosti vidne kljub tanki plastnatosti hribine. Preverila sem, ali bi lahko s pomočjo programov za geološko analizo oblaka točk določila diskontinuitete in njihove parametre (vpad, razmike, dolžino, idr.). Lidarski oblak točk sem omejila na samo izkopno čelo, da ne bi prišlo do napak pri interpretaciji. Analizo geometrijo oblaka točk sem izvedla v vtičniku Facets (Dewez et al., 2016) v računalniškem programu CloudCompare, ki je bil predstavljen v poglavju 3.3.3. Analizo oblaka točk s segmentacijo sem izvedla na podlagi Kd drevesa, ki razdeli oblak točk na majhne ravne poligone in jih nato združi na podlagi podobne orientacije v posamezne ploskve ali družine ploskev. Pri izboru parametrov za delitev oblaka točk (največji kot in najdaljša relativna dolžina stranice) sem se opirala na pridobljene podatke v sklopu inženirsko-geološkega popisa izkopnega čela in preverila na dveh primerih (Slika 4.45).

Rezultat pristopa s Kd drevesom je v prvem primeru razdelil oblak točk na majhne poligone, z redkimi večjimi poligoni, ki so najverjetneje posledica samega izkopa (Slika 4.45 a). Iz stereografske analize (Slika 4.45 b) je razvidno, da prevladujejo vpadi poligonov subvertikalno v smeri izkopa (150-180/80 oziroma 330-000/80). Ker so plasti tanke, nastanejo ob izkopu razmeroma ravne večje ploskve, ki so vzporedne izkopnemu čelu in so podobne ploskvam diskontinuitet. Program take ploskve napačno interpretira kot diskontinuitete (poligoni rdeče in turkizne barve). V kroni kalote so vidne plasti, ki jih je program pravilno interpretiral kot diskontinuitete (poligoni rumenozelene barve) in izračunal vpad proti VJV (080-110/30-40), določen pa je bil tudi vpad razpok proti JZ (240/85), ki je označen z modrimi poligoni v kroni kalote. Ostale diskontinuitete iz oblaka točk niso bile izločene. V drugem primeru sem dobila rezultate (Slika 4.45 c in d), ki so zelo podobni prvemu primeru. Na izkopnem čelu so vidni večji poligoni, ki so posledica metode izkopa, večji pa so tudi poligoni na diskontinuitetah v kroni kalote, ki predstavljajo spodnjo ploskev plasti. Vrednosti izračunanih vpadov so manj razpršene, plasti vpadajo proti V (095/30).

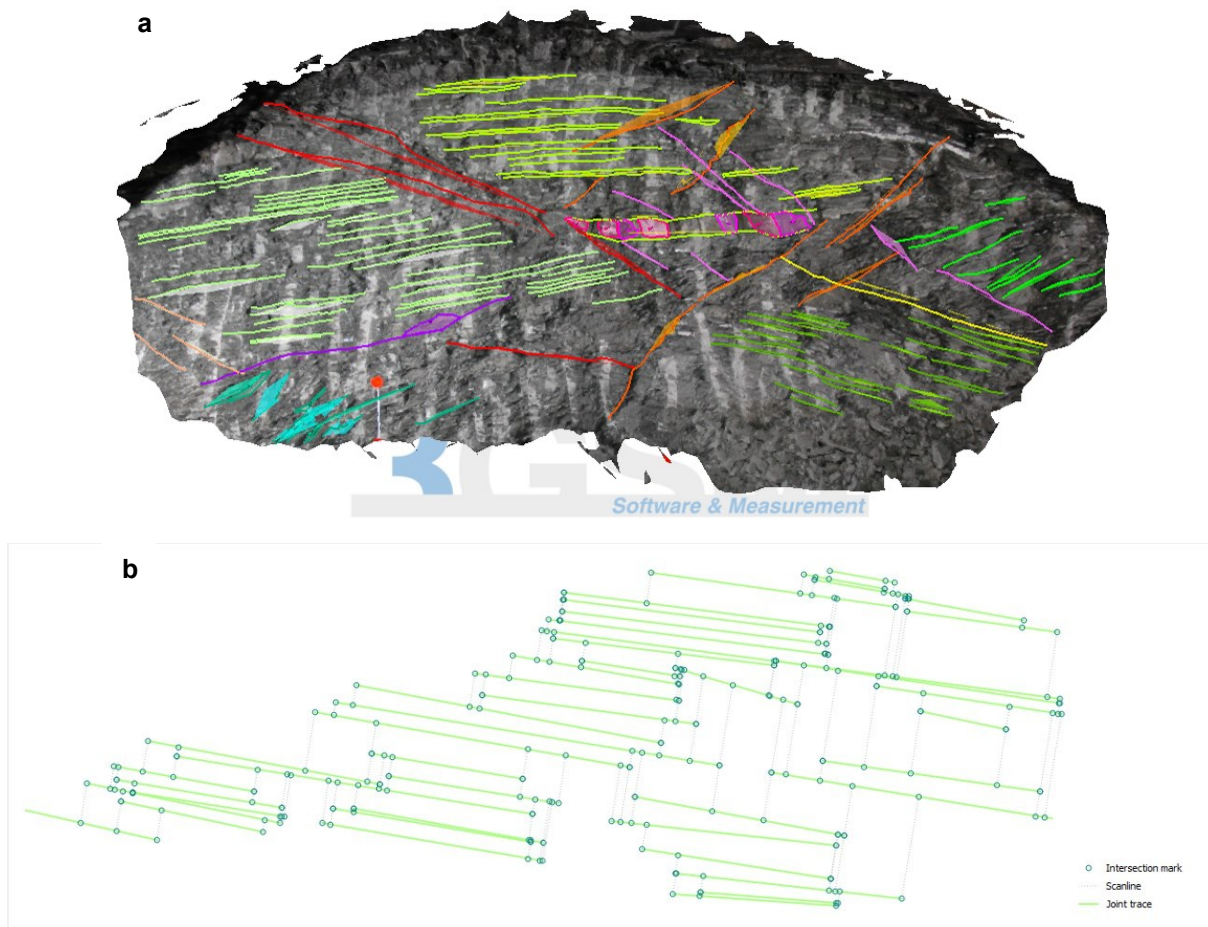


Slika 4.45: Analiza oblaka točk izkopnega čela desne kaverne v vtičniku Facets programa CloudCompare: a. Izločene fasete (ravnih ploskve), ki so bile omejene z največjim kotom 20° ter največjo relativno dolžino stranice 20 cm; b. Stereografska analiza primera (a) s predstavljenimi poli diskontinuitet, na podlagi katerih določimo glavne sisteme diskontinuitet in njihove orientacije; c. Izločene fasete (ravne ploskve), ki so bile omejene z največjim kotom 20° ter največjo dolžino stranice 60 cm; d. Stereografska analiza primera (b) s predstavljenimi poli diskontinuitet, na podlagi katerih določimo glavne sisteme diskontinuitet in njihove orientacije.

Figure 4.45: Point cloud analysis of the excavated face from the right cavern performed in Facets, a Cloud Compare's plugin: a. Extracted facets, limited by maximum angle 20° and maximum relative distance 20 cm; b. Stereographic analysis of discontinuities' poles from the example (a), based on which we determine the main discontinuity sets and their orientation; c. Extracted facets, limited by maximum angle 20° and maximum relative distance 60 cm; d. Stereographic analysis of discontinuities' poles from the example (b), based on which we determine the main discontinuity sets and their orientation.

Fotografije izkopnega čela, ki so bile fotografirane s stereofotogrametrijo, sem obdelala in izdelala 3D model izkopnega čela z diskontinuitetami v programu ShapeMetriX 3D. Inženirski geolog lahko fotogrametrični 3D model izdanka na površini ali izkopnega čela digitalno popiše, dobljene diskontinuitete pa analizira (Slika 4.46 a). V sklopu analize lahko določimo glavne sisteme diskontinuitet ter ocenimo njihov vpad, dolžino in razmike med njimi (Slika 4.46 b). Izkopno čelo desne kaverne podzemne garaže Park San Giusto (stacionaža 111,36 m) sem digitalno popisala. Določila sem diskontinuitete, ki predstavljajo plastnatost, prelomne ploskve in razpoke. Strukturne lastnosti so bile v primeru podzemne garaže Park San Giusto razmeroma dobro izražene, zato sem lahko določila večje število diskontinuitet, ki so predstavljene v stereografski analizi (Slika 4.46 b). Zaradi tankih plasti ni bilo mogoče določiti vseh plasti, kar je vplivalo predvsem na oceno razdalj med plastmi. Na podlagi stereografske analize je bilo določenih pet sistemov plastnatosti (Slika 4.46 a, linije v odtenkih zelene barve): SS1 (347/16), SS2 (050/20), SS3 (273/17), SS4 (009/17) in SS5 (050/22). Vsi sistemi plastnatosti so imeli razdaljo med plastmi od 20 cm do 60 cm, dolžina pa ni presegala 1,6 m. Hribina je bila tektonsko srednje močno poškodovana. Na podlagi popisa je bilo določenih pet sistemov razpok (Slika 4.46 a, linije v odtenkih rožnate barve): J1 (201/64), J2 (131/82), J3 (246/37), J4 (111/42) in J5 (217/33). Razdalje med razpokami so se gibale od 3 cm (J5) do 3,2 m (J4), raztezale so se med 1,1 m in 1,7 m. Čelo izkopa je sekalo več prelomov, določenih je bilo štiri sistemov (Slika 4.46 a, linije rdeče, oranžne in vijolične barve): F1 (239/21), F2 (055/49), F3 (217/24) in F4 (346/55). Razdalje med prelomnimi ploskvami so se gibale od 8 cm do 1,4 m, izmerjene dolžine pa so daljše od 3 m.

Iz analize oblaka točk TLS in fotogrametričnega 3D modela iz stereofotogrametrije ni bilo mogoče določiti hrapavosti ploskev diskontinuitet, ker ploskve diskontinuitet niso izstopale iz čela izkopa. Zaradi premajhne odprtosti diskontinuitet, ki se je na podlagi ročnega popisa gibala do 5 cm, niti ni bilo mogoče izmeriti odprtosti in zapolnitve diskontinuitet.



Slika 4.46: Analiziran 3D model izkopnega čela desne kaverne podzemne garaže Park San Giusto (stacionaža 111,36 m) v programu ShapeMetriX 3D: a. Digitalni popis izkopnega čela z označenimi diskontinuitetami, ki predstavljajo plastnatost (odtenki zelene), prelomne ploskve (odtenki rdeče, oranžne in vijolične) ter razpoke (odtenki rožnate); b. Statistična analiza diskontinuitet, na podlagi katerih ocenimo značilni razmik med diskontinuitetami in njihovo dolžino za določitev parametrov RMR.

Figure 4.46: Analysis of the 3D model from the excavated face of the Park San Giusto's right cavern (chainage 111,36 m) performed in ShapeMetriX 3D: a. Digital face logging with logged discontinuities representing bedding planes (green colours), faults (red, orange and violet colours) and joints (pink colours); b. Statistical analysis of discontinuities, based on which we estimated the spacing and persistence for determining RMR parameters..

4.5.7 Karakterizacija fliša po sistemu klasifikacije RMR

Iz rezultatov TLS in stereofotogrametrije ShapeMetriX 3D sem v sklopu klasifikacije hribine po sistemu klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989) lahko ocenila prevladujočo enoosno tlačno trdnost (A1). Pri tem sem uporabila rezultate analize odboja laserskega žarka. Na podlagi analize sem ugotovila, da prevladujejo predvsem tanke plasti s postopnim prehodom iz peščene komponente v spodnjem delu v lapornato komponento v zgornjem delu. Na podlagi inženirsko-geoloških enot, ki so bile določene v sklopu projekta (Preglednica 4.14), sem uporabila predlagano karakteristično enoosno tlačno trdnost. Parametre diskontinuitet sem določila iz 3D modela, pri čemer sem uporabila podatke o razmiku med diskontinuitetami (A3)

in njihovo dolžino (A4.1). Izmerjeni vpad diskontinuitet s prevladujočo plastnatostjo, razpokami in prelomnimi ploskvami sem upoštevala pri korekciji zaradi vpada diskontinuitet v predorih (B). Ostale parametre sem ocenila na podlagi pregleda 3D modela in oblaka točk ter iz ročnega popisa. Izkopno čelo ima različne značilnosti v levem in desnem delu, kar vpliva na obnašanje hribine pri izkopu (Slika 4.38). Vrednost RMR sem izračunala ločeno, na podlagi litoloških in geometrijskih značilnosti fliša na čelu izkopa. Izračunana vrednost RMR je nižja od izračunane vrednosti iz ročnega popisa. Hribina je na levi strani izkopnega čela slaba (IV) do zadovoljiva (III), hribina na desni strani pa slaba (IV). Preglednica 4.13 predstavlja primerjavo izračunanih vrednosti.

Preglednica 4.14: Primerjava karakterizacije hribine na izkopnem čelu desne kaverne Park San Giusto (stacionaža 111,36 m) na podlagi sistema klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989) iz ročnega popisa ter digitalnega popisa s pomočjo programa ShapeMetriX 3D.

Table 4.14: Comparison between characterization of rock mass on the excavated face of the right cavern Park San Giusto (chainage 111,36 m) based on the classification system RMR (Bieniawski, 1989) from manual face logging and digital face logging using the software ShapeMetriX 3D.

Meritev	A1	A2	A3	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4	A4.5	A5	B	RMR
Ročni popis (levi del)	5	5	15	3	3	1	4	6	12	-10	44 (III)
Ročni popis (desni del)	3	3	15	3	1	1	2	6	12	-10	36 (IV)
ShapeMetriX 3D (levi del)	5*	5*	13	3	4*	1*	4*	6	9	-10	40 (IV)
ShapeMetriX 3D (levi del)	2*	3*	13	3	1*	1*	2*	6	12	-10	33 (IV)

* Vrednosti, ki so bile ocenjene in ne izmerjene iz 3D modela.

* Values which were estimated instead of measured from the 3D model.

4.5.8 Razprava

4.5.8.1 Določitev litologije, stopnje preperevanja in stopnje vlažnosti

Pri analizi izkopnega čela v flišu sem med drugim želela preveriti, ali lahko na podlagi vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW razlikujemo med plastmi laporovca in peščenjaka oziroma plastmi s postopnim preходом. Obenem pa sem želela določiti spodnjo mejo debeline plasti, ki še omogoča razlikovanje. Za fliš na območju vzpetine San Giusto je značilno, da je tankoplastnat (debelina plasti med 2 cm in 20 cm). Glede na to, da je izkop potekal v neprepereli hribini, nisem preverila odvisnosti intenzitete odboja laserskega žarka od stopnje preperevanja, temveč samo od stopnje vlažnosti. Rezultati analize vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka so se v primeru izkopa kaverne za podzemno garažo Park San Giusto izkazale kot delno zanesljive pri razločevanju med litološkimi enotami in zanesljive pri določanju stopnje vlažnosti. Rezultati analize vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka (Slika 4.41) ne izkazujejo večjih razlik med posameznimi litološkimi enotami, zaradi prekrivanja.

Izkop kavern v podzemni garaži Park San Giusto je potekal v nepreperem flišu. Na podlagi ročnih inženirsko geoloških popisov je potekal izkop na izbranih čelih v flišu s prevladujočim deležem laporovca nad peščenjakom (80 %:20 %). Ne glede na to, da je za fliš značilna cikličnost menjavanja plasti laporovca, peščenjaka in glinavca, najdemo peščenjake različne zrnivosti ter prehodne kamnine med laporovcem in peščenjakom. Iz rezultatov analiz lahko sklepamo, da so razlike med vrednostmi intenzitete odboja TLS-RAW statistično značilne predvsem za posamezne litološke enote, kot sta laporovec in peščenjak. Na vrednost intenzitete odboja laserskega žarka najbolj vplivajo odsevne sposobnosti skeniranega materiala, ki so odvisne od mineralne sestave in velikosti zrn. V primeru analize na izkopnih čelih Parka San Giusto so vidne tudi prehodne vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW, zato lahko sklepamo, da so bile 3D lasersko skenirane tudi plasti kamnin z vmesno sestavo oziroma s postopnim preходом zrnivosti znotraj plasti kamnine. V sklopu analize moramo pri določanju litologije iz oblaka točk upoštevati tudi debelino plasti, ki je bila na osnovi ročnega popisa ocenjena med 2 cm in 20 cm. Razločevanje med litološkimi enotami je v primeru tankoplastnatih heterogenih hribin poseben izziv in v večini primerov subjektivno določena, saj težje ločimo kamnine vmesne sestave, na primer lapornat peščenjak (Slika 4.40). Na vrednost intenzitete odboja vpliva tudi izbrana ločljivost 3D laserskega skeniranja ter oddaljenosti od izkopnega čela. Glede na razpone debeline plasti moramo upoštevati disperzijo laserskega žarka, kar potencialno vpliva na zabeleženo vrednost intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka in posledično na rezultat. V primeru analize izkopnih čel, kjer smo ugotovili, da prevladujejo kamnine vmesne sestave med peščenjakom in laporovcem, je uporaba

nadgradnje pristopa za razločevanje med litološkimi enotami s pomočjo vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka delno zanesljiva v primerih, ko je debelina plasti manjša od 6 cm.

Rezultati analize vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW v odvisnosti od stopnje vlažnosti posamezne litološke enote, so se izkazali za zanesljive. Vrednosti intenzitete odboja so za vlažne kamnine nižje od suhih, vendar se med seboj prekrivajo. Nižje vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka v primeru vlažnih kamnin potrjujejo delno absorpcije valovnih dolžin blizu infrardeče svetlobe laserskega žarka. Za razliko od raziskav, ki so jih opravili Francesci et al. (2009) ter Lu et al. (2005), smo ugotovili, da lahko na podlagi vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka razlikujemo tudi med vlažnimi in mokrimi območji hribine. Iz podrobnejšega pregleda oblaka točk smo obenem ugotovili tudi, da lahko zaznamo mezenje vode na kontaktih diskontinuitet in v plasteh, katerih debelina je manjša od 6 cm. Podajanje stopnje vlažnosti in dotoke vode predstavlja v inženirski geologiji pomemben parameter pri klasifikaciji hribine. Naraščanje stopnje vlažnosti in pojavi dotokov vode lahko privede do pospešenega preperevanja drobnozrnatih kamninah (laporovcih, meljevcih in glinavcih) fliša. Obenem pa lahko dotoki vode na kontaktih diskontinuitet izpirajo mehke zapolnitve (glino, tektonski zdrob), kar dodatno zmanjša stabilnost izkopa oziroma brežine.

4.5.8.2 Določitev geometrije diskontinuitet

Izkop kavern podzemne garaže Park San Giusto se je izvajal s predorskim bagrom, kar je razmeroma ugodno vplivalo na jasno izraženost struktur na izkopnem čelu ter na določanje geometrije diskontinuitet. Rezultati stereofotogrametrije s ShapeMetriX 3D so bili sicer zanesljivejši od rezultatov terestričnega laserskega skeniranja, vendar lahko s pomočjo slednjega polavtomatsko izločimo diskontinuitete z jasno izraženimi ploskvami.

Pri analizi oblaka točk obravnavanega izkopnega čela v flišu je najtežje določiti diskontinuitete, ki vpadajo približno v smeri izkopa pod različnimi nakloni in se največkrat nanašajo na plasti. Na hribini izkopnega čela se tako orientirane diskontinuitete vidne zgolj kot linije oziroma robovi, ki jih iz oblaka točk težje izločimo. Kljub vsemu sem pri ročnem popisu določila diskontinuitete z jasno izraženo strukturo predvsem v kroni izkopnega čela ter na debelejši plasti peščenjaka. Zanimalo me je, kako natančno lahko določi program, na podlagi polavtomatske analize, izbrane diskontinuitete iz oblaka točk. V ta namen sem uporabila vtičnik Facets (Dewez et al., 2016) s pristopom Kd drevesa, ki razdeli oblak točk na majhne ravne poligone. V sklopu analize sem oblak točk razdelila na manjše in večje poligone. Na predelih, kjer so bile ročno popisane diskontinuitete z jasno izraženimi ploskvami, jih je program

ustrezno interpretiral. Kljub vsemu pa sem pri stereografski analizi ugotovila, da prevladujejo ploskve s subvertikalnim vpadom v smeri izkopa, ki ne predstavljajo ploskev diskontinuitet, temveč površino izkopnega čela in bi jih morali iz analize odstraniti.

Diskontinuitete, ki so na hribini izkopnega čela izražene kot linije oziroma robovi, sem določila z obdelavo fotogrametričnega 3D modela v programu ShapeMetriX 3D. Hribino na izkopnem čelu sem digitalno popisala, in sicer ločeno za plasti, razpoke in prelomne ploskve. Rezultati so bili statistično analizirani, podani so bili glavni sistemi diskontinuitet ter parametri, kot so vpad, razdalja med diskontinuitetami in njihova dolžina. V sklopu analize geometrije sem določila pet sistemov plastnatosti, štiri sisteme prelomov in pet sistemov razpok. Postopek digitalnega popisa hribine s programom ShapeMetriX 3D sicer ni objektivni, ker ne omogoča avtomatske obdelave 3D modela, ampak potrebuje določitev diskontinuitet s strani inženirskega geologa. Ne glede na to pa predstavlja pomembno orodje pri inženirsko geološkem popisu tankoplastnatih heterogenih hribin, kot je fliš. Rezultati so delno primerljivi z ročnim popisom, pri čemer se moramo zavedati, da se je popis izvajal brezkontaktno in brez uporabe geološkega kompasa. Iz rezultatov sledi, da je metoda uporabna do neke mere.

4.5.8.3 Karakterizacija fliša po sistemu klasifikacije RMR

Rezultati terestričnega laserskega skeniranja in stereofotogrametrije s programom ShapeMetriX 3D so se v primeru podzemne garaže Park San Giusto izkazali kot pomembna podpora pri karakterizaciji fliša po sistemu klasifikacije RMR, kljub subjektivni interpretaciji pri obdelavi fotogrametričnega 3D modela.

Rezultati analize vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka so pokazali, da se plasti laporovca in peščenjaka pojavljata v podobnih razmerjih, predvsem zaradi plasti, znotraj katerih peščenjak postopno prehaja v laporovec. Na osnovi ugotovljenih rezultatov sem nadgradila litološki opis iz ročnega popisa, kjer smo ocenili, da prevladujejo plasti laporovca nad peščenjakom. Dobljene rezultate o litološki sestavi sem uporabila pri oceni enoosne tlačne trdnosti (A1). Glede na to, da je izkop kavern potekal v neprepereli hribini, tega parametra klasifikacije (A4.5) nisem dodatno analizirala. Dobljeni rezultati vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW ter gostote diskontinuitet iz fotogrametričnega 3D modela so pripomogli k boljši oceni kvalitete vrtanja na jedro RQD (A2). Analiza odvisnosti intenzitete odboja od stopnje vlažnosti je pomembno prispevala tudi k oceni parametrov klasifikacije o podzemni vodi.

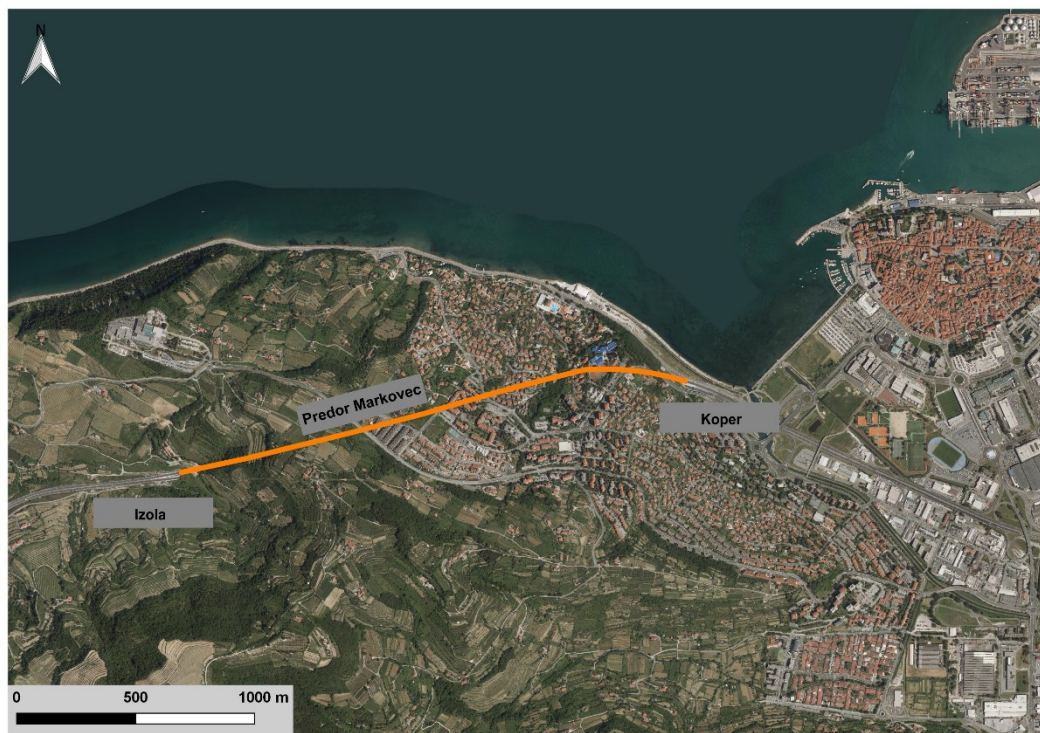
Pri oceni parametrov diskontinuitet sem se opirala predvsem na rezultate stereofotogrametričnih analiz, opravljenih v programu ShapeMetriX 3D, ki pomembno

prispevajo k analizi glavnih diskontinuitet, njihove orientacije (B), razdalje med diskontinuitetami (A3) ter raztezanja (A4.1). Digitalni popis hribine na izkopnem čelu sem izvedla ročno na 3D modelu, torej popis ni objektiven, a je vendar bolj natančen v primerjavi z ročnim popisom. Za doseg kakovostnih podatkov in rezultatov o razmikih in raztezanju diskontinuitet, jih je potrebno določiti čim bolj natančno ter v čim večjem številu. Parameter, ki opisuje hrapavost diskontinuitet, je zaradi slabo vidnih ploskev težko izmeriti ali oceniti. Odprtost diskontinuitet in polnitev predstavlja na podlagi trenutnega razvoja programov še vedno izziv, zato sem parametre ocenila iz izkušenj tekom geološke spremljave.

Pri karakterizaciji fliša na izkopnih čelih kaverne podzemne garaže Park San Giusto po sistemu klasifikacije RMR pomembno prispevajo rezultati terestričnega laserskega skeniranja in stereofotogrametrije s programom ShapeMetriX 3D. Rezultati analize pripomorejo k natančnejšemu izboru vrednosti parametrov sistema klasifikacije. Kar je najpomembneje, rezultati izračunane vrednosti RMR so primerljivi z vrednostmi iz ročnega popisa.

4.6 Predor Markovec

Predor Markovec povezuje hitro cesto med Koprom in Izolo skozi istoimenski hrib (Slika 4.47). Zgrajen je bil med letoma 2009 in 2015 kot dvocevni dvopasovni predor dolžine 2,3 km. Investitor izgradnje je bil DARS d.d.



Slika 4.47: Prikaz poteka trase predora Markovec med Koprom in Izolo.

Figure 4.47: Overview of the Markovec tunnel alignment between Koper and Izola.

V predoru Markovec kjer smo izvajali geološko spremljavo izkopa. Med septembrom 2011 in majem 2012 smo izvedli 15 terenskih dni in posneli izkopna čela kalote predora (Preglednica 4.15). Kalota izkopnega čela je bila 6,0 m visoka in 11,7 m široka, izkopni korak je znašal 2,7 m. Izkopno čelo smo ročno popisali, terestrično lasersko skenirali ter eno izkopno čelo stereo fotografirali. Zaradi izvajanja meritev v času izkopa smo imeli na voljo čas omejen na 15 do 30 minut.

Preglednica 4.15: Pregled izvedenih meritev v predoru Markovec s predstavljenimi lokacijami meritev: desna predorska cev na vzhodnem portalu (DCE); desna predorska cev na zahodnem portalu (DCW); leva predorska cev na vzhodnem portalu (LCE); leva predorska cev na zahodnem portalu (LCW). Izkopno čelo smo ročno inženirsko-geološko popisali, skenirali s terestričnim laserskim skenerjem (TLS) ter stereo fotogrametrično fotografirali (PG) z opremo ShapeMetriX 3D. Zelena polja s krogom prikazujejo izvedene meritve, rdeča polja z x pa neizvedene meritve.

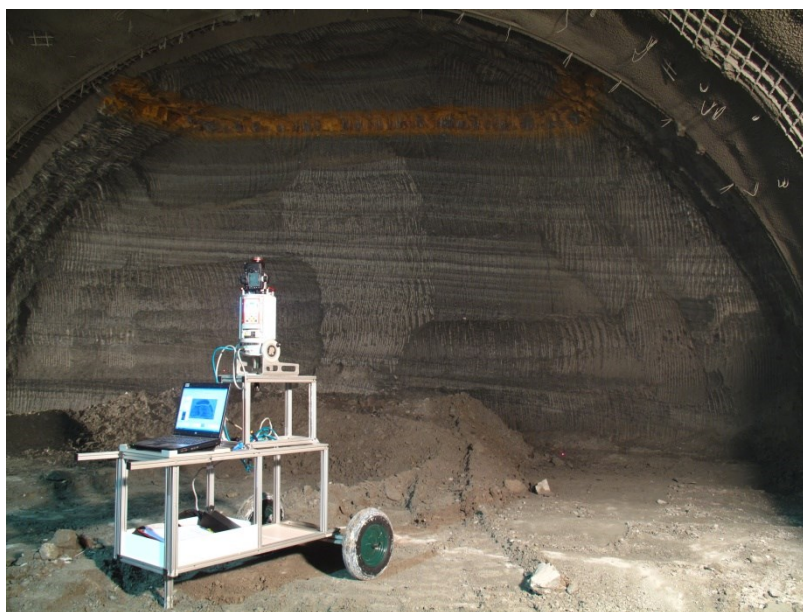
Table 4.15: Overview of performed measurements in the Markovec tunnel with their locations: right tunnel tube at the Eastern portal (DCE); right tunnel tube at the Western portal (DCW); left tunnel tube at the Eastern portal (LCE) and left tunnel tube at the Western portal (LCW). We manually logged the excavated tunnel face, then we scanned it using Terrestrial Laser Scanner (TLS) and finally we used the stereo photogrammetry (PG) with equipment ShapeMetriX 3D. Green fields with circles show performed measurements, red fields with x non-performed measurements.

Št.	Datum	Cev	Stacionaža [km]	Meritve			Opombe
				Ročni zajem	TLS	PG	
1	21.09.2011	DCE	0+611.2	o	o	x	TLS: Riegl VZ400
2	21.09.2011	LCW	0+877.0	o	o	x	TLS: Riegl VZ400
3	21.09.2011	DCW	0+893.0	o	o	x	TLS: Riegl VZ400
5	21.03.2012	LCE	0+619.4	o	o	x	TLS: Riegl VZ400
6	13.04.2012	LCE	0+634.0	o	o	x	TLS: Riegl VZ400
7	22.04.2012	LCE	0+741.8	o	o	x	TLS: Riegl VZ400
8	22.04.2012	LCE	0+744.0	o	o	x	TLS: Riegl VZ400
9	23.04.2012	LCE	0+746.2	o	o	x	TLS: Riegl VZ400
10	24.04.2012	LCE	0+752.8	o	o	x	TLS: Riegl VZ400
11	24.04.2012	LCE	0+755.0	o	o	x	TLS: Riegl VZ400
12	25.04.2012	LCE	0+759.4	o	o	x	TLS: Riegl VZ400
13	26.04.2012	LCE	0+763.8	o	o	x	TLS: Riegl VZ400
14	27.04.2012	LCE	0+768.2	o	o	x	TLS: Riegl VZ400
15	09.05.2012	LCE	0+832.9	o	o	x	TLS: Riegl VZ400
16	11.05.2012	LCE	0+843.7	o	x	o	PG: ShapeMetriX 3D

4.6.1 Pregled metod

Izkopno čelo sem ročno inženirsko-geološko popisala po uveljavljenem popisnem listu (Priloga A.1). Iz varnostnih razlogov je zadrževanje v nepodprtem delu izkopa prepovedano, zato sem parametre kamnine (sestava, stopnja preperevanja, trdnost) in diskontinuitet (vpad, razmiki, dolžine, odprtost in polnitev) ocenila. Pri popisu je objektivna skica izkopnega čela pomembna, saj nam poda glavne litološke in strukturne značilnosti, ki vplivajo na obnašanje hribine pri izkopu. Izkop predora Markovec se je izvajal v flišu, zato sem podala razmerje med peščenjakom in laporovcem, določila stopnjo preperevanja ter ocenila trdnost kamnine in stopnjo vlažnosti. Ovrednotila sem glavne tipe diskontinuitet, izmerila njihovo orientacijo, opisala obliko in hrapavost, ter ocenila gostoto pojavljanja in dolžino ter odprtost in zapolnitev. Na podlagi določenih parametrov sem izračunala vrednosti RMR in GSI ter ovrednotila geotehnično obnašanje nepodprte hribine.

Poleg ročnega popisa smo izkopno čelo skenirali s terestričnim laserskim skenerjem Riegl VZ400 (Slika 4.48). Skeniranje je izvajala Maja Bitenc iz podjetja DFG Consulting d.o.o. V sklopu skeniranja smo zajeli tako izkopno čelo kot del predorske cevi. S tem smo zajeli tudi merske tarče, ki smo jih uporabili za georeferenciranje oblaka točk ter predorsko cev, v okviru preverbe konvergenčnih pomikov.



Slika 4.48: Pogled na skeniranje izkopnega čela v predoru Markovec s TLS Riegl VZ-400. Na izkopnem čelu so vidne temno sive plasti laporovca in svetlo sive plasti peščenjaka. V zgornjem delu poteka izrazita plast peščenjaka, ki je močno preperela in oksidirana (oranžne barve).

Figure 4.48: Terrestrial laser scanning of the tunnel face using Riegl VZ-400. On the tunnel face are visible dark gray marlstone layers and light gray sandstone layers. In the upper part lies a sandstone layer, which is strongly weathered and oxidized (orange colour).

Na Inštitutu za aplikativne geoznanosti TU Graz (Avstrija) so nam posodili opremo za stereo fotogrametrijo ShapeMetriX 3D. Od dveh meritev smo zaradi težav s spominsko kartico fotogrametrično fotografirali samo eno izkopno čelo. Po priporočilih proizvajalca smo pred izkopno čelo postavili tri tarče, ki so pomembne pri georeferenciranju modela.

4.6.2 Pregled obravnavanega območja

Predor je bil zgrajen v flišnih kamninah eocenske starosti (3E_2), za katero je značilno menjavanje temno sivega meljastega in peščenega laporovca ter svetlo sivega drobno do srednje zrnatega peščenjaka (Slika 2.2 in Slika 4.49). V vzhodnem predelu predora je v obliki sinklinale potekala izrazita plast kalkarenita debeline okoli 2,3 m, tanjše plasti kalkarenita pa so se pojavljale tudi na zahodnem predelu predora, in sicer debeline do 1 m. Vzдолž trase je prevladoval laporovec. Na podlagi geološke spremljave tekom izkopa predora je bilo povprečno razmerje med laporovcem in peščenjakom skupaj s kalkarenitom ok. 84 : 16. Opazovana debelina plasti laporovca se je spreminjala od nekaj centimetrov do 60 cm, plasti peščenjaka pa od nekaj centimetrov do 50 cm (Beguš et al., 2013).



Slika 4.49: Pogled na izkopno čelo v flišu leve predorske cevi predora Markovec na stacionaži km 0+252,4. Na izkopnem čelu so vidne plasti temno sivega laporovca in svetlo sivega peščenjaka. Nekatere debelejšje plasti peščenjaka so zmerno močno preperete in oksidirane.

Figure 4.49: Overview of the excavated face in flysch in the left tube of the Markovec tunnel at chainage km 0+252,4. The rock mass of the tunnel face consists of dark gray marlstone and light gray sandstone. Some thicker layers of sandstone are moderately weathered and oxidized.

Na podlagi spremljane plastnatosti smo ugotovili sinklinalno obliko v vzhodnem delu predora. Na vzhodnem portalu je plastnatost vpadala blago proti JZ (200–260/08-15), nato se je vpad plasti na dolžini okoli 100 m postopno zmanjšal, postal subhorizontalen, proti zahodu pa je nadalje vpadal blago proti SV (030-080/05-15). Traso predora so sekali trije sistemi prelomov, prvi sistem je vpadal srednje strmo proti SV (020-040/30-45), drugi sistem subhorizontalno proti SV (050-090/03-05) ter tretji sistem prelomov blago proti SJZ (190-200/25-50). Vzдолž

trase so se pojavljale tudi medplastne prekinitve kot kalcitne pole, debeline do 2 cm in vpadom subhorizontalno do položno proti SV (050-060/05-10).

Hribina je bila v splošnem razmeroma stabilna, z občasnimi prelomnimi conami, vzdolž katerih je bila razpokana, lokalno tudi pretrta in zaglinjena. Na podlagi predhodnih raziskav so bile za namen projektiranja izdvojene značilne inženirsko geološke enote (GT), in sicer na podlagi razmerja med laporovcem in peščenjakom ter stopnje tektonske poškodovanosti (Preglednica 4.16).

4.6.3 Izvedba meritev in rezultati

V predoru Markovec smo v sklopu geološke spremljave izkopa zaprosili naročnika za možnost izvedbe meritev s terestričnim laserskim skenerjem in s stereo fotogrametrijo. S pomočjo daljinskega zaznavanja smo želeli preveriti možnost določitve tako geološke sestave hribine na izkopnem čelu, določiti glavne vpade diskontinuitet in obenem izmeriti konvergenčne pomike primarne obloge predora. Zaradi izvajanja meritev v delovnem času smo bili časovno omejeni. V času meritev je potekal izkop predorskih cevi z rezkalnikom, čelo izkopa pa je bilo mokro zaradi prašenja med izkopom. Kombinacija izkopa z rezkanjem in umetnim vlaženjem sta predstavljala negativni vpliv na zajete geološke podatke in njihovo nadaljnjo analizo, saj je rezkanje zbrisalo strukturne značilnosti heterogene hribine, kot so diskontinuitete (plastnatost in razpoke). Zaradi sledi rezkanja so bile težko določljive tudi meje med laporovcem in peščenjakom.

Glede na to, da sem izvedla stereofotogrametrijo samo na enem izkopnem čelu, podajam v nadaljevanju primerjavo meritev na izkopnem čelu leve predorske cevi vzhodnega portala predora Markovec (stacionaža km 0+843,7).

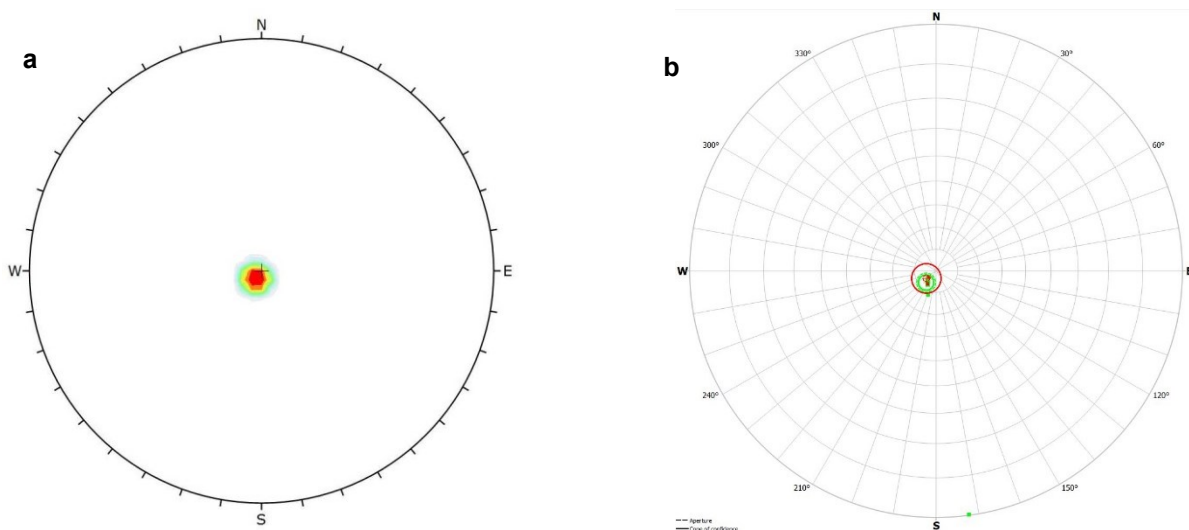
Preglednica 4.16: Pregled inženirsko geoloških lastnosti fliša, določenih na predoru Markovec (Beguš et al., 2013). Inženirsko-geološke enote (GT) so določene na podlagi značilnega razmerja med peščenjakom in laporovcem na območju Markovca, ki vpliva na vrednosti geomehanskih parametrov.

Table 4.16: Overview of engineering geological characteristics for flysch defined in the Markovec tunnel (Beguš et al., 2013). Engineering geological units (GT) are determined based on the percentage between sandstone and marlstone layers in the Markovec area, affecting the geomechanical parameters.

GT	Opis	Stopnja tektonske poškodovanosti	Razdalja med razpokami (mm)					Stanje razpok						RQD		GSI		RMR		Enoosna tlačna trdnost q_u [MPa]	Prost. teža γ [kN/m ³]	Youngov modul elast. E [MPa]	Strižni kot ϕ [°]	Kohezija c [kPa]
								Oblika			Hrapavost													
			200-600	60-200	20-60	6-20	< 6	ravna	stopničast	valovita	hrapava	gladka	zglajena	min	max	min	max	povp	razred					
1a	Fliš: L : P =	nizka	X	X				X	X		X	X		75	90	30	40	52	III	5 - 50	25	2300	24	1.08
1b	70% - 90% : 10% - 50%	srednja do visoka		X	X			X		X	X	X		25	50	25	35	32	IV	5 - 25	25	900	21	0.43
2a	Fliš: L : P = >	nizka		X				X	X		X	X		25	50	20	30	42	IV	5 - 25	24	900	20	0.4
2b	90% : < 10%	srednja do visoka			X	X		X		X	X	X		0	25	15	25	22	V-IV	1 - 10	24	400	19	0.12
3a	Tektonsko poškodovana hribina: razpokana, prertrta, kosi peščenjaka ali laporovca v peščeni / glinasti / meljasti osnovi	visoka do nerazpoznavna				X	X	X	X	X		X	X	0	25	15	20	14	V	1 - 5	22	300	17	0.1
3b	Tektonska breča in/ali zdrob	nerazpoznavna				X	X	X		X		X		0	25	0	< 15	13	V	1 - 5	22	220	15	0.08

4.6.4 Popis izkopnega čela

Vsako izkopno čelo, na katerem smo izvedli meritve, sem ročno inženirsko geološko popisala na podlagi uveljavljenega popisnega lista (Priloga 1). Izmerjene vpade diskontinuitet sem analizirala v programu Rocscience Dips in določila glavne sisteme diskontinuitet za primerjavo z rezultati terestričnega daljinskega zaznavanja (Slika 4.50 a). Na podlagi stereografske analize vpada diskontinuitet je bil izračunani povprečni vpad plastnatosti 034/05.



Slika 4.50: Izbrana primera analize vpadov plastnatosti v levi cevi vzhodnega portala predora Markovec (stacionaža km 0+843,7): a. Na podlagi geološkega popisa izkopnega čela v programu Dips je bil izračunan povprečni vpad 034/05; b. Na podlagi analize stereo fotogrametrije v programu ShapeMetriX 3D je bil izračunan povprečni vpad 040/07. Rezultata obeh meritev sta primerljiva.

Figure 4.50: The selected example of orientation analysis for bedding planes in the left tunnel tube on the Eastern portal of the Markovec tunnel (chainage km 0+843,7): a. Based on face logging of the excavated tunnel face in Dips the calculated average dip was 034/05; b. Based on the analysis of stereo photogrammetry in ShapeMetriX 3D the calculated average dip was 040/07. Results from both measurements are comparable.

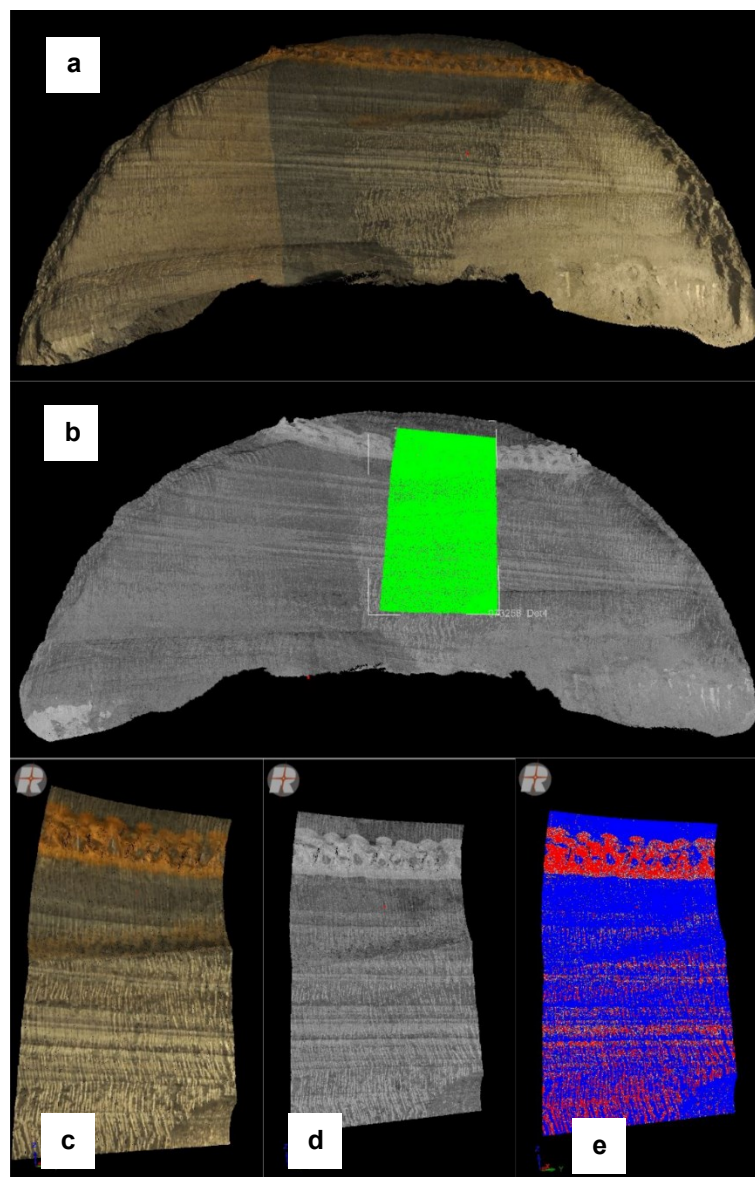
4.6.5 Analiza oblaka točk glede na litološko sestavo

Izkopna čela iz predora Markovec, ki so bila skenirana s TLS, sem obdelala in oblake točk georeferencirala v programu RiSCAN Pro. Lidarski oblak točk sem analizirala glede na litološko sestavo fliša s primerjavo vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka (TLS-RAW). V nadaljevanju predstavljam primer analize izkopnega čela leve predorske cevi vzhodnega portala predora Markovec (stacionaža km 0+746,2). Zaradi velikega števila podatkov (2.688.454 točk), ki predstavljajo lidarski oblak točk skeniranega izkopnega čela, sem možnost ločevanja posamezne litološke enote v flišu preverila na izbranem odseku (Slika 4.51). Na odseku oblaka točk sem ročno določila posamezne plasti in jih ločila glede na litološko sestavo:

plasti peščenjaka in plasti laporovca. Segmente sem določala vizualno in na podlagi popis izkopnega čela. V programu Matlab sem statistično analizirala izbrane segmente. Vključenih je bilo 119.646 vrednosti laporovca in 24.360 vrednosti peščenjaka.

Na histogramu (Slika 4.52 a) je predstavljena porazdelitev vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka za plasti peščenjaka in laporovca. Statistično analizo sem izvedla na vrednostih oblaka točk. Za preverbo razlik sem uporabila standardni t-test, stopnja značilnosti je bila nastavljena na $\alpha = 0,05$ (5 % stopnja zaupanja). Izračunana p-vrednost je bila pod 0,01, torej precej nižja od praga 0,05, kar pomeni, da lahko ničelno domnevo o enakih povprečjih zavrnamo, saj so skupine statistično različne. Iz histograma je razvidno, da so vrednosti intenzitete odboja za peščenjak sicer normalno porazdeljene, vendar precej razpotegnjene, kar je najverjetneje posledica upoštevanja tako nepreperlega kot preperlega peščenjaka. Porazdelitev vrednosti intenzitete odboja za laporovce je nekoliko asimetrična v desno, torej ima večina točk nizke vrednosti, pojavljajo pa se tudi točke z višjimi vrednostmi. Taka porazdelitev je najverjetneje posledica načina izkopa, ki poškoduje površino kamnine in so prave vrednosti zabrisane.

S škatlastim diagramom sem predstavila porazdelitev vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW glede na posamezne litološke enote (Slika 4.52 b). Ustvarjen je bil z razponom med spodnjim in zgornjim kvartilom skupaj z mediano (vodoravna linija znotraj škatle) ter najmanjšo in največjo vrednostjo intenzitete odboja. Na podlagi škatlastega diagrama so sicer opazne razlike med peščenjakom in laporovcem, vendar se delno prekrivajo. Značilne vrednosti intenzitete odboja so za laporovce med 0,035 in 0,038 (mediana 0,037), za peščenjake pa med 0,037 in 0,040 (mediana 0,038).

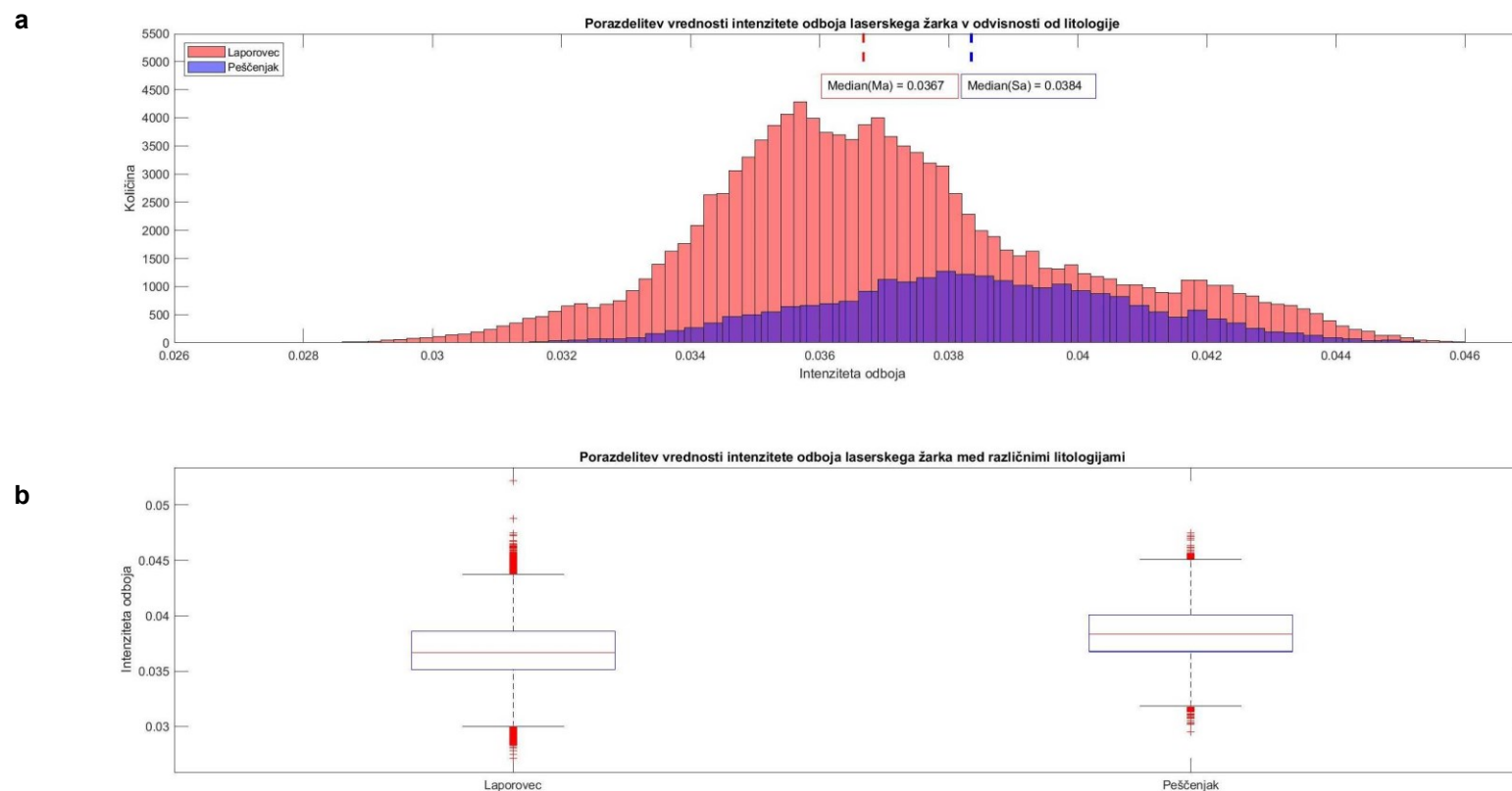


Slika 4.51: Primer analize oblaka točk izkopnega čela iz leve cevi vzhodnega portala predora Markovec (stacionaža km 0+746,2): a. Obarvan lidarski oblak točk z RGB vrednostmi izkopnega čela; b. Oblak točk izkopnega čela, predstavljen z vrednostmi intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka in izbranim območjem za analizo; c. Obarvan oblak detajla; d. Oblak točk detajla z vrednostmi Intenzitete odboja TLS-RAW; e. Izločene plasti peščenjaka v rdeči barvi (razpon vrednosti intenzitete odboja med 0,038 in 0,040) ter plasti laporovca v modri barvi. V spodnjem delu detajla so vidne napake pri izločitvi plasti peščenjaka, ki je posledica načina izkopa. Zaradi rezkanja je hribina spraskana in prava površina litologije ni vidna. Predel ni bil omočen, zato so višje vrednosti intenzitete vezane na sledi rezkanja (navpične sledi).

Figure 4.51: Example of the point cloud analysis from the excavated face of the left tube from the Eastern portal of the Markovec tunnel (chainage km 0+746,2): a. Coloured lidar point cloud with RGB of the tunnel face; b. Point cloud of the tunnel face presented with TLS-RAW intensity values and included analysed detail; c. Coloured detailed point cloud; d. Point cloud of the detail with TLS-RAW intensity values; e. Extraction of sandstone layers in red (intensity values ranging from 0,038 to 0,040) and marlstone layers in blue. The errors for the extracted sandstone layers can be seen in the lower part. The error is caused by the excavation method. As the road header has been used it causes a scratched surface. Therefore, the original lithology cannot be seen. Also, the area is not wet, causing higher intensity values related to scratching (vertical traces).

Glede na to, da se vrednosti intenzitete odboja za plasti peščenjaka in laporovca prekrivajo, sem za preverbo uporabila vrednosti med mediano in zgornjim kvartilom (0,038-0,040). Slika 4.51 e predstavlja rezultate določenih plasti peščenjaka v rdeči barvi ter plasti laporovca v modri barvi. Plast peščenjaka smo je v zgornjem delu detajla v celoti izločili. Ker gre za preperel in oksidiran peščenjak, so vrednosti intenzitete odboja višje, zato je tudi razlika z nižjimi vrednostmi laporovca bolj izrazita. Z uporabljenim razponom so se izločile tudi zelo tanke plasti peščenjaka, z ocenjeno debelino med 2 in 6 cm. Na podlagi rezultatov lahko sklepamo, da je pristop uporaben tudi pri tankoplastnatih hribinah, s plastnatostjo od 2 cm dalje. V spodnjem delu detajla pa so razlike med vrednostmi neizrazite zaradi načina izkopa. Postopek rezkanja poškoduje površino hribine, zato je hribina spraskana in prava površina litologije ni vidna. Predel tudi ni bil omočen, zato so višje vrednosti intenzitete vezane na sledi rezkanja, saj ima suha površina višje vrednosti od nižjih, ki je posledica delne absorpcije valovnih dolžin laserskega žarka.

Rezultati kažejo, da s terestričnim laserskim skeniranjem lahko ločimo različne litološke člene med seboj tudi v primeru tankoplastnatega fliša z debelinami plasti, večjimi od 2 cm. Možnost ločevanja med litološkimi enotami je pri raziskavah v inženirski geologiji pomembna, saj lahko olajša geološke popise izdankov in izkopnih čel. Na osnovi rezultatov analize vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW lahko natančneje določimo razmerje med laporovcem in peščenjakom in upoštevamo pri karakterizaciji fliša ter geotehničnem projektiranju objektov.



Slika 4.52: Predstavitev porazdelitve vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka: a Histogram porazdelitve na izbranem izkopsnem čelu v predoru Markovec za laporovce z mediano 0,036 (rdeča črtkana črta) in peščenjake z mediano 0,038 (modra črtkana črta), ovrednotenih iz opazovanega profila; b Porazdelitev vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW za laporovce (levo) in peščenjake (desno) s škatlastim diagramom. Pravokotna škatla predstavlja razpon med spodnjim in zgornjim kvartilom skupaj z mediano, osamelci (najmanjša in največja vrednost) pa razpon celotne množice podatkov.

Figure 4.52 Distribution of TLS-RAW intensity values: a Histogram showing the distribution of TLS-RAW intensity values for selected face in the Markovec tunnel for marlstones with a median value of 0,036 (red dashed line) and sandstones with a median value of 0,038 (blue dashed line), evaluated from the investigated profile; b Distribution of TLS-RAW intensity values for marlstones (left) and sandstones (right) presented with box plots. The box represents the lower and upper quartiles as the outline, along with a median value. The outliers show values above the third quartile or values below the first quartile.

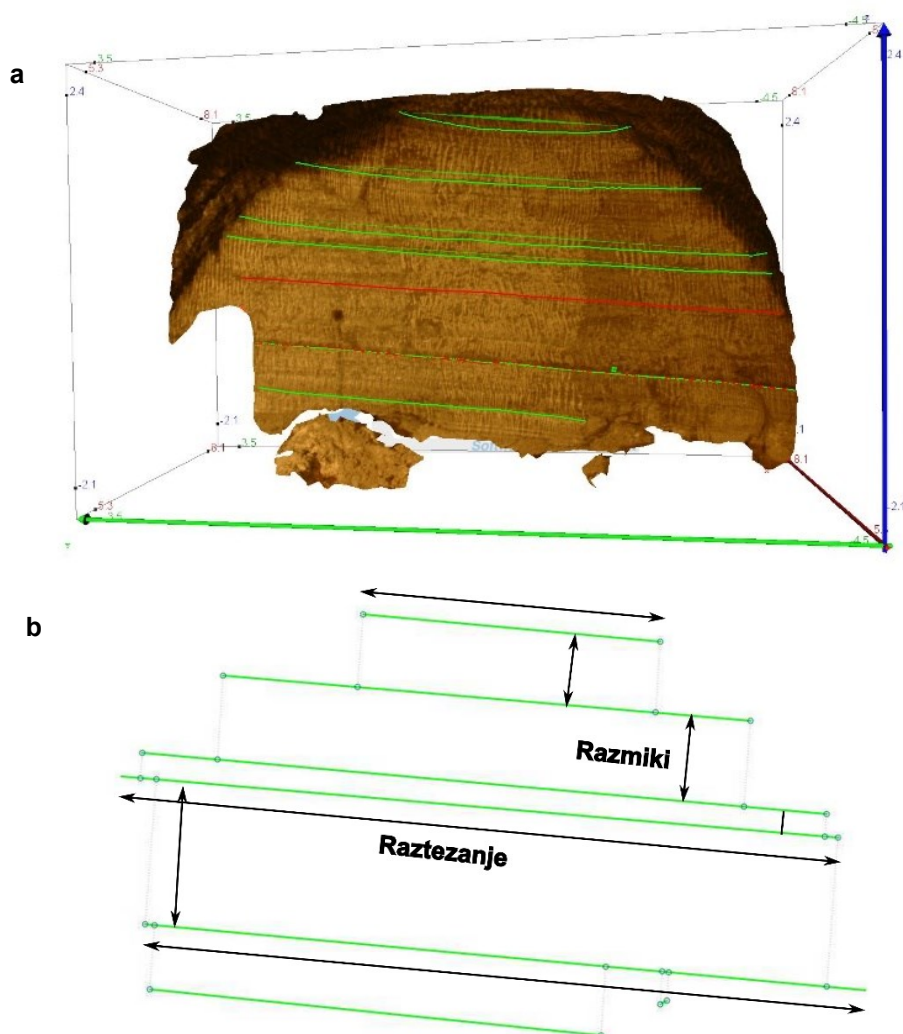
4.6.6 Analiza geometrije diskontinuitet

Z analizo geometrije smo želeli preveriti uporabo terestričnega laserskega skeniranja in fotogrametrije pri določanju parametrov diskontinuitet, ki predstavljajo pomemben člen klasifikacije hribine po sistemu RMR (Bieniawski, 1989).

Pri pregledu oblakov točk iz TLS sem ugotovila, da je zaradi tankih plasti fliša in izkopne metode z rezkalnikom, ki rezka površino hribine, težko izločiti diskontinuitete, saj je bila površina čela razmeroma ravna, izrazite so bile tudi sledi rezkanja, ki so zabrisale tako litološke kot strukturne značilnosti.

Na izkopnem čelu vzhodnega portala predora Markovec (stacionaža km 0+843,7) sem v programu ShapeMetriX 3D digitalno popisala plastnatost, vendar določanje poteka diskontinuitet iz 3D modela ni bilo enostavno, predvsem zaradi razmeroma ravne površine, ki je posledica izkopa z rezkanjem (Slika 4.53 a). Glede na to, da je bil zajet tudi bočni del izkopnega čela, je program uspel sestaviti 3D ploskev iz poteka linij, da sem lahko naredila nadaljnjo statistično analizo (Slika 4.53 b). Zaradi slabe strukturiranosti čela je bilo oteženo tudi določanje poteka ploskev tanjših plasti (med 2 in 6 cm). Na podlagi stereografske analize je bil izračunan povprečni vpad plastnatosti 040/07 (Slika 4.51 b), rezultati so zelo primerljivi z ročnim popisom (Slika 4.51 a). Na obravnavanem izkopnem čelu so plasti vpadale subhorizontalno proti SV (040-052/05-07). Razmiki med diskontinuitetami so znašali med 25 cm in 1,60 m (povprečje 0,76 m). Povprečna dolžina plasti je bila 5,2 m.

Pri določanju parametrov iz oblaka točk TLS in 3D modela iz stereofotogrametrije nisem uspela določiti hrapavosti, odprtosti in zapolnitve razpok. Izkop predora Markovec se je zaradi prevladujočega deleža laporovca, ki predstavlja srednje trdno kamnino, izvajal z rezkanjem hribine. Negativna posledica rezkanja je praktično izbris strukturiranosti hribine, zato je določitev tipov diskontinuitet in njihovih parametrov praktično nemogoča, razen pri izločitvi njihove orientacije s pomočjo sledenja linij robov diskontinuitet v bokih in kroni (stropu) kalote.



Slika 4.53: Analiziran 3D model izkopnega čela leve cevi vzhodnega portala predora Markovec (stacionaža km 0+843,7) v programu ShapeMetriX 3D: a. Digitalni popis izkopnega čela z označenimi diskontinuitetami, ki predstavljajo plastnatost; b. Geometrijska analiza diskontinuitet, na podlagi katerih se oceni značilni razmik med diskontinuitetami in njihovo dolžino. Dobljene podatke lahko uporabimo pri oceni parametrov za sistem klasifikacije RMR.

Figure 4.53: Analysis of the 3D model from the face of the left tunnel tube on the eastern portal of the Markovec tunnel (chainage km 0+843,7) in ShapeMetriX 3D: a. Digital face logging with logged discontinuities representing bedding planes; b. Geometrical analysis of discontinuities, based on which the spacing and persistence is estimated. Findings of the analysis can be used for the estimation of parameters for the RMR classification system.

4.6.7 Karakterizacija fliša po sistemu klasifikacije RMR

Pri klasifikaciji hribine na izkopnem čelu po sistemu klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989) sem iz rezultatov TLS in stereofotogrametrije ShapeMetriX 3D lahko ocenila delež med laporovcem in peščenjakom in določila prevladujočo enoosno tlačno trdnost (A1) na podlagi analize odboja laserskega žarka. Glede na to, da so prevladovale vrednosti za laporovec, sem uporabila povprečno enoosno tlačno trdnost iz laboratorijskih preiskav. Parameter, ki določa kvaliteto vrtnanja na jedro RQD (A2), lahko ocenimo iz rezultatov intenzitete odboja, s katerimi določimo delež med litološkimi enotami in izvlečka glede gostote diskontinuitet iz fotogrametričnega 3D modela.

Parametre diskontinuitet sem določila iz 3D modela, pri čemer sem uporabila podatke o razmiku med diskontinuitetami (A3) in raztezanju (A4.1), medtem ko sem izmerjen vpad diskontinuitet s prevladujočo plastnatostjo, upoštevala pri korekciji zaradi vpada diskontinuitet v predorih (B). Ostale parametre sem ocenila na podlagi pregleda 3D modela in oblaka točk. Izračunana vrednost RMR znaša 53 in sodi v razred zadovoljive hribine (III). Izračunane vrednosti RMR so iz ročnega geološkega popisa ter digitalnega geološkega popisa primerljivi (Preglednica 4.17).

Preglednica 4.17: Primerjava karakterizacije hribine na izkopnem leve cevi vzhodnega portala predora Markovec (stacionaža km 0+843,7) na podlagi sistema klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989) iz ročnega popisa ter digitalnega popisa s pomočjo programa ShapeMetriX 3D.

Table 4.17: Comparison between characterization of rock mass on the excavated face of the left tunnel tube on the eastern portal of the Markovec tunnel (chainage km 0+843,7) based on the classification system RMR (Bieniawski, 1989) from manual face logging and digital face logging using the software ShapeMetriX 3D.

Meritev	A1	A2	A3	A4.1	A4.2	A4.3	A4.4	A4.5	A5	B	RMR
Ročni popis	4	8	15	2	1	0	2	6	15	5	48 (III)
ShapeMetriX 3D	3*	8*	10	2	5*	5*	5*	5	15	5	53 (III)

* Vrednosti, ki so bile ocenjene in ne izmerjene iz 3D modela.

* Values which were estimated instead of measured from the 3D model.

4.6.8 Razprava

4.6.8.1 Določitev litologije, stopnje preperevanja in stopnje vlažnosti

Uporaba intenzitete odboja laserskega žarka iz meritev s terestričnim laserskim skenerjem se je na izkopnih čelih predora Markovec pri določanju litologije, stopnje preperevanja in stopnje vlažnosti v tankoplastnatem flišu, izkazala kot delno zanesljiva metoda. Analizirala sem nepreperene plasti peščenjaka in laporovca ter plast močno preperelega in oksidiranega peščenjaka. Rezultati analize vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka (Slika 4.52) kažejo na razlike med posameznimi litološkimi enotami, vendar se delno prekrivajo.

Na vrednost intenzitete odboja laserskega žarka najbolj vplivajo odsevne sposobnosti skeniranega materiala, ki so odvisne od mineralne sestave in velikosti zrn. Izkopna čela, ki so bila skenirana, so se izvajala v flišu, s prevladujočim deležem laporovca nad peščenjakom (90 % : 10 %). Za fliš je sicer značilna cikličnost menjavanja plasti laporovca, peščenjaka in včasih glinavca, vendar najdemo zaradi različnih faz sedimentacije v globokem morju, peščenjake različne zrnivosti ter prehodne kamnine med laporovcem in peščenjakom. Razlike med vrednostmi TLS-RAW so lahko statistično značilne za posamezne litološke enote, kot sta laporovec in peščenjak, vendar moramo predpostavljati tudi možnost skeniranja plasti kamnin z vmesno sestavo ali s postopnim prehodom zrnivosti znotraj plasti kamnine. Pri določanju litologije iz oblaka točk moramo upoštevati tudi debelino plasti, ki je bila pri ročnem zajemu ocenjena med 2 cm in 20 cm. Pri tankoplastnatih heterogenih hribinah subjektivno določamo litološke enote, saj težje ločimo kamnine vmesne sestave. Vrednost intenzitete odboja je odvisna tudi od izbrane ločljivosti skeniranja ter oddaljenosti od izkopnega čela, zato moramo upoštevati morebitno disperzijo laserskega žarka, kar potencialno vpliva na zabeleženo vrednost intenzitete odboja laserskega žarka in posledično na rezultat. Že Burton et al. (2011) so na podlagi terestričnega laserskega skeniranja tankoplastnate heterogene hribine opazili, da obstajajo razlike med intenziteto odboja za peščenjake in skrilave glinavce, vendar jih nadalje niso ločevali v skupine oziroma litološke enote. Franceschi et al. (2009) so izvedli podobne meritve na laporovcu in apnencu, Humair et al. (2015) pa so primerjali odvisnost intenzitete odboja za ločevanje med apnencem, laporovcem in muljevcem. Za razliko od tukaj obravnavanega tankoplastnatega fliša so bili njihovi obravnavani izdanki debeloplastnati, z jasno izraženimi strukturami, ki so omogočale razločevanje med litološkimi enotami. Kot nadgradnja predhodnih raziskav (Burton et al., 2011; Franceschi et al., 2009; Humair et al., 2015) lahko iz rezultatov analize oblaka točk kamnoloma Markovec sklepam, da je pristop s

pomočjo vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka (Slika 4.45 e) možno razločevati tudi med litološkimi enotami debeline od 2 cm dalje.

Pri skeniranju izkopnih čel v predoru Markovec so na izmerjene vrednosti intenzitete odboja intenzitete odboja laserskega žarka vplivali slabi atmosferski pogoji vzdolž celotnega izkopanega območja, kot sta višja temperatura zaradi zadrževanja gradbene mehanizacije in velika obremenjenost s trdnimi delci, s povečanim vplivom na samem izkopnem čelu. Pri meritvah v podzemnih izkopih bi bilo potrebno dodatno izmeriti obremenjenost s trdnimi delci in njihovim vplivom na rezultat 3D laserskega skeniranja. Na podlagi izmerjenih povišanih temperatur na območju izkopa bi morali dodatno analizirati vpliv na vrednost intenzitete odboja TLS-RAW ter določiti parametre vpliva za korekcijo vrednosti. Največji vpliv na kakovost rezultatov je imela metoda izkopa, ki se je izvajala z rezkanjem hribine. Na izkopnem čelu hribine so prevladovala navpične sledi rezkanja, ki so izkazovale višje vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka. Nasprotno pa so čelo izkopa zaradi prašenja umetno vlažili, zato je bilo želo v večjem delu mokro in posledično so bile vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka nižje. Zaradi izkopne metode pa so izkazovale navpične sledi rezkanja vrednosti, ki so bile določene za plasti suhega peščenjaka, tudi na območjih plasti laporovca. Pri izvedbi meritev izkopnega čela s terestričnim laserskim skenerjem moramo biti pozorni zato na metodo izkopa, ki lahko pomembno vpliva na vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka. Z investitorjem in izvajalcem izkopnih del se moramo zato dogovoriti glede vlaženja hribine ob končanem izkopu, saj vpliva na skupne vrednosti in onemogoča razločevanje litoloških enot.

4.6.8.2 Določitev geometrije diskontinuitet

Pri določitvi geometrije diskontinuitet na izkopnem čelu predora Markovec so bili rezultati stereofotogrametrije s programom ShapeMetriX 3D zanesljivejši od rezultatov terestričnega laserskega skeniranja. Uporabljena izkopna metoda z rezkanjem hribine predstavlja neugodno metodo izkopa z vidika inženirsko geološke spremljave, saj so strukture nejasno izražene, kar zmanjšuje možnost ekstrakcije glavnih sistemov diskontinuitet, njihovih izmere ter ocen njihovih parametrov.

Pri obdelavi oblaka točk iz terestričnega laserskega skeniranja nisem uspela določiti glavnih tipov diskontinuitet zaradi neizraženih struktur. Subhorizontalna lega plasti povzroči, da jih na modelu vidimo kot linije oziroma sledi, ki jih na oblaku točk težko določimo. Zaradi velikokrat kratke dolžine izkopnega koraka (med 0,6 m in 1,5 m) pa predstavlja problem tudi določitev ploskev diskontinuitet v prostoru (pojav cenzuriranja in krajšanja). Šele z obdelavo fotogrametričnega 3D modela v programu ShapeMetriX 3D sem lahko sledila linijam, ki

predstavljajo meje plasti, iz katerih je program lahko rekonstruiral lego obravnavane diskontinuitete, posebno če je bil v izkopnem čelu viden tudi bočni del. Zaradi neizražene strukture sem lahko določila zgolj nekatere plasti in njihovo orientacijo, saj je prepoznavanje meje med plastmi manjše debeline dodaten izziv.

S programom ShapeMetriX 3D sem na osnovi določenih ploskev in linij potekov diskontinuitet, rezultate statistično analizirala ter podala glavne sisteme izbranih tipov diskontinuitet, njihove dolžine in razmike med diskontinuitetami istega sistema, ki sem lahko uporabila pri klasifikaciji hribine (Slika 4.53).

Metoda izkopa, ki zabriše strukturiranost hribine, posledično pomembno vpliva na objektivne meritve parametrov diskontinuitet, ki zahtevajo dodatne vhodne vložke s strani inženirskega geologa. Glede na to, da je cilj geološke spremljave doseči objektivno interpretacijo, postane pri takem postopku ponovno subjektivna, saj je odvisna od sposobnosti razločevanja med diskontinuitetami in posameznimi plastmi. Kot rezultat dobimo statistično neznačilne in nezanesljive parametre tistih glavnih diskontinuitet, ki vizualno izstopajo iz čela.

4.6.8.3 Karakterizacija fliša po sistemu klasifikacije RMR

Za karakterizacijo fliša so rezultati terestričnega laserskega skeniranja in stereofotogrametrije s programom ShapeMetriX 3D pomembni, vendar so v primeru predora Markovec zaradi metode izkopa in posledično subjektivne interpretacije, nezanesljivi.

Analiza vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka je potrdila rezultate geološke spremljave, da prevladuje delež laporovca nad peščenjakom, vendar so sledi rezkanja vplivale tako na vrednosti, kot tudi na empirično preverbo, zato nisem mogla z gotovostjo izračunati deleža posamezne litološke enote, ki bi jih uporabila pri izračunu uteženega povprečja za določitev enosne tlačne trdnosti hribine (A1).

Rezultati stereofotogrametrije s programom ShapeMetriX 3D pomembno prispevajo k analizi glavnih diskontinuitet, njihove orientacije in parametrov, čeprav v primeru metode izkopa z rezkanjem hribine le-te niso zanesljive, saj so vezane na sposobnost geologa, da prepozna glavne tipe diskontinuitet ter njihov potek in so posledično subjektivno določene.

H klasifikaciji parametrov, ki opisujejo stanje diskontinuitet, pomembno prispevajo rezultati stereofotogrametrije, iz katerih sem določila prepoznavne diskontinuitete. Program je podatke

avtomatsko statistično analiziral in določil razpone vrednosti za dolžine posameznih sistemov diskontinuitet (A4.1). Podobno kot pri razmikih med diskontinuitetami (A3), so bile le-te subjektivno določene. Ostalih parametrov (odprtost diskontinuitet, polnitev in hrapavost), ki opisujejo pogoje diskontinuitet, pa zaradi metode izkopa nisem mogla določiti, temveč sem jih lahko ocenila na podlagi izkušenj tekom geološke spremljave.

Iz rezultatov analize vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka sem na podlagi empirične preverbe določila glavne razpone vrednosti, ki opisujejo stopnjo preperelosti (A4.5) ter dotok vode (A.5). Rezultati so bili zaradi metode izkopa, ki zabriše sestavo in prvotno strukturo hribine, subjektivno in nezanesljivo določeni.

Rezultati terestričnega laserskega skeniranja in stereofotogrametrije so, kljub neustrezni izkopni metodi z rezkanjem hribine, pomembno prispevali k izboru vrednosti parametrov sistema klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989). Izkopno čelo, ki je digitalno zajeto, predstavlja hribino z litološko sestavo in površino, ki ga zaradi izkopa več ni. Na podlagi meritev s TLS in bližnjelikovne fotogrametrije lahko gradimo bazo podatkov za prihodnost. Rezultate lahko v pisarni detajlno večkrat pregledamo, saj nismo časovno omejeni s potekom izkopnih del in razvijamo nove algoritme prepoznavanja za različne namene.

4.7 Vključevanje bližnjelikovne fotogrametrije in terestričnega laserskega skeniranja v proces inženirsko-geološke spremljave

Inženirsko-geološko kartiranje in spremljava izkopnih del predstavljata osnovo pri zajemu in analizi geoloških podatkov obravnavanega območja za nadaljnje projektiranje stabilnosti in varovanja izkopnih brežin ter določevanja podpornih ukrepov pri podzemnih izkopih.

Popis izkopnega čela je uveljavljen z ročnim zajemom podatkov. Poleg določitve litologije so v inženirski geologiji pomembne meritve lastnosti diskontinuitet, kot so plastnatost, razpoke, prelomi, idr. Izris izdanka ali izkopnega čela poteka ročno na papirju, meritve diskontinuitet pa se izvajajo z geološkim kompasom in merskim trakom. Pri geološkem kartiranju oddaljenih izdankov je dostop velikokrat omejen ali nevaren, zato so onemogočene ročne meritve. Geolog mora v takem primeru na podlagi izkušenj oceniti glavne litološke značilnosti in parametre diskontinuitet. Podobno velja tudi pri inženirsko-geološki spremljavi podzemnih izkopnih čel, kjer je iz varnostnih razlogov prepovedan dostop na izkopno čelo in izvedbo meritev, vprašljive pa so tudi meritve vpadov z geološkim kompasom, zaradi vgrajenih podpornih ukrepov z jeklenimi loki in armaturnimi mrežami ter večjega števila gradbene mehanizacije. Ročni zajem

diskontinuitet sicer omogoča razlikovanje med različnimi tipi diskontinuitet ter zmanjšuje možnost napačnih meritev, saj geolog sproti preverja izmerjene meritve ter interpretira glavne strukturne značilnosti obravnavanega območja. Za ročne meritve potrebujemo dlje časa, obenem pa lahko izvedemo manjše število meritev, ki so v primeru nedostopnih izdankov oz. izkopnih čel ocenjene. Ročni popisi so tudi bolj subjektivni, saj vsak geolog popiše obravnavano čelo drugače. Ob tem je treba upoštevati dejstvo, da je z izkopom izgubljena vsaka informacija, zato ponovna preverba podatkov ni več mogoča. Podatke po končanem terenskem delu digitaliziramo, pri čemer lahko pride do dodatne izgube pomembnih informacij in porabe časa. Pomanjkljivosti ročnega zajema podatkov pa se najbolj odražajo pri nadaljnjih analizah in interpretacijah inženirsko-geoloških razmer na območju obravnave.

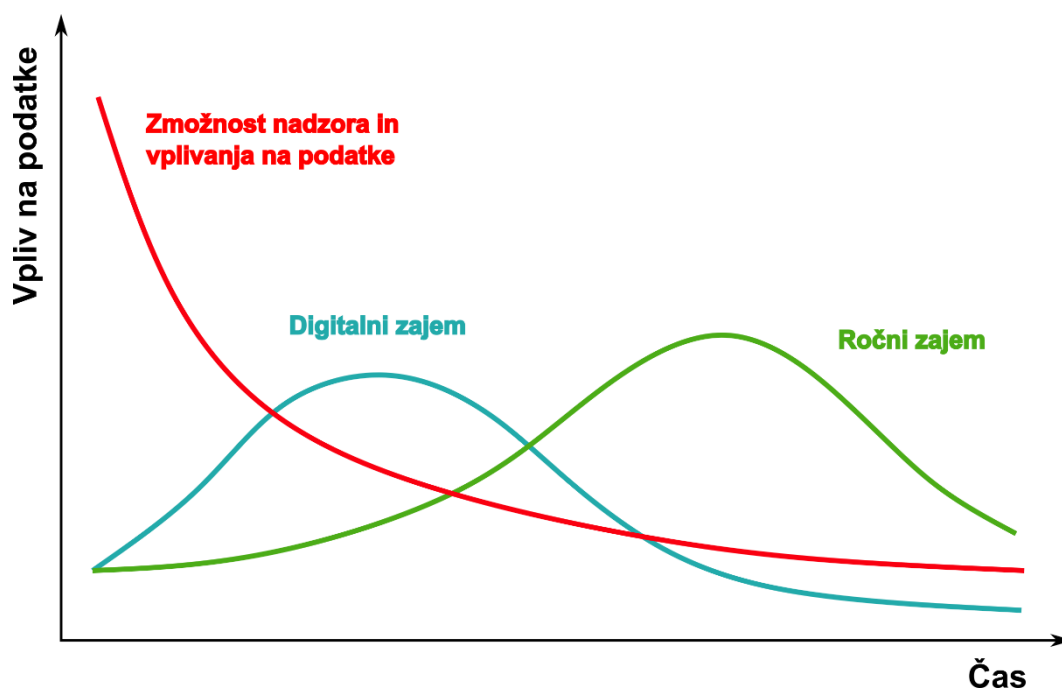
Terestrično lasersko skeniranje in bližnjelikovna fotogrametrija se v zadnjih letih vedno bolj uveljavljata na področju gradbeništva in geotehnike, ker prinaša pomembne prednosti, kot so:

- objektivnost zajetih podatkov,
- možnost ponovne preverbe razmer in naknadne reinterpreteracije,
- zavarovanje dokazov,
- digitalizacija in posledično možnost napredne analize v okviru umetne inteligence oz. strojnega učenja,
- enostavna in hitra komunikacija med različnimi deležniki na delovišču.

Pri geološki spremljavi je vključevanje terestričnega laserskega skeniranja in bližnjelikovne fotogrametrije trenutno še v začetni fazi razvoja, vendar potekajo tudi na tem področju intenzivne raziskave, ki so pomembne za nadaljnji razvoj v zastavljeni smeri. Tako v Sloveniji, kot v tujini se pri razpisih za podzemne gradnje že vključuje tudi zajem izkopnih čel in vseh slojev obloge z bližnjelikovno fotogrametrijo oz. terestričnim laserskim skeniranjem. Na podlagi izvedenih meritev v času aktivnih izkopnih del, ki smo jih izvedli v predoru Markovec, podzemni garaži Park San Giusto ter v kamnolomu Elerji, smo pridobili pomembne izkušnje glede možnosti vključevanja predstavljenih TLS in bližnjelikovne fotogrametrije v proces inženirsko-geološke spremljave, časovnega okvirja izvedbe meritev ter zahtev, ki so potrebne za zagotovitev kakovostnih podatkov za nadaljnje analize. V sklopu meritev smo preverili tudi zajem podatkov s cenovno ugodnejšim 3D laserskim skenerjem ter pametnim telefonom. Na podlagi rezultatov analize smo pokazali, da je kakovost dobljenih oblakov točk zadovoljiva, vendar v primeru, ko je zagotovljena natančna geometrija, ki se jo lahko preveri. Digitalno zajeti podatki s TLS in bližnjelikovno fotogrametrijo so georeferencirani, natančni in jih lahko vključimo v podatkovne baze, zato je tudi možnost izgube informacij manjša. Po končanih

meritvah jih lahko ponovno in natančno pregledamo ter analiziramo predvsem geometrijske lastnosti diskontinuitet ter reinterpretiramo strukturno-geološke razmere na obravnavanem območju.

Pomen digitalnega zajema geoloških podatkov v sklopu inženirsko-geološke spremljave prikazuje Slika 4.54.



Slika 4.54: Razlike med ročnim in digitalnim zajemom geoloških podatkov glede na zmožnost nadzora in vplivanja nanje v sklopu inženirsko-geološkega dela. Iz krivulje je razvidna pomembnost dela na podatkih v zgodnjih fazah načrtovanja, ko so še možne spremembe.

Figure 4.54: Differences between manual and digital data acquisition in relation to the ability to control and impact on data during engineering geological work. The curve shows the importance of working on data in early stages of planning, when changes are still possible.

Podatki so v geologiji osnova za interpretacijo geoloških, strukturnih in geomehanskih značilnosti obravnavanega območja ter razumevanje obnašanja tal pri gradbenih posegih. Zajem in njihova obdelava še nista v celoti digitalizirana, vendar se prednosti digitalizacije postopka že vključujejo v tekoče aktivnosti geologa. Digitalnemu zajemu podatkov je v začetni fazi (priprava podatkov in popis izdankov ter izkopnih čel) potrebno sicer posvetiti več časa in dela, da so podatki ustrezno georeferencirani in v pravi obliki za nadaljnje analize in interpretacijo. V tem času pa lahko še veliko vplivamo na same podatke, njihov obseg, postopek zajema in obliko podatkov. Na podlagi dobro zasnovanega programa zajemanja podatkov, se pozitivni rezultati digitalizacije pokažejo tudi pri kasnejši obdelavi in interpretaciji ter pripravi dokumentacije za predajo. Postopek je zaradi dela v digitalnem okolju hitrejši. Razvoj digitalnega zajema podatkov že omogoča, da posnamemo težko dostopna območja,

kot so oddaljeni izdanki ter izkopna območja, kjer je iz varnostnih razlogov omejen dostop (npr. kamnolomi, podzemni izkopi, idr.). Obdelava digitalnih podatkov je hitrejša, zato se geolog lahko posveti razumevanju podatkov in njihovi interpretaciji v 3D okolju, obenem pa je vključevanje digitalnih podatkov med različnimi deležniki v različnih fazah projekta bolj učinkovito, saj se postopki in komunikacije med različnimi programi nadgrajujejo. Ustaljeno projektiranje se z digitalizacijo aktivnosti seli v 3D okolje, z namenom skupnega projektiranja objektov v enotnem sistemu računalniških modelov. Delo v 3D okolju olajša vizualizacijo 3D modelov, interpretacijo strukturno-geoloških značilnosti in inženirsko-geoloških razmer, omogoča analizo podatkov in zmanjšuje možnost izgube informacij. Nasprotno pa pri ročnem zajemu podatkov prihranimo čas za aktivnosti v začetni fazi dela, ko bi morali največ vlagati v njihovo kakovost. Popis izkopnega čela je predvsem shematski in zanj sicer potrebujemo približno enako časa kot pri digitalnem zajemu podatkov (10 do 15 minut), pri čemer ne moremo izvesti meritev na težko dostopnih in nevarnih območjih, popisi so subjektivni in jih po izkopih ne moremo več ponoviti ter v kasnejši fazi ponovno analizirati. Postopek ročnega zajema pokaže pomanjkljivosti in omejen obseg šele v kasnejši fazi, ko ne moremo več vplivati na podatke, nov zajem je cenovno dražji, pri izkopnih delih pa preverba geoloških razmer ni več možna. Zaradi ročnega izrisa in meritev je nadaljnjim aktivnostim potrebno nameniti več časa za obdelavo, digitalizacijo in pripravo v ustrezne oblike za analize.

Osnovni namen vključevanja TLS in bližnjleslikovne fotogrametrije v delo inženirskega geologa je skrajšanje časa meritev, izboljšanje natančnosti in objektivnosti zajetih podatkov ter njihovo preverbo. Na podlagi izvedenih analiz v sklopu disertacije smo dobili zadovoljive rezultate pri zajemu podatkov z bližnjleslikovno fotogrametrijo in TLS. Rezultati meritev med drugim predstavljajo osnovo pri podpori določanja tehničnih specifikacij, pri čemer so pomembni dobro zastavljeni cilji, na podlagi katerih je odvisna uspešnost detekcije zajetih podatkov. Naročnik pa mora biti pri tem realen in ne sme pričakovati nemogočih stvari, obenem pa se zavedati, da se z razvojem možnosti vsako leto razširjajo in skladno s tem je potrebno tudi nadaljnje razpise ustrezno nadgrajevati.

5 ZAKLJUČKI

V doktorski disertaciji sem preučila primerjavo med uveljavljenim inženirsko-geološkim kartiranjem fliša in novejšimi, v inženirski geologiji še ne povsem uveljavljenimi metodami terestričnega laserskega skeniranja (TLS) ter bližnjelikovne fotogrametrije. Namen naloge je bil kvantitativno opredeliti uporabo slednjih meritev izbranih metod terestričnega daljinskega zaznavanja pri geološki spremljavi izkopov in karakterizaciji inženirsko-geoloških lastnosti fliša. Fliš predstavlja heterogeno menjavanje predvsem dveh litoloških členov: laporovca in peščenjaka (občasno tudi z vmesnimi plastmi apnenčastih turbiditov, ki pa se na obravnavanem območju niso pojavljale), zato je problematičen z vidika primerjave različnih metod in predvsem inženirsko-geološke klasifikacije, kar je predstavljalo raziskovalni izziv v sami nalogi. S TLS sem izdelala lidarski 3D oblak točk, ki sem ga nadalje uporabila za analizo geometrije diskontinuitet, uporabila pa sem tudi vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka za določitev litologije in primerjave z mineraloško sestavo kamnin. Z uporabo bližnjelikovne fotogrametrije sem izdelala fotogrametrični 3D model ter preučila geometrijo diskontinuitet, vse z namenom preverbe parametrov, ki se uporabljajo v inženirsko-geološki klasifikaciji RMR.

Meritve v flišu sem izvedla na treh izbranih lokacijah: bistvene meritve z največ izvedenimi raziskavami so potekale v kamnolomu Elerji pri Škofijah, druga lokacija je bila predor Markovec med Koprom in Izolo ter tretja podzemna garaža Park San Giusto v Trstu. Na vseh lokacijah se pojavlja eocenski fliš, ki pa ima drugačno razmerje laporovca in peščenjaka, je različno tektonsko poškodovan, poleg tega pa so na meritve vplivali tudi delovni pogoji, kot je razloženo v nadaljevanju.

V nadaljevanju podajam glavne ugotovitve in na koncu predloge nadaljnjih raziskav.

Detajlna analiza odvzetih vzorcev laporovca in peščenjaka v flišu z analizo intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka, ki sem jo izvedla pri različnih razdaljah skeniranja (med 5 m in 25 m), pri različnih stopnjah vlažnosti (suhi, vlažni in mokri vzorci) in pri različnih stopnjah preperevanja (nepreperene kamnine, preperene kamnine in močno preperene kamnine do preperine) je pokazala, da so intenzitete odboja najvišje pri razdaljah skeniranja okoli 10 m, ter da obstajajo statistično značilne razlike tako med obema litologijama, med različnimi stopnjami vlažnosti in med različnimi stopnjami preperevanja. Čeprav se histogrami rezultatov delno prekrivajo, so vse skupine med seboj statistično značilne, tako da je metoda uporabe intenzitete odboja TLS-RAW uporabna za določanje stopnje preperevanja in vlažnosti obeh kamnin.

Za pravilno umeščanje analiziranih podatkov v prostor in za pravilno in natančno izdelavo fotogrametričnih 3D modelov sem s programom Agisoft Metashape testirala različne velikosti kodiranih tarč, ki jih programi avtomatsko prepoznavajo in služijo kot oslonilne točke, zato mora biti tarča natančno in pravilno prepoznana. Testirala sem 12-bitne krožne tarče z velikostjo polmera središčnega kroga med 10 mm in 30 mm, na razdaljah med 2 m in 30 m. Rezultati so pokazali, da je prepoznanih največ tistih tarč z velikostjo polmera središčnega kroga 15 mm in 20 mm. Pri večjih razdaljah snemanja tarč do velikosti 15 mm pričakovano ni možno prepoznati, težave pri prepoznavanju pa so bile tudi pri detekciji največjih tarč na najkrajših snemalnih razdaljah. Uporabila sem tudi različne objektivne in ugotovila, da so uporabni tako objektivni s fiksno goriščno razdaljo kot tudi objektivni s spremenljivo goriščno razdaljo (zoom objektivni), pri čemer se goriščna razdalja pri slednjih ne sme spreminjati v sklopu istega snemanja. Vrednost zaslonke in čas osvetlitve nimata pomembnega vpliva. Odločilni dejavniki za natančnost fotogrametričnega oblaka točk in 3D modela predstavlja velikost tarče na sliki, ki je odvisna od formata fotografije, goriščne razdalje objektivna in oddaljenosti od objekta oz. izkopsnega čela. Pri fotogrametriji je ključno poznavanje opreme, katero uporabljamo za zajem podatkov. Če želimo doseči zeleno končno natančnost, moramo iz podatkov o goriščni razdalji fotoaparata in formata fotografije izračunati primerno oddaljenost od objekta, velikost snemalne baze in velikost tarče.

Preizkusila sem raznovrstne metode zajema podatkov, z namenom preverbe natančnosti teh metod in posledično uporabnosti pri terenskem zajemu v inženirski geologiji. Primerjavo zajema podatkov geoloških izdankov z uporabo različnih metod so izvedli Wilkinson et al. (2016). Primerjali so uporabo TLS in SfM fotogrametrije, vendar pri izmeri niso uporabili preciznih metod za analizo. Podrobno analizo sta izvedla Sturzenegger in Stead (2009), in sicer sta primerjala TLS in stereofotogrametrijo z ročnimi meritvami na kamnitih pobočjih v hribinah z različnimi GSI, kontrolne točke pa sta izmerila s tahimetrom. V sklopu analize sta primerjala meritve izbranih parametrov diskontinuitet, pri čemer sta ugotovila, da sta uporabljeni metodi nezadostni v tankoplastnatih hribinah ter v hribinah, ki so tektonsko bolj poškodovane. Z geometrijsko analizo v kamnolomu Elerji sem nadgradila primerjavo aktualnih tehnologij za zajem podatkov s terestričnim daljinskim zaznavanjem. Uporabljene metode so bile: geodetska izmera s tahimetrom Leica Nova Multistation MS50, meritve z laserskim razdaljemerom Leica DISTO S910, skeniranje s 3D laserskim skenerjem Leica BLK360, terestrično lasersko skeniranje z inštrumentom Riegl VZ-400, SfM fotogrametrija z brezrcalnim fotoaparatom Olympus OM-D E-M1 Mark II, SfM fotogrametrija s pametnim telefonom Huawei P20 Pro ter ročna geološka izmera vpadov z geološkim kompasom in

Android aplikacijo FieldMove Clino. Meritve s tahimetrom Leica Nova MS50 sem uporabila kot referenčne, ker so od vseh uporabljenih metod najbolj natančne.

Primerjave oblakov točk sem izvedla v programu CloudCompare, rezultati analize natančnosti oblakov točk kažejo izredno majhne razlike med referenčnim lidarskim oblakom točk in izmero, opravljeno s SfM fotogrametrijo (± 2 mm). Izdelava fotogrametričnega oblaka točk je trajala najdlje 3 dni, ostali izračuni so bili precej hitrejši. Primerjava z rezultati terestričnega laserskega skeniranja je prav tako pokazala zelo majhne razlike (± 4 mm). Nekoliko večje razlike so bile zabeležene s pametnim telefonom (± 8 mm), izdelava točk je bila v tem primeru najhitrejša, trajala je 15 minut. Skeniranje s 3D laserskim skenerjem Leica BLK360 je dalo rahlo slabše rezultate (napake v razponu ± 15 mm). Izmerjene razdalje z laserskim razdaljemerom Leica DISTO S910 so se od referenčnih meritev s tahimetrom razlikovale ± 30 mm v prvem sklopu snemanja in ± 15 mm v drugem sklopu snemanja. Pri vseh izmerah so bile opazne razlike na območjih, kjer zaradi lokacij stojišč in morfologije skenirane površine ni prihajalo do odbojev laserskega žarka ter na robovih območja. Primerjava vseh uporabljenih metod kaže na to, da so vse našete uporabne v inženirski geologiji, saj dosegajo zadovoljivo natančnost, katero pa lahko dosežemo samo s skrbnim načrtovanjem zajema podatkov ter upoštevanjem priporočil stroke. Pri zajemu podatkov, njihovi obdelavi in analizi sem upoštevala ugotovitve in priporočila iz literature, ki temeljijo na eksperimentalnih testih in znanstvenih raziskavah. Najboljše rezultate dajeta SfM fotogrametrija in terestrično lasersko skeniranje. Rezultati teh metod predstavljajo dovolj natančno podlago za izvedbo meritev glavnih parametrov diskontinuitet, kot so orientacija, dolžina in gostota med diskontinuitetami.

V kamnolomu Elerji sem izvedla mineraloške in sedimentološke analize fliša za primerjavo intenzitete odboja laserskega žarka in RGB vrednosti v obeh litoloških členih za primerjavo z mineraloško zgradbo, kjer sem popisala 930 cm visok profil, odvzela pet vzorcev laporovca in pet vzorcev peščenjaka za meritve z rentgensko difrakcijo za kvantitativno določitev mineraloške sestave. Rezultati kažejo, da predstavljata kalcit in kremen do 90 % obeh kamnin, so pa precejšnje razlike v vsebnosti ostalih mineralov (mikroklin, muskovit, dolomit, idr.), ki vplivajo na odboj žarka. Ugotovila sem izredno dobro korelacijo med skupno vsebnostjo kalcita in kremena v peščenjakih ter intenziteto odboja TLS-RAW, kar se da razložiti z večjo velikostjo mineralnih zrn in njihovo svetlostjo. Kremen v primerjavi s kalcitom zaradi svoje prozornosti ne daje visokih korelacijskih faktorjev. V podobnih litoloških enotah so Burton et al. (2011) preiskovali možnost razločevanja med tankimi plastmi peščenjaka in skrilavega glinavca v heterogeni hribini, vendar s poudarkom na korelaciji intenzitete odboja laserskega žarka in deležem mineralov glin, kremena in glinencev. Primerjava z vrednostmi RGB kanalov ni dala pomembnih korelacij. Dobljeni rezultati se ne skladajo z rezultati Humair et al (2015), ki je

izvajal raziskave v heterogeni hribini z menjavanjem karbonatov, laporovcev in podrejeno muljevcev. Raziskave s fotogrametričnimi RGB barvnimi kanali so se pri določitvi litologije izkazale bolj uporabne od vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka. Omenjeni rezultati primerjave intenzitete odboja laserskega žarka v odvisnosti od mineraloške sestave predstavljajo precejšnjo novost in so bili objavljeni v znanstvenem članku (Živec et al., 2019).

Rezultati snemanja s TLS so pokazali, da lahko pri tankoplastnatih hribinah na podlagi intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka določimo posamezne litološke enote s plastmi debelejšimi od 2 cm, stopnjo preperevanja in stopnjo vlažnosti, poleg vlažnih območij pa lahko določimo tudi območja z mokro hribino in dotoki vode. Numerična vrednost intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka predstavlja dodano vrednost TLS, ki jo lahko vključimo v nadaljnje analize, medtem ko se iz same fotografije tega ne vidi oz. ne moremo kvantitativno ovrednotiti.

Analiza geometrije diskontinuitet predstavlja enega bistvenih delov disertacije, ki sem jo izvedla iz lidarskega in fotogrametričnega oblaka točk ter fotogrametričnega 3D modela v programih CloudCompare z vtičnikom Facets in v programu DSE (Discontinuity Set Extractor). Pri analizi sem se osredotočila na parametre diskontinuitet, ki izhajajo iz ISRM priporočil in standarda SIST EN ISO 14689-1:2004 ter so delno vključeni v sistem inženirsko-geološke klasifikacije RMR (Bieniawski, 1989). Analize sem izvedla na vseh treh lokacijah, pri čemer sem pri ročnem popisu zabeležila med lokacijami pomembne razlike med številom in sistemi diskontinuitet. V kamnolomu Elerji sta bila zabeležena dva sistema razpok in plastnatost, vpliv tektonske poškodovanosti je bil zelo majhen. V podzemni garaži Park San Giusto je bila hribina precej tektonsko poškodovana, zaradi tega vpliva sem zabeležila več sistemov plasti, več prelomov in več sistemov razpok. V predoru Markovec sem določila le plastnatost, ker zaradi načina izkopa z rezkanjem diskontinuitete niso bile dovolj vidne za analizo s TLS ali bližnjeliskovno fotogrametrijo. Največje število meritev in primerjav sem zato izvedla v kamnolomu, kjer so rezultati pokazali zelo dobro ujemanje z ročnimi meritvami, odstopanja so bila namreč le po nekaj stopinj po azimutu in vpadu za plastnatost in približno 15° za sisteme razpok. Ostalih parametrov diskontinuitet (hrapavost, odprtost in polnitev) nisem mogla določiti, ker so diskontinuitete vpadale v smeri izkopa in zato njihove ploskve niso bile vidne. Težavo je predstavljala tudi premajhna odprtost diskontinuitet (manj kot 1 cm), na lokaciji Park San Giusto pa tudi preveč tankih plasti, kar je predstavljalo težavo pri detekciji razdalj med plastmi. Vpade diskontinuitet z jasno izraženimi ploskvami lahko določimo polavtomatsko z analizo oblaka točk v izbranih programih DSE in Facets (CloudCompare). Zanesljivo lahko določimo vpade za diskontinuitete, ki so večje od 20 cm, s podrobno analizo pa ploskve diskontinuitet, ki so večje od 6 cm. Pri ploskvah, ki so manjše od 6 cm, so rezultati nezanesljivi,

saj analiza upošteva tudi območja, ki ne predstavljajo diskontinuitet. Iz tega sledi, da je geometrijska analiza diskontinuitet možna v tankoplastnatem flišu in da uporabljena programa lahko vključimo v geološki popis izkopnega čela.

Pri geometrijski analizi diskontinuitet iz oblaka točk predstavlja največji izziv določitev vpada, gostote in raztezanja za diskontinuitete, ki so orientirane tako, da so na izkopnem čelu vidne kot linije in so v flišu večinoma vezane na plastnatost. Iz rezultatov ugotavljam, da lahko diskontinuitete, ki so vidne kot linije, izločimo iz fotogrametričnega 3D modela ter jim določimo glavne parametre. Na lidarskem oblaku točk ni bilo mogoče natančno določiti odprtosti diskontinuitet, ki je v flišu tesna do zmerno široka (do 1 cm). Pri tem se lahko vprašamo, ali je smiselno določiti odprtost na podlagi oblaka točk, saj bi za to potrebovali detajlno skeniranje, ki bi omogočalo zelo natančno določitev dimenzij odprtosti. Detajlno skeniranje zahteva daljši čas zajema podatkov, ki je pri geološki spremljavi izkopa zelo omejen.

Pomemben faktor pri meritvah je bil omejen čas meritev, saj je v predoru Markovec in v podzemni garaži Park San Giusto potekal aktivni izkop, zato je bil čas za meritve in raziskave omejen na večinoma 15 do 20 minut, dostop v nepodprte dele izkopa pa je bil prepovedan. V kamnolomu Elerji teh omejitev ni bilo, zato so rezultati na tej lokaciji bolj relevantni. Zelo pomemben faktor, ki je vplival na rezultate, je bil tudi način izkopa, saj se v primeru rezkanja na izkopnem čelu (predor Markovec) diskontinuitet ni dalo določiti. To je potrebno upoštevati pri inženirsko-geoloških raziskavah, kjer bi se metodo laserskega skeniranja ali bližnjelikovne fotogrametrije dalo vpeljati.

Iz opravljenih meritev sem na koncu ovrednotila tudi uporabnost analiz pri sistemu klasifikacije RMR. Za oceno prevladujoče enoosne tlačne trdnosti (parameter A1) sem uporabila analize intenzitete odboja TLS-RAW laserskega žarka. Razmike med diskontinuitetami (A3) in dolžino njihovega raztezanja (A4.1) sem določila iz fotogrametričnega 3D modela, prav tako so bile meritve uporabne za določanje korekcije zaradi vpada diskontinuitet v predorih in na brežinah (B). Rezultati posameznih parametrov so zelo primerljivi z ročnimi popisi, prav tako končna vrednost RMR, ki je bila npr. v Elerjih določena kot 48 (razred III) z ročnim popisom in 52 (razred III) s TLS in bližnjelikovne fotogrametrije in klasificira hribino kot zadovoljivo. Tudi pri ostalih dveh lokacijah so bili podatki zelo primerljivi, zato lahko vsaj delno nadomestijo ročne popise, rezultati pa so tudi manj subjektivni, varnejši in lahko tudi hitreje pridobljeni. Zelo priporočamo vključevanje obeh metod v geološko spremljavo.

Omenjene analize ročnih metod s predstavljenimi metodami terestričnega laserskega skeniranja in bližnjelikovne fotogrametrije za detekcijo diskontinuitet in litološko segmentacijo

z analizo intenzitete odboja laserskega žarka predstavljajo novost v širši znanstveni sferi, saj tovrstnih primerjalnih analiz še ni bilo opravljenih, predvsem pa ne v tako heterogenih hribinah, kot je kompleksno menjavanje laporovcev in peščenjakov (fliš). Bistven doprinos disertacije je torej ugotovitev, da s terestričnim laserskim skeniranjem in bližnjleslikovno fotogrametrijo lahko delno oz. v dokaj veliki meri avtomatiziramo in nadomestimo ročne meritve geometrije (predvsem vpadov) diskontinuitet, ki jih potrebujemo pri nadaljnji inženirsko-geološki klasifikaciji in delu. Geometrijskih lastnosti gostote, dolžine raztezanja in hrapavosti diskontinuitet še ni možno avtomatsko opredeliti. Poleg tega lahko tudi delno avtomatiziramo litologijo, stopnjo preperevanja in stopnjo vlažnosti iz vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka. Natančnost meritev pa je v veliki meri odvisna od strukturnih značilnosti obravnavane hribine ter metode izkopa, ki vpliva na prepoznavnost litoloških in strukturnih značilnosti. Kot pomemben doprinos lahko omenim tudi dejstvo, da tovrstnih raziskav z namenom preverbe in dopolnitve inženirsko-geološke klasifikacije s sistemom RMR ni opravil še nihče.

Kljub temu, da je vključevanje TLS in bližnjleslikovne fotogrametrije v postopek inženirsko-geološke spremljave še v fazi razvoja lahko sklenem, da predstavljajo rezultati, ki so bili pridobljeni v sklopu izdelave doktorske disertacije, pomemben člen pri podpori ustreznega načrtovanja in zahtev, ki so potrebne, da se zagotovi kakovostne meritve za nadaljnje delo. Dobljeni rezultati doktorske disertacije pomembno prispevajo k vključevanju terestričnega laserskega skeniranja in bližnjleslikovne fotogrametrije v geološko spremljavo heterogenih hribin, saj dajejo dovolj natančne meritve, predvsem pa so meritve varne v primeru nevarnih sten kamnolomov in aktivnih izkopnih čel. Izkazalo se, da lahko presenetljivo natančne meritve opravimo tudi s pametnim telefonom s kvalitetno kamero, ki je postal že vsakdanja oprema. Pri obeh tehnologijah je pomembno, da za natančen oblak točk in 3D modela skrbno načrtujemo zajem. Njihova uporaba omogoča hitre in natančne meritve izdankov in izkopnih čel, na podlagi katerih lahko določimo litologijo in določene geometrijske lastnosti diskontinuitet, pri čemer je priporočljiva kombinacija obeh tehnologij. Rezultati sicer kažejo, da je na tem področju potrebnega še precej dela, vendar pa tudi, da sem doktorsko disertacijo pravilno usmerila v objektivno geološko spremljavo, saj je projektiranje, ki se navezuje na merjene metrske podatke iz terena bolj realno od vnaprej določenih analitičnih rešitev. Terestrično daljinsko zaznavanje postaja vsakdan inženirske prakse, saj je že vključeno v digitalizacijo spremljave stanja obstoječih predorov in mostov z različnimi tehnologijami. Poleg spremljave deformacij, se v tujini že razpisuje z vsakim predorom tudi optično skeniranje izkopnih čel in vseh slojev obloge. Rezultate disertacije bo možno preveriti v sklopu inženirsko-geološke spremljave izkopa predora Karavanke ter nadgraditi z novimi dognanji. Disertacija ima zato tudi pomemben praktični vidik.

Na podlagi pridobljenih rezultatov lahko **potrdimo hipotezo**, da je *uveljavljeno geološko kartiranje možno kvantitativno nadgraditi z uporabo bližnjefotogrametrije in terestričnega laserskega skeniranja v smislu delne avtomatizacije in večje objektivnosti postopkov. Iz tako pridobljenih rezultatov kartiranja se lahko določi inženirsko geološke lastnosti fliša, predvsem parametre diskontinuitet in litološke opredelitve.*

Ob izdelavi disertacije sem opazila, da bi določene sklope raziskav lahko razširila. Zaradi preobsežne tematike, ki največkrat zajema tudi zelo specifično programiranje, tega nisem mogla izvesti, podajam pa bistvene predloge nadaljnjih raziskav:

- Pomemben korak predstavlja združevanje oblaka točk in fotogrametričnega 3D modela, ki je po pregledu objavljenih publikacij še v razvoju. Iz opravljenih analiz sem ugotovila, da predstavlja največjo težavo prepoznavanje robov in posledično izločitev linij, iz katerih bi rekonstruirali ploskev diskontinuitet in jim določili lastnosti, kot so vpad, gostota in dolžina raztezanja. Prepoznavanje robov iz fotografij na podlagi obdelave slik sem sicer poskusila izvesti, vendar so za doseg uporabnih rezultatov potrebne dodatne analize obdelave fotografij ter filtrov s področja procesiranja slik (angl. *image processing*).
- Litološko segmentacijo iz vrednosti intenzitete odboja TLS-RAW lahko nadgradimo z metodo razvrščanja v skupine (angl. *cluster analysis*), potreben pa je razvoj algoritma, ki bi rezultate pravilno navezal nazaj na ustrezne točke v prostoru.
- Na podlagi rezultatov sem ugotovila, da je litološka segmentacija mogoča tudi za tankoplastnate heterogene hribine, kot je fliš, vendar zahteva podrobnejše analize. Na podlagi histogramov, ki so vključeni v disertacijo, se vidi, da je možno ločevati med litološkimi enotami, stopnjo preperelosti in stopnjo vlažnosti, vendar prihaja tudi do prekrivanja vrednosti intenzitete odboja laserskega žarka, zato je potrebno dodatno delo na histogramih in določanju razlik.
- Uveljavljena klasifikacija fliša se izvaja z orodjem GSI, v sklopu katere delež posameznih kamnin in tektonsko poškodovanost določimo iz skic, zato bi lahko dodatne raziskave usmeriti še v prepoznavanje vzorcev teh skic z digitalno obdelavo slik, z namenom uporabe prej omenjenih metod za GSI klasifikacijo.

6 SUMMARY

In my doctoral thesis I investigated the comparison between the established engineering geological mapping of flysch rock mass and newer, not yet fully applied methods of terrestrial laser scanning (TLS) and close-range photogrammetry in geology. The objective of the thesis was to quantitatively specify the application of selected terrestrial remote sensing methods in geological accompaniment survey of excavation works and characterization of engineering geological properties of flysch rock mass. Flysch represents a facies with heterogeneous alternation of mainly two lithological units: marlstone and sandstone (occasionally with limestone turbidites interbedding, but they were not encountered in the investigated area). Due to flysch' heterogeneity, the comparison among different methods is problematic, as well as its engineering geological classification, which represented a research challenge in the thesis. I used lidar 3D point cloud from TLS for geometry analysis of discontinuities. Besides this, I included the intensity values of the reflected laser beam to identify the lithology and mineral composition of rocks. From close-range photogrammetry I reconstructed photogrammetric 3D models for studying the geometry of discontinuities. The purpose of selected analyses was the verification of the parameters, used in the engineering geological classification RMR.

I selected three locations for performing measurements in flysch: the most important investigations were carried out at the Elerji quarry near Škofije (Slovenia), the second location was the Markovec tunnel between Koper and Izola (Slovenia) and the third was the underground parking garage Park San Giusto in Trieste (Italy). All selected sites are located in Eocene flysch with marlstone and sandstone in different mixture and combinations, as well as fractured to various degree. Measurements were also affected by the working conditions, as explained further below.

Below I present the main findings and finally, the suggestions for future research.

A detailed analysis of the marlstone and sandstone samples in flysch with the intensity values TLS-RAW of the reflected laser beam was performed at different scan distances (5 m to 25 m), at different moisture degree (dry, damp and wet samples) and at different weathering degree (fresh, weathered and strongly weathered to residual soil). The analysis showed that the intensity values are the highest at the scanning distance approximately 10 m and that there are statistically significant differences between both lithologies, among different moisture degree and different weathering degree. Although the histograms of results partially overlap, the differences among the groups are all statistically significant. Therefore, applying the

intensity values TLS-RAW method is useful for determining the weathering and moisture degree of both rocks.

In order to correctly place the analysed data in space and to correctly and accurately reconstruct the photogrammetric 3D models, I tested different sizes of coded targets in the software Agisoft Metashape, which automatically recognizes and uses as control points. For this reason, the coded target must be accurately and correctly identified. I have tested the 12-bit circular targets with a radius of the inner circle between 10 mm and 30 mm, at distances 2 m to 30 m. The results showed that the software identified mostly targets with a radius of the inner circle 15 mm and 20 mm. Acquired targets of size below 15 mm is not possible to identify at greater distances, as expected. Similarly, it is not possible to detect bigger targets at small distances. I also used different camera lenses and observed that both fixed focal length as well as variable focal length (zoom) camera lenses can be used, but on condition that the focal length of the latter should not change during the same shooting set. The aperture value and the exposure time have no significant effect. The decisive factors for the accuracy of the photogrammetric point cloud and 3D model are the size of the target in the photo, depending on the format photos, focal length of the lenses and distance from the object or excavated face. When applying close-range photogrammetry, it is important to learn the specifications of the equipment, used for data acquisition. In order to achieve the desired final accuracy, we need to calculate from the focal length of the camera and format of the photo, the appropriate distance from the object, baseline length and the size of the target.

I tried a variety of methods for data acquisition, in order to verify their accuracy and, consequently, their applicability for field acquisition in engineering geology. Wilkinson et al. (2016) compared different approaches for data acquisition of geological outcrops. They compared only TLS and SfM photogrammetry, without precise measurements. A detailed analysis was performed by Sturzenegger and Stead (2009). They compared measurements performed by TLS and stereophotogrammetry with manual measurements on rock slopes with rock mass of various GSI categories. The control points were measured with a tacheometer. As part of the analysis, they compared measurements of selected discontinuity parameters, finding out that the methods used were insufficient in thin-layered and tectonized rock mass. With geometric analysis in the Elerji quarry, I have upgraded the comparison of current technologies used for data acquisition with terrestrial remote sensing. The methods used were: surveying with tacheometer Leica Nova Multistation MS50, measurements with laser distance meter Leica DISTO S910, 3D laser scanning with Leica BLK360 scanner, terrestrial laser scanning with Riegl VZ-400, SfM photogrammetry with mirrorless camera Olympus OM-D E-M1 Mark II, SfM photogrammetry with smart phone Huawei P20 Pro and manual

measurements of discontinuity dips with geological compass, as well as with the Android application FieldMove Clino. I used the measurements with the Leica Nova MS50 tacheometer as a reference, as they are the most accurate of all methods used.

I compared point clouds in the software CloudCompare. Results from point cloud's accuracy analysis show extremely small differences between the reference lidar point cloud and measurement performed with SfM photogrammetry (± 2 mm). Generating the photogrammetric point cloud took a maximum of 3 days, whereas the rest of calculations were much faster. Also, the comparison with the results of terrestrial laser scanning shows very small differences (± 4 mm). Slightly larger differences were measured with smart phone (± 8 mm), but the generation of photogrammetric point cloud was the fastest, as it took only 15 minutes. Scanning with 3D laser scanner Leica BLK360 gave slightly worse results (errors in the ± 15 mm range). Measured distances with the laser distance metre Leica DISTO S910 differed ± 30 mm in the first set of measurements and ± 15 mm in the second set of measurements from the tacheometer's reference measurements. In all measurements, differences were observed in areas where there were no reflections of the laser beam due to the selected station and morphology of the scanned surface. Errors were measured also at the edges of the investigated area. Comparison of used methods shows that all of them can be applied in engineering geology, as they achieve satisfactory accuracy, which can be accomplished only by carefully planning the data acquisition and following recommendations of the profession. For data acquisition, processing and analysis I followed the findings and recommendations from the literature, which are based on experimental tests and scientific research. The best results are obtained by SfM photogrammetry and terrestrial laser scanning. The results of these methods provide sufficiently accurate basis for performing measurements of main discontinuity parameters, as the orientation, persistence and spacing.

I conducted mineralogical and sedimentological analysis of flysch from the Elerji quarry, in order to compare the intensity values of the reflected laser beam and RGB values in both lithological units with mineralogical composition. I logged a 930 cm high profile, took five samples of marlstone and five samples of sandstone for quantitative determination of mineralogical composition with X-ray diffraction. Results show that calcite and quartz represent 90 % of both rocks, but there are considerable differences in the content of other minerals (microcline, muscovite, dolomite, etc.) that affect the reflection of the laser beam. I observed an extremely good correlation between total content of calcite and quartz in sandstones and the intensity values TLS-RAW, which can be explained by the larger size of mineral grains and their brightness. Quartz does not give high correlation factors compared to calcite, due to its

transparency. Burton et al. (2011) investigated in similar lithological units the possibility of differentiating among thin sandstone and shale layers in heterogeneous rock mass. Their emphasis was the correlation of the intensity values and the proportion of clay, quartz and feldspar minerals. The comparison with RGB band values did not produce significant correlations. The obtained results are inconsistent with the results of Humair et al. (2015), who performed investigations in heterogeneous rock mass with alternating carbonates, marlstones and subordinate mudstones. Investigations with photogrammetric RGB colour band have proven more applicable than the intensity values of the reflected laser beam. The results of the comparison between the intensity values of the reflected laser beam and mineralogical composition represent a novel approach and have been published in a peer-reviewed paper (Živec et al., 2019).

Results of terrestrial laser scanning demonstrated that in thin-layered rock mass, individual lithological units with layers thickness above 2 cm, weathering degree and moisture degree, can be differentiated based on the intensity values TLS-RAW of the laser beam. Besides damp parts of the scanned rock mass, we can determine areas of wet rock mass and water seepage. The numerical value of the intensity TLS-RAW represents the added value of TLS, which can be included in further analyses, while this is not apparent from the photograph itself or cannot be quantified.

Geometry analysis of discontinuities represents one of the essential parts of the thesis, that I accomplished from lidar and photogrammetric point cloud, as well as from photogrammetric 3D model in the software CloudCompare (plugin Facets) and DSE (Discontinuity Set Extractor). I focused on discontinuity parameters, which derive from the ISRM guidelines and standard SIST EN ISO 14689-1:2004 and are partially included in the classification system RMR (Bieniawski, 1989). I analysed data from all selected locations. Significant differences in number and discontinuity sets among locations were noted during manual logging. Two joint sets and bedding planes were determined in Elerji quarry, where the rock mass was very little tectonized. The tectonic deformation of the rock mass in the underground parking garage Park San Giusto was stronger. Consequently, I logged more sets of bedding planes, more fault sets and joint sets. In the Markovec tunnel I could only logged the bedding, as the excavated tunnel face showed little geological information due to the excavation methodology using the road header, which caused a scratched surface. Therefore, discontinuities were not clearly visible enough for the analysis of TLS or close-range photogrammetry. The largest number of measurements and comparison I performed from the collected data in the quarry, where the results showed very good correlation with manual measurements. Differences for the bedding planes were only a few degrees in azimuth and inclination, and approximately 15° for the joint

sets. I was not able to determine the rest of discontinuity parameters (i.e. roughness, aperture and filling), as discontinuities were mostly oriented in the direction of the excavation and therefore their surfaces were not clearly seen. Another problem was also the aperture of discontinuities, which was too small (less than 1 cm), as well as the bedding at the underground parking garage Park San Giusto, as they were too thin to identify spacing. Discontinuity orientation with clearly structured surfaces can be determined semi-automatic from the point cloud analysis in software DSE and Facets (CloudCompare). We can certainly determine orientation for discontinuities larger than 20 cm, and with a detailed analysis even for discontinuities larger than 6 cm. Results are uncertain for surfaces smaller than 6 cm, as the analysis also includes areas that do not represent structures. We can summarize the geometry analysis of discontinuities is possible in thin-bedded flysch and that the used software can be applied in geological logging of the excavated face.

The greatest challenge in geometric discontinuity analysis from point cloud represents the determination of orientation, spacing and persistence for discontinuities, which are oriented in the direction of the excavated face and are visible as lines. In flysch they mostly represent the bedding planes. From the results I observe that we can extract discontinuities, which are visible as lines, from photogrammetric 3D model and determine their main parameters. We could not accurately define the aperture of discontinuities in flysch, where it is mostly tight to moderately wide (below 1 cm). At this point it is important to consider, whether it is reasonable to determine the discontinuity aperture based on the point cloud, since this would require a detailed scan that would allow to determine very precisely the aperture. Detailed scanning requires longer acquisition time, which is very limited during geological logging of the excavation.

An important factor during the data acquisition was the limited time, as the excavation in the Markovec tunnel and underground parking garage Park San Giusto were active. Consequently, the available time for data acquisition was limited from 15 to 20 minutes and the access to the unsupported parts of the excavation was forbidden. In the Elerji quarry there were no such restrictions, so the results at this site are more relevant. An important factor influencing the results was the excavation method. In case of the Markovec tunnel, where the road-header was used, it was difficult to extract the discontinuities. This should be taken into account in engineering geological investigations, where the laser scanning or close-range photogrammetry could be established.

Based on the acquired measurements, I have finally evaluated the applicability of these analyses for the RMR classification. For estimating the prevailing uniaxial compression

strength (parameter A1) I used the results from the intensity values TLS-RAW of the reflected laser beam analysis. Discontinuity spacing (A3) and persistence (A4.1) were determined from the photogrammetric 3D model. These measurements were applied also for the correction of the effect of discontinuity orientation in tunnelling and slope excavation (B). The results of individual parameters are comparable to manual logs, as well as the final RMR rating, which was e.g. in the Elerji quarry designated as 48 (Class III) by manual log and 52 (Class III) by TLS and close-range photogrammetry. The rock mass was classified as fair (III). For other two sites, the data were very comparable, so they could at least partially replace manual logs, and the results were also less subjective, safer and faster to obtain. It is strongly recommended to include both methods in geological face logging. Results were comparable also for the other two locations, and could therefore replace the established manual face logs at least partially. Also, the results are less subjective, safer and faster to acquired. We strongly recommend applying both methods in geological accompaniment survey.

Hereby presented analyses of manual methods with terrestrial laser scanning and close-range photogrammetry for identification of discontinuities and lithological segmentation with the analysis of the intensity values, represent a novelty in the scientific field of engineering geology, since such comparative analyses have not yet been performed, especially not in such heterogeneous rock mass with complex alternation of marlstones and sandstones (flysch). The significant contribution of the thesis is therefore the conclusion, that terrestrial laser scanning and close-range photogrammetry can partially or to a fairly large extent automate and replace manual measurements of discontinuity geometry (especially dip), needed for further engineering geological classification and workflow. Geometric properties of discontinuities, such as spacing, persistence and roughness cannot yet be determined automatically. In addition, lithology, weathering and moisture degree can be partially automated based on the intensity values of the reflected laser beam. The accuracy of measurements depends to a large extent on the structural properties of the investigated rock mass and the excavation method, which affects the recognition of lithological and structural characteristics. Another important contribution is the fact that no such research has been undertaken to verify and complement the engineering geological classification with the RMR system.

Although, the integration of TLS and close-range photogrammetry into the workflow of engineering-geological accompaniment survey is in its early development stages, I can conclude that results obtained as part of the doctoral thesis are an important link in supporting the appropriate design and requirements, needed to provide quality measurements for further work. The results obtained in the thesis significantly contribute to the integration of TLS and close-range photogrammetry into geological logging workflow of heterogeneous rock mass, as

they provide sufficiently enough measurements, and above all, they are safe in case of hazardous quarry walls and active excavation faces. It turns out that we can accomplish surprisingly accurate measurements from smart phone with a quality camera, which has already become a common equipment. When applying both technologies it is important, that in order to achieve an accurate point cloud or 3D model, we need to carefully plan the acquisition. They enable fast and accurate measurements of outcrops and excavated faces, based on which we determine lithology and certain geometric properties of discontinuities, with a recommended combination of both technologies. Although the results show that a lot of work is still needed in this field, they also indicate that I have focused my doctoral thesis in the correct direction for objective geological logging and mapping, since the design relating to the measured data from the field, is more realistic than predefined analytical solutions. Terrestrial laser scanning is becoming an everyday engineering practice, as it is already involved in digitizing the monitoring of existing tunnels and bridges using a variety of technologies. In addition to deformation monitoring, optical data acquisition of excavated tunnel faces and all inner lining has already been applied. The results from the thesis will be verified as part of the engineering geological accompaniment survey of the Karavanke tunnel (NW Slovenia) excavation. Therefore, the thesis has also an important practical aspect.

Based on the achieved data we can confirm the hypothesis, that *the established geological mapping can be quantitatively upgraded using close-range photogrammetry and terrestrial laser scanning in terms of partial automation and greater objectivity of the procedure. From the mapping results acquired as presented, the engineering geological properties of flysch, discontinuity parameters, as well as lithological definitions can be determined.*

During the research work for my thesis, I noticed that I investigate deeper certain areas of research. Due to the extensive topic, which often includes very specific programming, I could not test and perform all additional ideas, however I present some suggestions for further research:

- An important step represents the merging of point cloud and photogrammetric 3D model, which, based on published papers, is not yet completely accomplished. The performed analyses showed that the main issue is still the edge detection and consequently, extraction of lines, from which we could reconstruct discontinuity planes and determine the discontinuity characteristics, such as dip, spacing and persistence. Although, I tried to perform edge detection from photographs using image processing, I realized that additional filter analyses as part of the image processing need to be carried out to obtain useful results.

- Lithological segmentation from intensity values TLS-RAW of the reflected laser beam can be upgraded with cluster analysis, but an additional algorithm to correctly correlate results back to the corresponding points in space, needs to be developed.
- The lithological segmentation is possible also for thin-layered heterogeneous rock mass, as flysch, but requires more detailed analyses. Histograms, which are included in the thesis show that it is possible to discriminate among lithological units, weathering and moisture degree. Unfortunately, some intensity values overlap, which requires additional work on histograms and determining the differences.
- The established flysch classification is currently performed using the GSI tool, where the percentage of individual rocks and tectonic disturbance are determined based on the sketches. Further research could be therefore directed towards the identification of the patterns obtained from sketches using digital image processing, with the purpose of using the presented methods for the engineering geological GSI classification.

7 VIRI

Abellan, A., Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Vilaplana, J.M. 2009. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9: 365-372.

doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-9-365-2009>

Agisoft LLC, 2018. Agisoft PhotoScan user manual: Professional Edition, Version 1.4. St. Petersburg, Russia: 118 str.

Åndra, H., Combaret, N., Dvorkin, J., Glatt, E., Han, J., Kabel, M., Keehm, Y., Krzikalla, F., Lee, M., Madonna, C., Marsh, M., Mukerji, T., Saenger, E.H., Sain, R., Saxena, N., Ricker, S., Wiegmann, A., Zhan, X. 2013. Digital rock physics benchmarks – Part I: Imaging and segmentation. *Comput. Geosci.* 50: 25-32.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.005>

Andriani, G.F., Parise, M. 2017. Applying rock mass classifications to carbonate rocks for engineering purposes with a new approach using the rock engineering system. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 9: 364–369.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.irmge.2016.12.001>

Andriani, G.F., Parise, M. 2015. On the applicability of geomechanical models for carbonate rock masses interested by karst processes. *Environ. Earth Sci.*, 74:7813–7821.

doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4596-z>

Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramirez, F., Martinez-Carricondo, P., Sanchez-Hermosilla Lopez, J., Mesas-Carrascosa, J.M., Garcia-Ferrer, A., Perez.Porras, F.J. 2018. Reconstruction of extreme topography from UAV structure from motion photogrammetry. *Measurement* 121: 127-138.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.062>

Aydan, Ö., Ulusay, R., Tokashiki, N. 2014. A new rock mass quality rating system: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses. *Rock Mech. Rock Eng.* 47, 4: 1255-1276.

doi: [10.1007/s00603-013-0462-z](https://doi.org/10.1007/s00603-013-0462-z)

Balon, M., 2007. Analiza uporabnosti tehnologije terestričnega laserskega skeniranja za metrično dokumentiranje zemeljskih plazov. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Balon): 116 f.

Barton, N. 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 15: 319-368.

doi: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)91472-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)91472-9)

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

doi: <https://doi.org/10.1007/BF01261801>

Barton, N., Lien, R., Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock mass for the design of the tunnel support. *Rock Mech.* 6: 189-236.

doi: <https://doi.org/10.1007/BF01239496>

Beguš, T., Kadunec, K., Kočevar, M., Sotlar, K., Jakopin, D., Živec, T., Fux, J., Merhar, B., Žigman, G., Smole, D., Gvozdanovič, T., Vezočnik, R., Anžur, A., Belić, Z. 2012. Geološko - geotehnična spremljava gradnje predora Markovec: zaključno poročilo: cesta H5 Koper - Lucija: odsek 389 Koper - Izola. Ljubljana: IRGO Consulting: Geoinženiring: Elea iC; Nova Gorica: Projekt.

Bellian, J.A., Kerans, C., Jennette, D.C. 2005. Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modelling. *J. Sediment. Res.* 75, 2: 166–176.
doi: <http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2005.013>

Berisavljević, Z., Berisavljević, D., Rakić, D., Hadži-Niković, G., Radić, Z. 2018. Strength of composite flysch samples under uniaxial compression. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 77, 2: 791-802.
doi: <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1009-4>

Besl, P.J. in McKay, N.D. 1992. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE T. Pattern Anal.* 14, 2: 239-256.
doi: [10.1109/34.121791](https://doi.org/10.1109/34.121791)

Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering.* John Wiley & Sons: 251 str.

Bieniawski, Z.T. 1976. Rock mass classifications in rock engineering. V: Bieniawski, Z.T., (ur.), Balkema, A.A. (ur.). *Proceedings Symposium on Exploration for Rock Engineering*, Rotterdam: p. 97–106.

Bieniawski, Z.T. 1974. Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelling. V: *Proceedings of the Third International Congress on Rock Mechanics*, ISRM. Denver, USA: pp. 27–32.

Bieniawski, Z.T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *South African Inst. Carl Eng.* 15: 335–344.

Birch, J.S., 2006. Using 3DM Analyst Mine Mapping Suite for Rock Face Characterisation. V: Tonon, F. (ur.), Kottenstette, J. (ur.). "Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization" Organized by F. Tonon and J. Kottenstette, Held in Golden, Colorado, June 17-18, 2006. Golden, Colorado, ARMA: 15 str.

Blois, L., Berry, P. 2008. Measurements to characterize discontinuities of quarry faces of chalk "Monte Tondo" in Riolo Terme (Italy) through terrestrial 3D laser scanning method and to compare them at survey techniques data traditional. *Electron. J. Geotech. Eng.* 13: 29 str.

Boehler, W., Heinz, G., Marbs, A., Albertz, J. 2001. The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording. V: Albertz, J. (ur.). *Surveying and Documentation of Historic Buildings - Monuments - Sites. Traditional and Modern Methods: proceedings of the XVIII. International Symposium of CIPA 2001, Potsdam, Germany, 18-21 September 2001.* Potsdam and IAPRS: 430-438.

Brideau, M.A., Massey, C.I., Archibald, G.C., Jaboyedoff, M. 2012. *Terrestrial Photogrammetry and LiDAR investigation of the cliffs associated with the seismically triggered rockfalls during the February and June 2011 Christchurch earthquakes.* United States, CRC Press: str. 1179-1185.

Buckley, S.J., Ringdal, K., Naumann, N., Dolva, B., Kurz, T.H., Howell, J.A., Dewez, T.J.B. 2018. LIME: Software for 3-D visualization, interpretation and communication of virtual geoscience models. *Geosphere* 15, 1: 222-235.

doi: <https://doi.org/10.1130/GES02002.1>

Buckley, S.J., Enge, H.D., Carlsson, C., Howell, J.A. 2010. Terrestrial laser scanning for use in virtual outcrop geology. *Photogramm. Rec.* 25: 225–239.

doi: <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2010.00585.x>

Burton, D., Dunlap, D.B., Wood, L.J., Flaig, P.P. 2011. Lidar Intensity as a Remote Sensor of Rock Properties. *J. Sediment. Res.* 81: 339–347.

doi: <https://doi.org/10.2110/jsr.2011.31>

Buyer, A. in Schubert, W. 2017. Calculation the spacing of discontinuities from 3D point cloud. V: Symposium of the International Society for Rock Mechanics – EUROCK 2017. *Procedia Engineer.* 191: 270-278.

Carrea, D., Abellan, A., Derron, M.-H., Jaboyedoff, M. 2015. Automatic rockfalls volume estimation based on terrestrial laser scanning data. V: *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 2*. Springer, Cham.: p. 425-428.

Carrea, D., Abellan, A., Humair, F., Matasci, B., Derron, M.H., Jaboyedoff, M. 2016. Correction of terrestrial LIDAR intensity channel using Oren-Nayar reflectance model: an application to lithological differentiation. *ISPRS J. Photogramm.* 113: 17-29.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.12.004>

Celarč, B., Jurkovšek, B., Placer, L., Milanič, B. 2012. Strukturna zgradba območja med Dinaridi in Istrskim polotokom: Vpliv tektonike plošč na gradnje velikih infrastrukturnih objektov (primer 2. tira Divača – Koper). V: *Razprave 6. posvetovanja slovenskih geoteknikov*, Lipica, 14.–15. junij 2012. SloGED: p. 49-66.

Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F., Ranzuglia, G. 2008. Meshlab: an open source mesh processing tool. V: Scarano, V.(ur.), De Chiara, R. (ur.), Erra, U. (ur.). *6th Eurographics Italian Chapter Conference 2008: proceedings*, Salerno, Italy, July 2–4, 2008, Salerno: p. 129-136.

Chen, N., Kemeny, J., Jiang, Q., Pan, Z. 2017. Automatic extraction of blocks from 3D point clouds of fractured rock. *Comput. Geosci.* 109: 149-161.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.08.013>

Chesley, J.T., Leier, A.L., White, S., Torres, R. 2017. Using unmanned aerial vehicles and structure-from-motion photogrammetry to characterize sedimentary outcrops: An example from the Morrison Formation, Utah, USA. *Sediment. Geol.* 354: 1-8.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.03.013>

Corradetti, A., McCaffrey, K., De Paola, N., Tavani, S. 2017. Evaluating roughness scaling properties of natural active fault surfaces by means of multi-view photogrammetry. *Tectonophysics* 717: 599-606.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.08.023>

Deere, D.U., Hedron, A.J., Jr., Patton, F.D., Cording, E.J. 1967. Design of surface and near-surface construction in rock. V: Fairhurst, C. (ur.). *Failure and Breakage of Rock*. Society of Mining Engineers of AIME, New York: p. 237-302.

Delon, J., Rouge, B. 2007. Small baseline stereovision. *J. Math. Imaging Vis.* 28, 3: 209-223.
doi: [10.1007/s10851-007-0001-1](https://doi.org/10.1007/s10851-007-0001-1)

Dewez, T.J.B., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., Rohmer, J. 2016. Facets: A CloudCompare plugin to extract geological planes from unstructured 3D point clouds. ISPRS Congress, 12 – 19 July, 2016. Prague, Czech Republic. *Int. Arch. Photogramm.*: XXIII XLI-B5: p. 799-804.

Drews, T., Miernik, G., Anders, K., H'fle, B., Profe, J., Emmerich, A., Bechstädt, T. 2018. Validation of fracture data recognition in rock masses by automated plane detection in 3D point clouds. *Int. J. Rock Mech. Min.* 109: 19-31.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.06.023>

Fekete, S., Diederichs, M. 2013. Integration of three-dimensional laser scanning with discontinuum modelling for stability analysis of tunnels in blocky rockmasses. *Int. J. Rock Mech. Min.* 57: 11–23.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.08.003>

Feng, Q., Röshoff, K. 2015. A survey of 3D laser scanning techniques for application to rock mechanics and rock engineering. V: Ulusay, R. (ur.). *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014 Heidelberg [etc]*, Springer International Publishing Switzerland: p. 265-293.

Fifer Bizjak, K. 2010. Determining the surface roughness coefficient by 3D Scanner. *Geologija* 53, 2: 147-152.
doi: [10.5474/geologija.2010.012](https://doi.org/10.5474/geologija.2010.012)

Fookes, P.G. 1997. *Geology for Engineers: the Geological Model, Prediction and Performance*. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 30: 293-424.
doi: <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1997.030.P4.02>

Franceschi, M., Teza, G., Preto, N., Pesci, A., Galgaro, A., Girardi, S. 2009. Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner. *ISPRS J. Photogramm.* 64: 522–528.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.003>

Gaich, A., Pötsch, M., Schubert, W., 2006. Acquisition and assessment of geometric rock mass features by true 3D images. V: *Golden Rocks 2006, The 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, June 17 – 21, 2006. Golden, Colorado, American Rock Mechanics Association: p. 1–3.

Goodman, R.E. 1993. *Engineering Geology*. Wiley: 412 str.

Gorjup, Z. 2001. *Temelji fotogrametrije in postopki izrednotenja*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 142 str.

Graselli, G. 2001. *Shear strength of rock joints based on quantified surface description*. Doctoral Thesis, Lausanne, Switzerland, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne (samozaložba G. Graselli): 124 f.

Guo, J., Liu, S., Zhang, P., Wu, L., Zhou, W., Yu, Y. 2017. Towards semi-automatic rock mass discontinuity orientation set analysis from 3D point clouds. *Comput. Geosci.* 103: 164-172.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.03.017>

Haneberg, W.C. 2008. Experience using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modelling and discontinuity mapping in the United States. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 67: 457-469.

doi: [10.1007/s10064-008-0157-y](https://doi.org/10.1007/s10064-008-0157-y)

Healy, D., Rizzo, R.E., CorSZell, D.G., Farrell, N.J.C., Watkins, H., Timms, N.E., Gomez-Rivas, E., Smith, M. 2017. FracPaQ: A MATLAB™ toolbox for the quantification of fracture patterns. *J. Struct. Geol.* 95: 1-16.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.12.003>

Heckmann, T., Bimböse, M., Krautblatter, M., Haas, F., Becht, M., Morche, D. 2012. From geotechnical analysis to quantification and modelling using LiDAR data: a study on rockfall in the Reintal catchment, Bavarian Alps, Germany. *Earth Surf. Process. Landf.* 37: 119-133.

doi: <https://doi.org/10.1002/esp.2250>

Heritage, G.L. (ur.), Large, A.R.G. (ur.) 2009. *Laser scanning for the environmental sciences.* Wiley-Blackwell: 278 str.

Hodgetts, D. 2016. *Virtual Reality Geological Studio (VRGS): Introduction to Digital Outcrop Modelling using VRGS v2.26 (Training Course).* Manchester, University of Manchester, Basin Studies and Petroleum Geoscience: 17 f.

Hodgetts, D., Drinkwater, N.J., Hodgson, J., Kavanagh, J., Flint, S.S., Keogh, K.J., Howell, J.A. 2004. Three-dimensional geological models from outcrop data using digital data collection techniques: An example from the Tanqua Karoo depocentre, South Africa. London, UK, Geological Society, Special Publications 239: 57-75.

doi: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.239.01.05>

Hoek, E., Brown, E.T. 1997. Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min.* 34: 1165–1186.

doi: [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)

Hoek, E. 1994. Strength of rock and rock masses. *ISRM News J.* 2: 4–16.

Hoek, E., Brown, E.T. 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Geoenviron.* 106: 1013–1035.

Hudson, J.A. 1989. *Rock mechanics principles in engineering practice.* CIRIA/Butterworths, London: 72 str.

Humair, F., Abellan, A., Carrea, D., Matasci, B., Epard, J.-L., Jaboyedoff, M. 2015. Geological layers detection and characterisation using high resolution 3D point clouds: example of a box-fold in the Swiss Jura Mountains. *Eur. J. Remote Sens.* 48: 541–568.

doi: <https://doi.org/10.5721/EuJRS20154831>

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellan, A., Derron, M.H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A. 2010. Use of LiDAR in landslide investigations: a review. *Nat. Hazards* 61: 5-28.

doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Minoia, R., Locat, J., Turmel, D. 2008. Terrestrial LiDAR investigation of the 2004 rockslide along Petit Champlain street, Quebec City (Quebec, Canada). V: 4th Canadian Conference on Geohazards: From Causes to Management, Quebec City, Canada, May 20th-24th, 2008. *Presse de l'Université Laval*: p. 295-301.

Jaboyedoff, M., Metzger, R., Oppikofer, T., Couture, R., Derron, M.-H., Locat, J. and Turmel, D. 2007. New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software. V: *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands*, 1. Taylor & Francis: str. 61-68.

Kaasalainen, S., Jaakkola, A., Kaasalainen, M., Krooks, A., Kukko, A. 2011. Analysis of incidence angle and distance effects on Terrestrial Laser Scanner intensity: Search for correction methods. *Remote Sens.-Basel* 3: 2207-2221.

doi: <https://doi.org/10.3390/rs3102207>

Kemeny, J., Post, R. 2003. Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces. *Comput. Geosci.* 29: 65-77.

doi: [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00106-1](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00106-1)

Khoshelham, K., Altundag, D., Ngan-Tullars, D., Menenti, M. 2011. Influence of range measurement noise on roughness characterization of rock surfaces using terrestrial laser scanning. *Int. J. Rock Mech. Min.* 48: 1215-1223.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.09.007>

Kokkalas, S., Jones R.R., McCaffrey, K.J.W., Clegg, P. 2007. Quantitative fault analysis at Arkitsa, Central Greece, using terrestrial laser scanning (»LiDAR«). V: *Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXX, 2007: proceedings of the 11th International Congress Athens, Greece, May, 2007.* Bull. Geol. Soc. Greece: p. 1959-1972.

Kolenc, R. 2004. Terestrično 3D lasersko skeniranje. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba R. Kolenc): 93 f.

Kraus, K. 2007. *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans*, De Gruyter Textbook. Bod Third Party Titles: XV + 459 str.

Kromer, R.A., Hutchinson, D.J., Lato, M.J., Gauthier, D., Edwards, T. 2015. Identifying rock slope failure precursors using LiDAR for transportation corridor hazard management. *Eng. Geol.* 195: 93-103.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.012>

Kurtovič, D., 2018. Sedimentološki profil eocenskega fliša v kamnolomu Elerji pri Škofijah. Raziskovalna naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta (samozaložba D. Kurtovič): 31 f.

Lato, M.J., Vöge, M. 2012. Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models. *Int. J. Rock Mech. Min.* 54: 150-158.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.06.003>

Lato, M., Queen's University (Kingston, O.). D. of G.S., Engineering, G. 2010. *Geotechnical Applications of LiDAR Pertaining to Geomechanical Evaluation and Hazard Identification.* Doctoral thesis. Kingston, Ontario, Canada, Queen's University (samozaložba M. Lato): 238 f.

Lato, M., Diedrichs, M.S., Hutchinson, D.J., Harrap, R. 2009. Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses. *Int. J. Rock Mech. Min.* 46: 194-199.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.04.007>

Leica Geosystems AG, 2015. Leica DISTO™ S910 – Technical data.

Lichti, D.D. 2007. Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. *ISPRS J. Photogramm.* 61: 307-324.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.10.004>

Lichti, D.D. in Jamtsho, S. 2006. Angular resolution of terrestrial laser scanners. *The Photogramm. Rec.* 21: 141-160.

doi: <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00367.x>

Lizzi, G., Piano, C., Cucchi, F. 2008. Carta geologica del Carso classico. Progetto GEO-CGT - Cartografia Geologica di sintesi alla scala 1:10.000.

Lu, J., Georghiades, A.S., Rushmeier, H., Dorsey, J., Xu, C. 2005. Synthesis of Material Drying History: Phenomenon Modelling, Transferring and Rendering. V: Galin, E. (ur.), Poulin, P. (ur.). *Eurographics Workshop on Natural Phenomena: Proceedings of the Eurographics Workshop on Natural Phenomena, NPH 2005, Dublin, Ireland, 2005.* Eurographics Association: p. 7-16.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J. 2014. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging.* De Gruyter Textbox: XVIII+684 str.

Mah, J., Samson, C., McKinnon, S.D., Thibodeau, D. 2013. 3D laser imaging for surface roughness analysis. *Int. J. Rock Mech. Min.* 58: 111-117.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.08.001>

Marinos, P., Hoek, E. 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 60: 85-92.

doi: <https://doi.org/10.1007/s100640000090>

Marinos, P., Hoek, E., 2000. GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. V: *GeoEng 2000, An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, November 19-24, 2000.* Melbourne, Australia: 19 str.

Marinos, V., Marinos, P., Hoek, E. 2007. Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. V: Romana (ur.), Peruchó (ur.), Olalla (ur.). *Underground Works under Special Conditions.* Taylor and Francis: p. 13-21.

doi: [10.1201/NOE0415450287.ch2](https://doi.org/10.1201/NOE0415450287.ch2)

Marinos, V., Marinos, P., Hoek, E. 2005. The geological strength index: Applications and limitations. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 64: 55-65.

doi: <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0270-5>

Matasci, B., Carrea, D., Abellan, A., Derron, M.-H., Humair, F., Jaboyedoff, M., Metzger, R. 2015. Geological mapping and fold modelling using Terrestrial Laser Scanning point clouds: application to the Dents-du-Midi limestone massif (Switzerland). *Eur. J. Remote Sens.* 48: 569-591.

doi: <https://doi.org/10.5721/EuJRS20154832>

Mauldon, M. 1998. Estimating mean fracture length and density from observations in convex windows. *Rock Mech. Rock Eng.* 31: 201-216.

doi: <https://doi.org/10.1007/s006030050021>

Mecasol, S., GmbH, iC consulenti Z. 2006. *Parccheggio Interrato San Giusto, Relazione Geotecnica - Geomeccanica.*

Menegoni, N., Meisina, C., Perotti, C., Crozi, M. 2018. Analysis by UAV digital photogrammetry of folds and related fractures in the Monte Antola flysch formation (Ponte Organasco, Italy). *Geosciences* 8: 299-314.

doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences8080299>

Merritt, A.H. 1972. Geologic prediction for underground excavations. V: Lane, K.S. (ur.), Garfield, L.A. (ur.). *Proceedings: North American Rapid Excavation & Tunneling Conference*, New York. Chicago, Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. *Petrolm Engrs*: p. 115–132.

Micheletti, N., Chandler, J.H., Lane, S.N. 2015. Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. V: Cook, S.J. (ur.), Clarke, L.E. (ur.), Nield, J.M. (ur.). *Geomorphological Techniques (Online Edition)*, London, UK: British Society for Geomorphology: 12 str.

https://www.geomorphology.org.uk/geomorph_techniques

Milne, D. 2007. Problems with rock classification for empirical and numerical design. V: *Proceedings of the International Workshop on Rock Mass Classification in Underground Mining*, NIOSH Information Circular IC9498: p. 111-188.

Morales, T., Etxebarria, G., Uriarte, G., Valderrama, I. 2004. Geomechanical characterization of rock masses in Alpine region: the Basque Arc (Basque-Cantabrian basin, Northern Spain). *Eng. Geol.* 71: 343-362.

doi: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00160-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00160-1)

Mozetič, B. 2004. Terestrično 3D (trirazsežno) lasersko skeniranje. *Geod. vestn.* 48: 351–362.

Müller, L. 1978. Removing misconceptions on the new Austrian tunnelling method. *Tunn. Tunn. Int.*: 29-32.

Nourani, M.H., Moghadder, M.T., Safari, M. 2017. Classification and assessment of rock mass parameters in Choghart iron mine using P-wave velocity. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 9: 318–328.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.irmge.2016.11.006>

Niederheiser, R., Mokroš, M., Lange, J., Petschko, H., Prasicek, G., Elberink, S.O. 2016. Deriving 3D point clouds from terrestrial photographs – Comparison of different sensors and software. V: *ISPRS Congress, 12 – 19 July, 2016. Prague, Czech Republic. Int. Arch. Photogramm.*: XXIII XLI-B5: 685-692.

doi: [10.5194/isprsarchives-XLI-B5-685-2016](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-685-2016)

Ocepek, D. 2004. Projektiranje globokih vkopov v spremenljivih geološko - geomehanskih pogojih. V: *Razprave četrtega posvetovanja slovenskih geoteknikov, Rogaška Slatina, 9. - 11. junij 2004. Rogaška Slatina, SloGED*: 135–146.

Ogrin, D. 1996. Podnebni tipi v Sloveniji. *Geogr. Vestn.* 68: 39–56.

Olariu, M.I., Fergusson, J.F., Aiken, C.L.V., Xu, X. 2008. Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: deep water Jackfork sandstone at Big Rock Quarry, Arkansas. *Geosphere* 4: 247-259.

doi: <https://doi.org/10.1130/GES00139.1>

Olsen, M.J., Wartman, J., McAlister, M., Mahmoudabadi, H., O'Banion, M.S., Dunham, L., Cunningham, K. 2015. To fill or not to fill: sensitivity analysis of the influence of resolution and hole filling on point cloud surface modelling and individual rockfall event detection. *Remote Sens.* 7: 12103-12134.

doi: <https://doi.org/10.3390/rs70912103>

Oppikofer, T., Bunkholt, H.S., Fischer, L., Saintor, A., Hermanns, R.L., Carrea, D., Longchamp, C., Derron, M.-H., Michoud, C., Jaboyedoff, M. 2012. Investigation and monitoring of rock slope instabilities in Norway by terrestrial laser scanning. V: Eberhardt, E. (ur.), Froese, C. (ur.), Turner, K. (ur.), Leroueil, S. (ur.), Landslides and Engineered Slopes. Protecting Society Through Improved Understanding, Taylor & Francis Group: p. 1235-1241.

Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Bilkra, L., Derron, M.H., Metzger, R. 2009. Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning. *Nat. Hazards Syst. Sci.* 9: 1003-1019.

doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1003-2009>

Otoničar, B., 2007. Upper Cretaceous to Paleogene Forbulge Unconformity Associated with Foreland Basin Evolution (Kras, Matarsko podolje and Istria; SW Slovenia and NW Croatia). V: Time in Karst, Postojna, 14. - 18. marec 2007. Postojna: p. 101–120.

Pacher, F. 1975. The development of the New Austrian Tunnelling Method and the main features in design work and construction. V: Proceedings of the 16th U.S. Symposium on Rock Mechanics: p. 223-232.

Palmstrøm, A. 1995. RMI – a rock mass characterization system for rock engineering purposes. Doctoral Thesis, Oslo, Norway, University of Oslo, Faculty of mathematics and natural sciences (samozaložba A. M. Palmstrøm): 400 f.

Pavšič, J., Peckmann, J. 1996. Stratigraphy and sedimentology of the Piran flysch area (Slovenia). *Ann. Ser. Hist. Nat.* 9: 123–138.

Pawluszek, K., Borkowski, A., Tarolli, P. 2018. Sensitivity analysis of automatic landslide mapping: numerical experiments towards the best solution. *Landslides* 15: 1851-1865.

doi: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0986-0>

Pedrazzini, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Pons, I., Guell, M., Chantry, R., Stampfli, E. 2010. Assessment of rockslide and rockfall problems in an active quarry: case study of the Arvel Quarry (Western Switzerland). V: ISRM International Symposium – EUROCK 2010, Lausanne, Switzerland, 15-18 June 2010. ISRM: p. 593-596.

Penasa, L., Franceschi, M., Preto, N., Teza, G., Polito, V. 2014. Integration of intensity textures and local geometry descriptors from Terrestrial Laser Scanning to map chert in outcrops. *ISPRS J. Photogramm.* 93: 88-97.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.04.003>

Pepe, G., Piazza, M., Cevasco, A. 2015. Geomechanical characterization of a highly heterogeneous flysch rock mass by means of the GSI method. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 74: 465–477.

doi: <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0642-4>

Pesci, A., Teza, G., Ventura, G. 2008. Remote sensing of volcanic terrains by terrestrial laser scanner: preliminary reflectance and RGB implications for studying Vesuvius crater (Italy). *Ann. Geophys. - Italy* 51: 633-653.

doi: <https://doi.org/10.4401/ag-4455>

Peterman, V. 2018. Photogrammetric monitoring of the Potoška Planina landslide. V: Jemec Auflič, M., Mikoš, M., Verbovšek, T. (urs.). *Advances in Landslide research: Proceedings of the 3rd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic Balkan Region, Ljubljana, Slovenia, 11-13 October 2017.* Ljubljana, Geološki zavod Slovenije: p. 43-46.

Pfeifer, N., Briese, C. 2007. Geometrical aspects of Airborne Laser Scanning and Terrestrial Laser Scanning. V: IAPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52, 2007; ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, Finland, September 12-14, 2007. Espoo, Finland: p. 311–319.

Piermattei, L. 2016. The use of Structure from Motion technologies for high-resolution terrain modelling on high altitude catchments. Doctoral Thesis, Padova, Italy, Università degli studi di Padova, Dipartimento Curtin University of Technology (samozaložba L. Piermattei): VI+ 133 f.

Placer, L., Vrabec, M., Celarc, B. 2010. The bases for understanding of the NW Dinarides and Istria peninsula tectonics. *Geologija* 53/1: 55–86.
doi: [10.5474/geologija.2010.005](https://doi.org/10.5474/geologija.2010.005)

Placer, L. 2007. Kraški rob: Geološki prerez vzdolž AC Kozina - Koper. *Geologija* 50: 29-44.

Placer, L. 2005. Strukturne posebnosti severne Istre. *Geologija* 48: 245–251.

Placer, L., Kosir, A., Popit, T., Smuc, A., Juvan, G. 2004. The Buzet Thrust Fault in Istria and overturned carbonate megabeds in the Eocene flysch of the Dragonja Valley (Slovenia). *Geologija* 48/2: 193–198.
doi: [10.5474/geologija.2004.015](https://doi.org/10.5474/geologija.2004.015)

Pleničar, M., Polšak, A., Šikić, D. 1969. Osnovna geološka karta SFRJ. L 33-88, Trst (Trieste) [kartografsko gradivo], 1:100 000. Beograd: Zvezni geološki zavod.

Popiolek, S., Sala, H., Thiel, K. 1993. Geotechnical flysch rock mass classification (KF). V: Thiel, K. (ur.), Zabuski, I. (ur.). Proc. of Seminar on underground structures in complex geological conditions, Swinna Porebba, Poland, Institute of Meteorology and Water Management: p. 27-39.

Rabcewicz, L.v. 1964/65. The new Austrian tunnelling method. *Water Power*, part 1 and 2, November 1964: p. 511-515 and January 1965: p. 19-24.

Ranasooriya, J. 2009. The Reliability of Rock Mass Classification Systems as Underground Excavation Support Design Tools. Doctoral Thesis, Perth, Western Australia, Curtin University of Technology, Faculty of Engineering and Computing (samozaložba J. Ranasooriya): 452 f.

Read, S.A.L., Perrin, N.D., Richards, L. 2000. Assessment of New Zealand Greywacke Rock Masses with the Hoek-Brown Failure Criterion. V: ISRM International Symposium, November 19 – 24, 2000. Melbourne, Australia. International Society for Rock Mechanics: 6 str.

Riegl LMS GmbH 2011. 3D Terrestrial Laser Scanner Riegl VZ-400: General Description and Data Interfaces. Riegl GmbH: 462 str.

Riquelme, A.J., Abellan, A., Tomas, R., Jaboyedoff, M. 2014. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Comput. Geosci.* 68: 38-52.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>

Romana, M. 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. V: Int. Symp. on the role of rock mechanics ISRM, Zacatecas: p. 49-53.

Rožič, B., Verbovšek, T., Vrabec, M. 2014. Povzetki in ekskurzije / Abstracts and field trips. V: 4. slovenski geološki kongres, Ankaran, 8.-10. oktober 2014. Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana.

Saroglou, H. 2013. Engineering behaviour of anisotropic and heterogeneous layered rocks. V: Wu, F. (ur.), Shengwen, Q. (ur.). Proc. of IAEG Conf. "Global View of Engineering Geology and the Environment." CRC Press: p. 721–731.

doi: [10.1201/b15794-116](https://doi.org/10.1201/b15794-116)

Schürch, P., Densmore, A.L., Rosser, N.J., Lim, M., McArdell, B.W. 2011. Detection of surface change in complex topography using terrestrial laser scanning: application to the Illgraben debris-flow channel. Earth Surf. Process. Landf. 36: 1847-1859.

doi: [10.1002/esp.2206](https://doi.org/10.1002/esp.2206)

Seers, T.D. in Hodgetts, D. 2013. Comparison of digital outcrop and conventional data collection approaches for the characterization of naturally fractured reservoir analogues. Geol. Soc. Lond. Spec. Pub. 374: 51-77.

doi: [10.1144/SP374.13](https://doi.org/10.1144/SP374.13)

Serafim, J.L., Pereira, J.P. 1983. Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski. V: Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and Underground Constructions 1. Lisbon, Portugal: pp. 1133–1144.

Setnikar, D. 2007. Terestrični laserski skener – pripomoček za sodobnejši zajem metričnih prostorskih podatkov. V: Kortnik, J. (ur.), Likar, J. (ur.), Jelen, B. (ur.), Hafner, G. (ur.). Posvetovanje rudarskih in geotehniških strokovnjakov ob 40. Skoku čez kožo, Ljubljana, UL NTF OGR in SRDIT: p. 146-151.

SIST EN ISO 14689-1:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Prepoznavanje in razvrščanje kamnin – 1. del: Prepoznavanje in opisovanje (ISO 14689-1:2003) – Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of rock – Part 1: Identification and description (ISO 14689-1:2003).

Slob, S. 2010. Automated rock mass characterisation using 3-D terrestrial laser scanning. Doctoral Thesis. Delft, TU Delft (samozaložba S. Slob): 287 f.

Slob, S., Hack, H.R., Turner, A.K. 2002. An approach to automate discontinuity measurements of rock faces using laser scanning techniques. V: Dinid Da Gama, C. (ur.), Riberia Sousa, E.L. (ur.). ISRM EUROCK 2002; Rock Engineering for Mountainous Region, Funchal, Madeira, Portugal, 25-28 November 2002. Lisbon, Sociedade Portuguesa de Geotecnia: p. 87–94.

Smith, M.W., Carrivick, J.L., Quincey, D.J. 2016. Structure from motion photogrammetry in physical geography. Progr. Phys. Geog. 40, 2: 247-275.

doi: <https://doi.org/10.1177/0309133315615805>

Staiger, R. 2003. Terrestrial Laser Scanning: Technology, Systems and Applications. V: 2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco, December 2-5, 2003. Marrakech, Morocco: 10 str.

Stille, H., Palmström, A. 2003. Classification as a tool in rock engineering. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 18: 331–345.

doi: [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00106-2](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00106-2)

Strunden, J., Ehlers, T.A., Brehm, D., Nettesheim, M. 2015. Spatial and temporal variations in rockfall determined from TLS measurements in a deglaciated valley, Switzerland. J. Geophys. Res. Earth Surf. 120: 1251-1273.

doi: <https://doi.org/10.1002/2014JF003274>

Sturzenegger, M. 2010. Multi-scale characterization of rock mass discontinuities and rock slope geometry using terrestrial remote sensing techniques. Doctoral Thesis, Burnaby, BC, Canada, Simon Fraser University (samozaložba M. Sturzenegger): 343 f.

Sturzenegger, M., Stead, D. 2009. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Eng. Geol.* 106: 163–182.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004>

Sturzenegger, M., Yan, M., Stead, D., Elmo, D. 2007. Applications and limitations of ground-based laser scanning in rock slope characterization. V: Eberhardt, E. (ur.), Stead, D. (ur.), Morrison, T. (ur.). *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands, Two Volume Set: Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, 27–31 May 2007.* Vancouver, American Rock Mechanics Association: str. 29-36.

Tavani, S., Corradetti, A., Billi, A. 2016. High precision analysis of an embryonic extensional fault-related fold using 3D orthorectified virtual outcrops: The viewpoint importance in structural geology. *J. Struct. Geol.* 86: 200-210.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.03.009>

Telling, J., Lyda, A., Hartzell, P., Glennie, C. 2017. Review of Earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth-Sci. Rev.* 169: 35–68.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.007>

Terzaghi, K. 1946. *Rock Defects and Loads on Tunnel Supports.* Harvard University, Graduate School of Engineering: 95 str.

Teza, G., Pesci, A., Genevois, R., Galgaro, A. 2008. Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanning and strain field computation. *Geomorphology* 97: 424-437.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.09.003>

Tonini, M., Abellan, A. 2014. Rockfall detection from terrestrial LiDAR point clouds: a clustering approach using R. *J. Spat. Inf. Sci.* 8: 95-110.

doi: [10.5311/JOSIS.2014.8.123](https://doi.org/10.5311/JOSIS.2014.8.123)

Traveletti, J., Oppikofer, T., Delacourt, C., Malet, J.P., Jaboyedoff, M. 2008. Monitoring landslide displacements during a controlled rain experiment using a long-range terrestrial laser scanning (TLS). V: Chen, J. (ur.), Jiang, J. (ur.), Maas, H.-G. (ur.). *Int. Arch. Photogramm.*: Vol. XXXVII, Part B5, Beijing, China, July 3-11, 2008, Beijing, ISPRS: p. 485-490.

Tziallas, G.P., Saroglou, H., Tsiambaos, G. 2013. Determination of mechanical properties of flysch using laboratory methods. *Eng. Geol.* 166: 81–89.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.09.002>

Umili, G., Ferrero, A., Einstein, H.H. 2013. A new method for automatic discontinuity traces sampling on rock mass 3D model. *Comput. Geosci.* 51: 182–192.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.07.026>

Ünal, E. 1996. Modified Rock Mass Classification: M-RMR System. V: *Milestones in Rock Engineering, the Bieniawski Jubilee Collection.* Balkema, Rotterdam: p. 203–223.

Vasuki, Y., Holden, E.-J., Kovesi, P., Micklethwaite, S. 2017. An interactive image segmentation method for lithological boundary detection: A rapid mapping tool for geologists. *Comput. Geosci.* 100: 27-40.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.12.001>

Vasuki, Y., Holden, E.-J., Kovesi, P., Micklethwaite, S. 2014. Semi-automatic mapping of geological structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Comput. Geosci.* 69: 22-32.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.04.012>

Verbovšek, T., Košir, A., Teran, M., Zajc, M., Popit, T. 2017. Volume determination of the Selo landslide complex (SW Slovenia): integrating field mapping, ground penetrating radar and GIS approaches. *Landslides* 14: 1265-1274.

doi: [10.1007/s10346-017-0815-x](https://doi.org/10.1007/s10346-017-0815-x)

Verma, A.K., Bourke, M.C. 2019. A method based on structure-from-motion photogrammetry to generate sub-millimetre-resolution digital elevation models for investigating rock breakdown features. *Earth Surf. Dynam.* 7: 45-66.

doi: [10.5194/esurf-7-45-2019](https://doi.org/10.5194/esurf-7-45-2019)

Vosselman, G., Maas, H.G. 2010. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing: XVII+318 str.

Vrabec, M., Jordanova, G. 2017. Analysis of systematic fracturing in Eocene flysch of the Slovenian coastal region. *Geologija* 60/2: 199–210.

doi: [10.5474/geologija.2017.014](https://doi.org/10.5474/geologija.2017.014)

Wang, X., Zou, L., Shen, X., Ren, Y., Qin, Y. 2017. A region-growing approach for automatic outcrop fracture extraction from a three-dimensional point cloud. *Comput. Geosci.* 99: 100-106.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.11.002>

Waltham, T. 2009. *Foundations of Engineering Geology, Third Edition*. Taylor & Francis: 104 str.

Weber, J., Vrabec, M., Pavlovčič-Prešeren, P., Dixon, T., Jiang, Y., Stopar, B. 2010. GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and Po Plain sites, and geodynamic implications. *Tectonophysics* 483: 214–222.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.09.001>

Wenzel, K., Rothermel, M., Fritsch, D., Haala, N. 2013. Image acquisition and model selection for multi-view stereo. *Int. Arch. Photogramm.*: 251-258.

doi: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-251-2013>

Wickham, G.E., Tiedemann, H.R., Skinner, E.H. 1972. Support determination based on geologic predictions. V: Lane, K.A. (ur.), Garfield, L.A. (ur.). *Proceedings of the North American Rapid Excavation & Tunnelling Conference, Chicago*. New York, Soc. Min. Engrs. Am. Inst. Min. Metall. Petrolm. Engrs: p. 43-64.

Wilkinson, M.W., Jones, R.R., Woods, C.E., Gilment, S.R., McCaffrey, K.J.W., Kokkalas, S., Long, J.J. 2016. A comparison of terrestrial laser scanning and structure from motion photogrammetry as methods for digital outcrop acquisition. *Geosphere* 12, 6: 1-16.

doi: <https://doi.org/10.1130/GES01342.1>

Wood, D.F. 1991. Estimating Hoek-Brown rock mass strength parameters from rock mass classifications. *Transp. Res. Rec.* 1330: 22-29.

Zainab, M., Kamaruzaman, M., Cho, G.-C. 2007. Uniaxial compressive strength of composite rock material with respect to shale thickness ratio and moisture content. *Electron. J. Geotech. Eng.* 13, Bund. A: 10 str.

Zeeb, C., Gomez-Rivas, E., Bons, P.D., Blum, P. 2013. Evaluation of sampling methods for fracture network characterization using outcrops. *AAPG Bulletin* 97, 9: 1545-1566.
doi: [10.1306/02131312042](https://doi.org/10.1306/02131312042)

Zhang, L., Einstein, H.H. 1998. End bearing capacity of drilled shafts in rock. *J. Geotech. Geoenviron.* 12: 574-585.
doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:7\(574\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:7(574))

Žibret, L., Žibret, G. 2014. Use of geomorphological indicators for the detection of active faults in southern part of Ljubljana moor, Slovenia. *Acta Geogr. Slov.* 54, 2: 271-291.
doi: [10.3986/AGS54203](https://doi.org/10.3986/AGS54203)

Živec, T., Anžur, A., Verbovšek, T. 2019. Determination of rock type and moisture content in flysch using TLS intensity in the Elerji quarry (south-west Slovenia). *Bull. Eng. Geol. Environ.* 78/3: 1631-1643.
doi: <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1245-2>

3G Software & Measurements GmbH. 2010. ShapeMetriX 3D User manual for version 3.5. 3GSM GmbH, Graz: 168 str.

SEZNAM PRILOG

Priloga A.1: Ročni geološki popisi izkopnega čela v predoru Markovec

Priloga A.2: Ročni geološki popisi izkopnega čela v podzemni garaži Park San Giusto

Priloga A.3: Ročni geološki popisi izkopnega čela v kamnolomu Elerji

Priloga A.4: Detajlni litološki profil iz kamnoloma Elerji

Priloga A.1: Ročni geološki popisi izkopnega čela v predoru Markovec

Priloga A.2: Ročni geološki popisi izkopnega čela v podzemni garaži Park San Giusto

Priloga A.3: Ročni geološki popisi izkopnega čela v kamnolomu Elerji

Priloga A.4: Detajlni litološki profil iz kamnoloma Elerji