

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE GEODEZIJA IN GEOINFORMATIKA

Ljubljana, 2021

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Magistrsko delo št.:

Master thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.7/.8:551.435.83(497.4)(043.3)
Avtor:	Jure Črček, dipl. inž. geod. (VS)
Mentor:	doc. dr. Aleš Marjetič, univ. dipl. inž. geod.
Somentor:	asist. dr. Klemen Kregar, univ. dipl. inž. geod.
Naslov:	Primerjava BLK360 in Riegl VZ-400 za skeniranje jam
Tip dokumenta:	magistrsko delo
Obseg in oprema:	554 str., 16 pregl., 45 sl.
Ključne besede:	terestrično lasersko skeniranje, Leica BLK360, Riegl VZ-400, Leica Cyclone 3DR, Leica REGISTER 360, RiSCAN PRO, registracija, georeferenciranje, oblak točk

Izvleček

Z razvojem terestričnih laserskih skenerjev (TLS) se je izdelava 3D-modelov kraških jam zelo poenostavila, saj laserski skenerji v krajšem času omogočajo več zajetih točk. S tem so se povečale tudi natančnost, hitrost in gostota zajetih točk.

Z novejšima laserskima skenerjema Leica BLK360 in Riegl VZ-400 smo izmerili Planinsko in Skedneno jamo, kjer smo s pomočjo GNSS-instrumenta in klasičnih meritev določili oslonilne in vezne točke. Na osnovi teh smo pozneje izvedli registracijo in georeferenciranje oblakov točk, zajetih z obema laserskima skenerjema. V okviru magistrske naloge smo na koncu izvedli analizo oziroma primerjavo omenjenih laserskih skenerjev, in sicer smo primerjali natančnost, doseg, hitrost, gostoto in zahtevnost na terenu. S primerjavo smo zbrali prednosti in slabosti obeh laserskih skenerjev in določili, kateri inštrument je najbolje uporabiti v kraškem svetu.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 528.7/.8:551.435.83(497.4)(043.3)
Author: Jure Črček, B.Sc.
Supervisor: Assoc. Prof. Aleš Marjetič, Ph.D.
Co-supervisor: Assist. Klemen Kregar, Ph.D.
Title: Comparison of BLK360 and Riegl VZ-400 for cave scanning
Document type: Master's thesis
Notes: 55 p., 16 tab., 45 fig.
Keywords: terrestrial laser scanning, Leica BLK360, Riegl VZ-400, Leica Cyclone 3DR, Leica REGISTER 360, RiSCAN PRO, registration, georeferencing, point cloud

Abstract

With the development of terrestrial laser scanners (TLS), the production of 3D models of karst caves has become very simplified, as laser scanners allow more captured points in a shorter time. This also increased the accuracy, speed and density of the captured points.

With the newer laser scanners Leica BLK360 and Riegl VZ - 400, we measured Planinska cave and Skednena cave, where we determined the support and connection points, with the help of a GNSS instrument and classic measurements. Based on these, we later performed registration and georeferencing of point clouds, captured by both laser scanners. As part of the master's thesis, we carried out an analysis and comparison between the aforementioned laser scanners, where we compared accuracy, range, speed, density and complexity in the field. By comparison, we gathered the advantages and disadvantages of both laser scanners and determined which instrument is best suited for use in the karst world.

»Ta stran je namenoma prazna.«

ZAHVALA

Najlepše hvala mentorju doc. dr. Aleš Marjetič in somentorju asist. dr. Klemen Kregar za vso pomoč, nasvete in strokovni pregled magistrske naloge.

Zahvaljujem se tudi vsem sošolcem za pomoč v času magistrskega študija, brez vas mi ne bi uspelo.

Hvala tudi vsem mojim in tebi Nuša, za vso vzpodbudo in podporo v času študija. Hvala, da ste verjeli vame.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAFIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	V
ZAHVALA.....	VII
1 UVOD.....	1
1.1 Namen	1
1.2 Zgodovinski zajem jam s TLS	2
1.3 eKataster jam.....	3
1.4 Skednena jama.....	3
1.5 Planinska jama	6
2 METODE	8
2.1 Zagotovitev koordinatne osnove	8
2.2 Klasična metoda izmere	8
2.3 Terestrično lasersko skeniranje	8
3 INSTRUMENTARIJ IN PRIBOR	10
3.1 Laserski skener Leica BLK360	10
3.2 Laserski skener Riegl VZ-400.....	12
3.3 Primerjava Leica BLK360 in Riegl VZ-400 — teoretično	14
3.4 Oprema za vzpostavitev koordinatne osnove.....	16
3.4.1 GNSS-sprejemnik Leica Viva GS18.....	16
3.4.2 Tahimeter Leica Viva TS15	17
3.4.3 Tarče in prizma.....	18
4 TERENSKO DELO	20
4.1 Rekognosciranje terena	20
4.2 Zajem s terestričnima laserskima skenerjema	20
5 PROGRAMSKA OPREMA.....	22
5.1 Leica Cyclone REGISTER 360.....	22
5.2 Leica Cyclone 3DR	22
5.3 RiSCAN PRO.....	22
6 REZULTATI	24
6.1 Planinska jama	24
6.1.1 Registracija Leica BLK360.....	24

6.1.2	Georeferenciranje Leica BLK360	25
6.1.3	Registracija in georeferenciranje Riegl VZ-400.....	27
6.1.4	Natančnost.....	30
6.1.5	Hitrost laserskih skenerjev	31
6.1.6	Doseg.....	33
6.1.7	Zahtevnost na terenu	35
6.2	Skednena jama.....	36
6.2.1	Georeferenciranje	36
6.2.2	Natančnost.....	37
6.2.3	Hitrost laserskih skenerjev	39
6.3	Primerjava hitrosti laserskega skenerja Leica BLK360 in Riegl VZ-400.....	40
6.4	Rezultati georeferenciranja	41
6.5	Primerjava oblakov točk s programom Cyclone 3DR.....	44
6.5.1	Planinska jama.....	44
6.5.2	Skednena jama.....	46
7	IZDELAVA PRELETA JAME.....	48
7.1	Planinska jama	48
7.2	Skednena jama.....	49
8	ZAKLJUČEK.....	51
9	VIRI.....	53

KAZALO SLIK

Slika 1: Jame v Sloveniji ter z zelenimi kvadrati označene jame, odkrite v letu 2021 [7].....	3
Slika 2: Prikaz lokacije Skednene jame [8].....	4
Slika 3: Izris načrta jame leta 1937 [7].....	5
Slika 4: Prikaz 3 – razsežnostnega prostora Skednene jame [9]	5
Slika 5: Prikaz lokacije Planinske jame [8].....	6
Slika 6: Karta Planinske jame [6].....	7
Slika 7: Leica BLK360 [15].....	11
Slika 8: Podroben opis laserskega skenerja [15].....	11
Slika 9: Riegl VZ-400	13
Slika 10: Podroben opis laserskega skenerja Riegl VZ-400 [17].....	14
Slika 11: Leica Viva GS18.....	16
Slika 12: Tahimeter Leica Viva TS15 [18]	17
Slika 13: Prizma Leica GRZ4 360°	18
Slika 14: Tarča za laserske skenerje.....	18
Slika 15: Cilindrična tarča ali »valj«.....	19
Slika 16: Vhod v Planinsko jamo	20
Slika 17: Povezave med stojišči	24
Slika 18: Primer stojišča, registracija in razdalja med dvema stojiščema	25
Slika 19: Grafičen prikaz uporabljenih oslonilnih točk za georeferenciranje	26
Slika 20: Oslonilna tarča na steni jame (ročno georeferenciranje).....	27
Slika 21: Prikaz skenerja na prvem stojišču in vezne/oslonilne točke (rdeče).....	28
Slika 22: Shema - registracija in georeferenciranje v programu RiSCAN PRO [16]	28
Slika 23: Primer matrike SOP iz drugega stojišča	29
Slika 24: Prikaz skupne ocene pogreška natančnosti	30
Slika 25: Seznam veznih točk s koordinatami in natančnostjo v globalnem koordinatnem sistemu	31
Slika 26: Natančnost vklopa na vezne točke na prvem stojišču.....	31
Slika 27: Maksimalna oddaljenost točke pri skeniranju z Leica BLK360 – viden rob dosega skenerja 60 m.....	34
Slika 28: Minimalna (1,408 m) in maksimalna (442,716 m) dosežena razdalja v Planinski jami	35
Slika 29: Stojišče pod varovano ograjo.....	36
Slika 30: Grafičen prikaz podanih oslonilnih točk na severnem vhodu Skednene jame.....	37
Slika 31: Prikaz skupne ocene pogreška natančnosti	38
Slika 32: Natančnost skeniranja z instrumentom Riegl VZ-400	38
Slika 33: Največja razdalja med stojišči	40
Slika 34: Severni vhod v Skedneno jamo z označenimi oslonilnimi točkami.....	41
Slika 35: Južni vhod v Skedneno jamo z označenimi oslonilnimi točkami	42

Slika 36: Napake pri georeferenciranju z dveh strani (vijolična barva – avtomatsko georeferenciranje, rdeča barva – ročno georeferenciranje)	43
Slika 37: Razdalje med oblakoma točk Planinske jame VZ-400 in BLK360	44
Slika 38: Konec Planinske jame in razlike med dvema oblakoma.....	45
Slika 39: Največje odstopanje med obema skenerjema (do 10 cm – rdeča barva)	46
Slika 40: Razlike med oblakoma točk Skednene jame Riegl VZ-400 in BLK360	46
Slika 41: Izrezovanje nepotrebnih točk	48
Slika 42: Določanje linij poti kamere Planinske jame	49
Slika 43: Nastavitev animacije v programu Cyclone 3DR (Planinska jama).....	49
Slika 44: Določanje linij poti kamere Skednene jame	49
Slika 45: Nastavitev animacije v programu Cyclone 3DR (Skednena jama).....	50

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Podatki o Skedneni jami [7]	4
Preglednica 2: Podatki o Planinski jami [7]	6
Preglednica 3: Tehnične lastnosti laserskega skenerja Leica BLK360 [15]	10
Preglednica 4: Tehnične lastnosti laserskega skenerja Riegl VZ-400 [16]	12
Preglednica 5: Tehnični podatki Leica Viva GS18 [25]	16
Preglednica 6: Tehnični podatki Leica Viva TS15 [18]	17
Preglednica 7: Odstopanje oslonilnih točk	25
Preglednica 8: Koordinate oslonilnih točk v D96/TM koordinatnem sistemu	29
Preglednica 9: Koordinate oslonilnih točk in odstopanja točk po transformaciji	29
Preglednica 10: Število posnetih točk iz enega stojišča na 1 minuto	32
Preglednica 11: Število posnetih točk iz enega stojišča na 1 minuto	33
Preglednica 12: Odstopanje oslonilnih točk	36
Preglednica 13: Število posnetih točk iz enega stojišča na 1 minuto	39
Preglednica 14: Ročno izbrane koordinate tarč, georeferenciranje na severni in južni strani jame	42
Preglednica 15: Odstopanje po koordinatah	42
Preglednica 16: Koordinate v primeru vklopa na vse oslonilne točke	43

»Ta stran je namenoma prazna.«

KRATICE

3D	tridimenzionalni prostor
GLCS	globalni koordinatni sistem (angl. Global coordinate system)
GNSS	globalni navigacijski satelitski sistem (angl. Global Navigation Satellite System)
POP	transformacijska matrika med PRCS in GLCS
PRCS	projektni koordinatni sistem (angl. Project coordinate system)
SOCS	lastni koordinatni sistem skenerja (angl. Scanner own coordinate system)
SOP	transformacijska matrika med SOCS in PRCS
TLS	terestrično lasersko skeniranje

»Ta stran je namenom prazna.«

1 UVOD

Kraške jame predstavljajo pomembno slovensko znamenitost. Večina jih v Sloveniji nastane v kraških tleh, ki so iz apnenca. Običajno so jame v obliki brezna ali pa vodoravne. Brezna nastanejo s širitvijo razpok, ki jo povzročajo površinske vode, medtem ko vodoravne kraške jame nastanejo pod vplivom korozije s pretakanjem podzemnih rek. Ločimo vodne jame, v katerih še vedno tečejo reke, in suhe jame, ki so se dvignile nad nivo vode.

Vse jame so zavarovane z Zakonom o varstvu podzemnih jam in predstavljajo naravne vrednote državnega pomena in naravno javno dobro ter so v lasti države. Po 5. členu tega Zakona jame in javna infrastruktura niso v pravnem prometu [1]. Določene so kot ekološko pomembno območje ali posebno varstveno območje.

V Sloveniji je trenutno registriranih 14.200 kraških jam. Vsako leto jih odkrijejo približno 500, zato nekateri jamarji trdijo, da imamo v Sloveniji preko 30.000 jam. Med registrirane jame spada tudi Planinska jama, ki se nahaja v občini Postojna na južnem robu Planinskega polja. Za Planinsko jamo velja, da v njej živi znan endemit človeška ribica.

Zgodovina pravi, da so prve skice jame narisali v kameni dobi, kjer so s prostoročnim risanjem prikazali svoje izkušnje. Z iznajdbo merilnih sistemov je vse skupaj postalo bolj natančno. Uporabljali so merske trakove, kompase in klinometre. Z uporabo teodolitov se je natančnost še povečala, saj se da določiti tudi 3D-model jame (X , Y in Z koordinate), vendar bi bil postopek zelo dolgotrajen. Z razvojem terestričnega laserskega skenerja se je vse skupaj poenostavilo, saj omogoča zajem oblaka točk, kjer lahko zelo natančno merimo tudi detajle. Razlika med teodolitom in terestričnim laserskim skenerjem (TLS) je predvsem v hitrosti in gostoti zajema točk, saj lahko v zelo kratkem času zajamemo večje število točk.

1.1 Namen

Sodobni geodetski instrumenti nam omogočajo, da lahko v kratkem času zajamemo velik oblak točk. Metode zajema so se skozi zgodovino geodezije spreminjale, vendar so se z razvojem novejših tehnologij močno povečale natančnost, hitrost in gostota zajetih točk. To nam omogočajo robotski instrumenti in tako bomo v magistrski nalogi združili klasično metodo geodezije in terestrično lasersko skeniranje.

Z obiskom določenih jam bomo izdelali 3D-model, kjer bomo primerjali dva različna skenerja: kateri dosega boljšo natančnost, hitrost, gostoto oblaka točk, doseg in s katerim lažje dosežemo zastavljeni cilj glede na zahtevnost terena.

Cilj magistrske naloge je:

- primerjava dveh geodetskih terestričnih laserskih skenerjev Riegl VZ-400 in Leica BLK360,

- izvesti georeferenciranje s pomočjo oslonilnih točk, izmerjenih s klasično geodetsko metodo,
- izvesti združen oblak točk obeh laserskih skenerjev.

1.2 Zgodovinski zajem jam s TLS

Lasersko skeniranje se je pričelo že v drugi polovici 20. stoletja, ko so poskusili skenirati različne kraje in predmete. Tako je prva slika zajema nastala v 60. letih prejšnjega stoletja, ko so bili skenerji sestavljeni iz luči, kamer in projektorjev. Pozneje so jih zamenjali skenerji, ki so uporabljali belo svetlobo, laserje in senčenje. Skeniranje jam z laserskimi skenerji (TLS) ima zelo dolgo zgodovino. Prva skeniranja so se pojavila v Španiji, natančneje v jami Altamira. Projekt je bil izveden z laserskim skenerjem Minolta, med leti 1988 in 2001. Projekt je bil precej obsežen, saj je bil laser omejenega dosega optičnega bralnika [2]. Po nekaj letih, natančneje leta 1999 se je v 3D-obliki posnela še jama Cap Blanc v Franciji [3]. Sledilo je vse več projektov, na podlagi katerih so lahko naredili natančne 3D-modele ter vodoravne in navpične prereze [4]. Avtorji so sklenili, da ni zadovoljivo, da se geometrija jame predstavi samo s slikovno metodo, zato so v letu 2005 uporabili prikaz z digitalnim modelom višin DEM [5 in 34]. Z uporabo TLS lahko dobimo pomembne informacije za [6]:

- določanje velikosti posameznih dvoran,
- izračun volumna,
- izdelavo 3D-modelov,
- arheološke in geomorfološke aplikacije,
- prelet skozi 3D-model,
- raziskovanje strukturnih in hidrogeoloških značilnosti kamnin v jamah.

Od leta 1999 do 2003 so skenerje testirali samo za oceno sposobnosti in razvoja novega načina zbiranja podatkov. Skenerji so tako vsako leto postali lažji od prvotnih skenerjev, saj sta njihova velikost in teža zmanjšali. Pozneje se je način skeniranja razvil v načine ustvarjanja modelov, ki lahko natančno prikažejo obliko jame in nam tako omogočajo 3D-vizualizacijo.

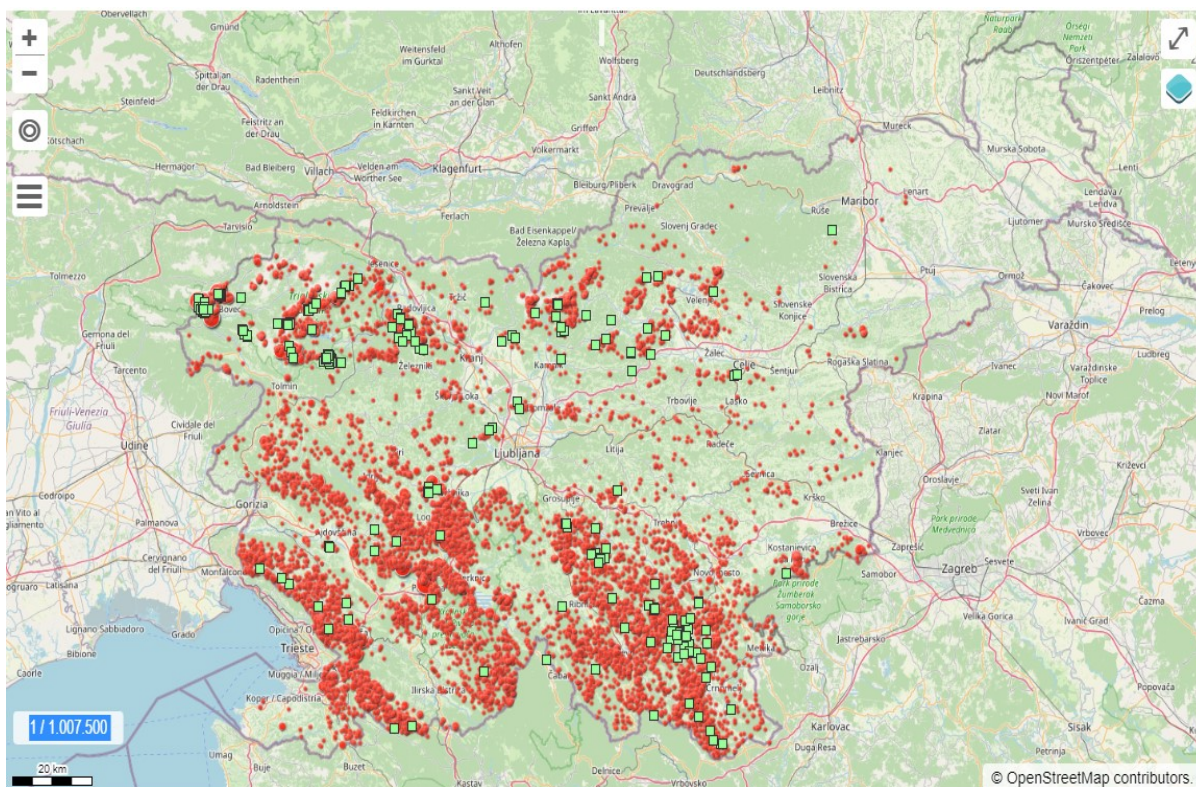
Študije kažejo, da je bilo v preteklosti največ skeniranih jam v Evropi, saj ima tudi večina proizvajalcev sedež podjetja ravno v evropskem prostoru [6].

1.3 eKataster jam

V začetku leta 2006 je v Sloveniji začel delovati prvi spletni kataster jam na svetu, ki ga vzdržuje Društvo za raziskovanje jam Ljubljana (DZRJL) [7]. Jamarji in drugi ljubitelji narave lahko na tem portalu poiščemo podatke in dokumente o jamah.

Portal eKataster jam omogoča, da se lahko novi pridobljeni podatki popravijo in so takoj na razpolago vsem uporabnikom. Omogoča neposredno iskanje jam, možnost preverjanja zabeležene lege jam, uporabo lidarskih posnetkov in ortofoto posnetkov, določanje koordinat jam in neposredno shranjevanje podatkov o legi jam ter njihovih vhodov.

Na sliki 1 smo prikazali jame, ki so trenutno zavedene v eKatastru jam in so bile na območju Slovenije odkrite do leta 2021. Odkrite jame v letu 2021 so označene z zelenim kvadratom. V sistem se tako vsako leto dodajo na novo odkrite jame, in sicer jih lahko doda vsak registrirani uporabnik.

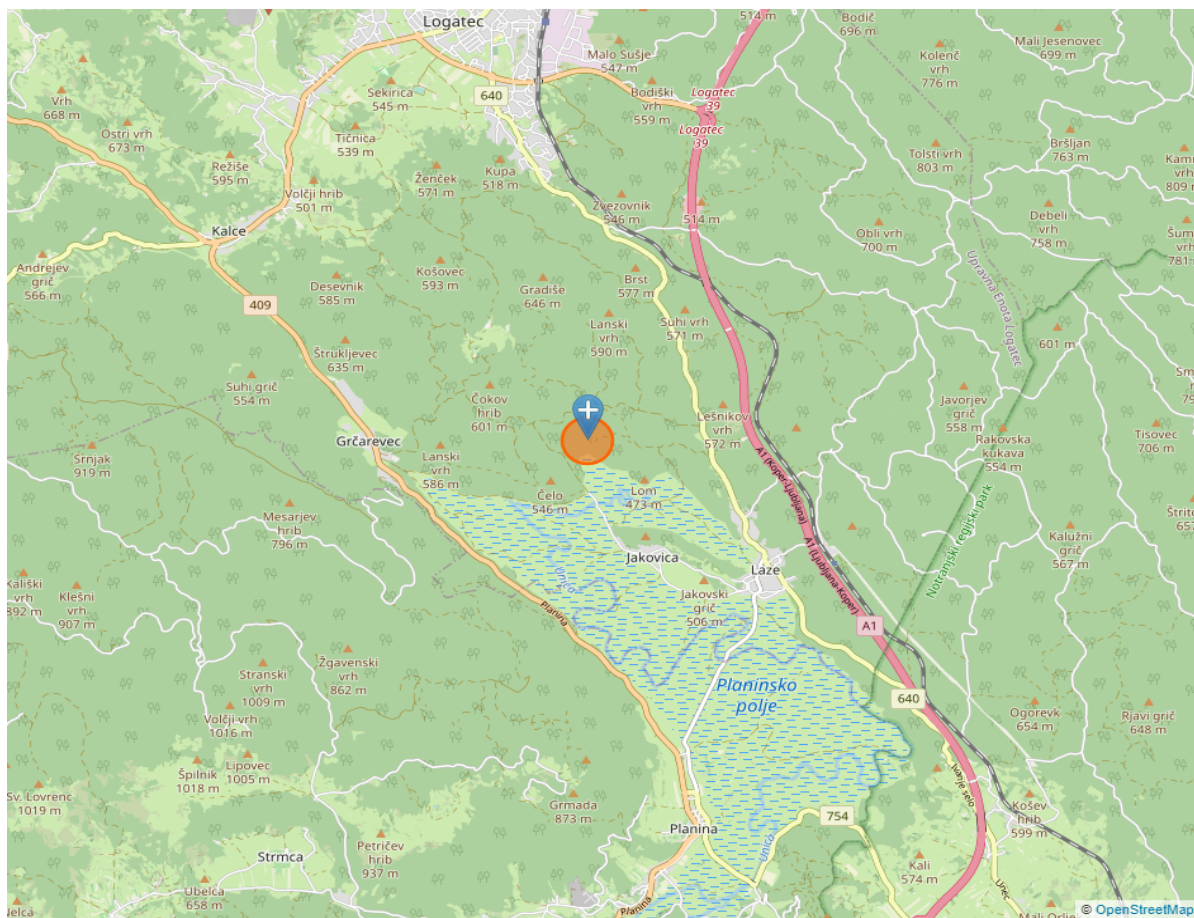


Slika 1: Jame v Sloveniji ter z zelenimi kvadrati označene jame, odkrite v letu 2021 [7]

V nadaljevanju bomo predstavili dve jami, ki ju bomo obdelali v magistrski nalogi. Ker so za vsako od jam na voljo tudi različni podatki, bomo le-te prikazali v preglednicah.

1.4 Skednena jama

Skednena jama se nahaja na Planinskem polju. Dolga je 209 m in široka 30 m. V njej se nahajajo ledeni kapniki in strukturna tla, kar je posledica hladnega zraka, kar povzroči vegetacijski obrat. Skednena jama leži med Logatcem in Planino, kot je razvidno iz slike 2.

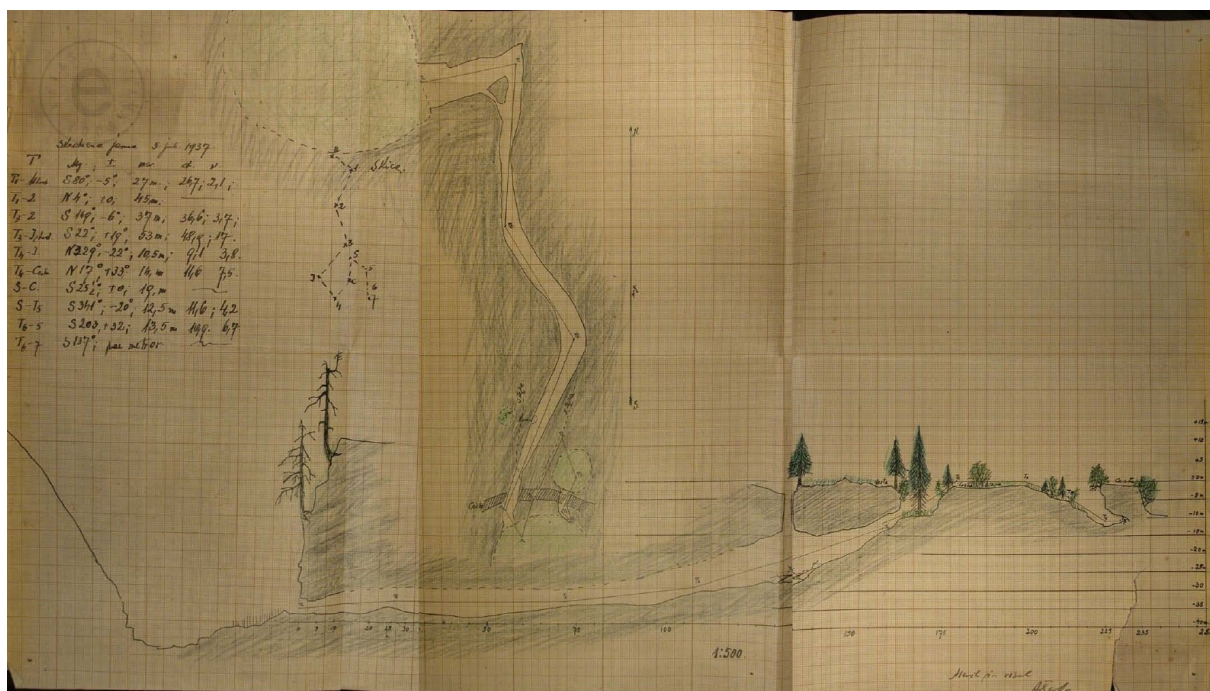


Slika 2: Prikaz lokacije Skednene jame [8]

Preglednica 1: Podatki o Skednjeni jami [7]

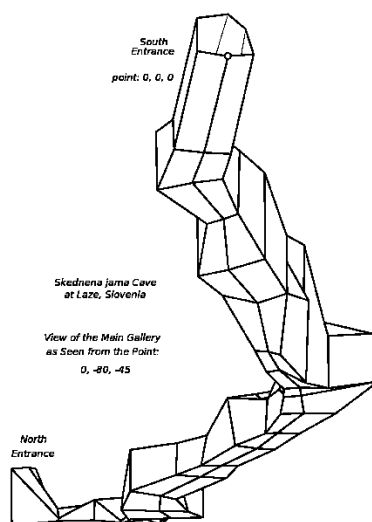
Katastrska številka	224
Ime jame	Skednena jama
Sinonim(-i)	Dreschbodenhohle
Tip jame 1	5.2 – vodoravna jama
Dolžina	209 m
Globina	30 m
Datum odkritja	23. 4. 1933
Organizacija	Društvo za raziskovanje podzemskih jam (Ljubljana)
Turistična jama	NE
DK-48	Y (GK) 441499 ; X (GK) 81424
Kota vhoda (m n.m.)	479
Katastrska občina	Laze
Občina	Logatec
Naselje	Jakovica

Jama je bila odkrita leta 1933, prvotne načrte pa so izrisali že leta 1937, kot je prikazano na sliki 3.



Slika 3: Izris načrta jame leta 1937 [7]

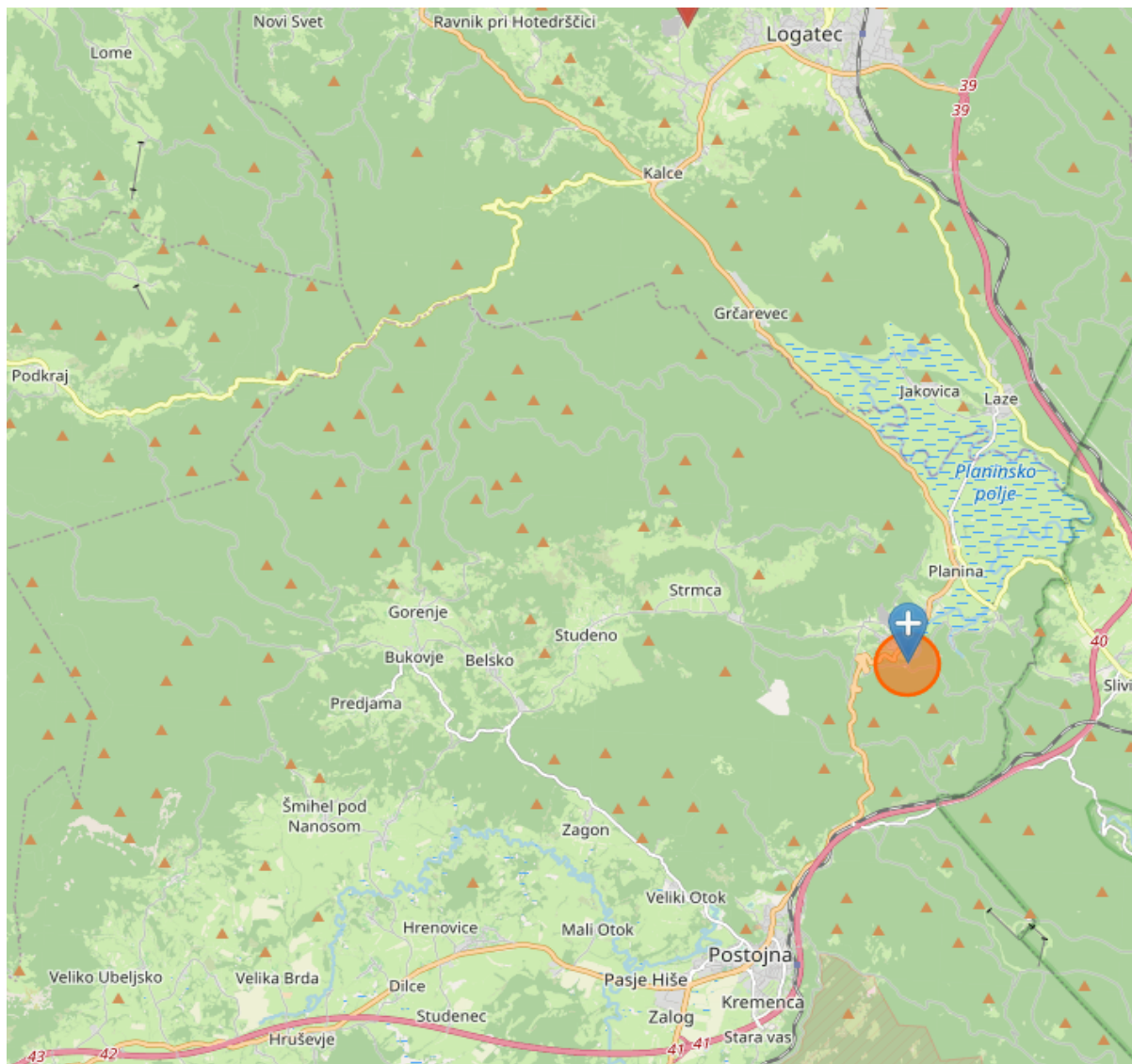
Skednena jama je tudi prva jama pri nas, izmerjena v treh razsežnostih (slika 4). Leta 1979 je bil narejen prvi računalniški program, ki je omogočil izračun prostorskih parametrov jame. Rezultati so pokazali, da je jama dolga 225 m in globoka 31 m [9].



Slika 4: Prikaz 3 – razsežnostnega prostora Skednene jame [9]

1.5 Planinska jama

Planinska jama je bila odkrita leta 1849, ko so se v jamo podali prvi raziskovalci. Odkrili so, da ima jama dva rokava [10]. Jama leži med krajema Planina in Postojna, kot je prikazano na sliki 5.



Slika 5: Prikaz lokacije Planinske jame [8]

Preglednica 2: Podatki o Planinski jami [7]

Katastrska številka	748 VG 106
Ime jame	Planinska jama
Tip jame 1	5.4 – brezno
Tip jame 2	1.1 – jama stalni izvir
Dolžina	6859 m
Globina	65 m

...se nadaljuje

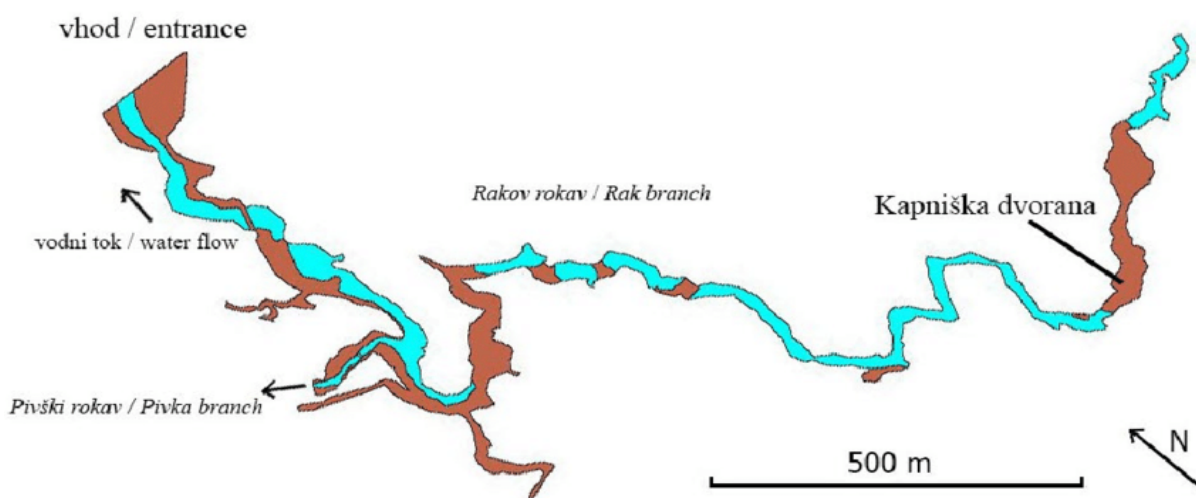
... nadaljevanje preglednice 2

Datum odkritja	1. 1. 1960
Organizacija	Inštitut za raziskovanje krasi ZRC SAZU
Turistična jama	DA
DK-48	Y (GK) 441752 ; X (GK) 75345
Kota vhoda (m n.m.)	453
Katastrska občina	Kačja vas
Občina	Postojna
Naselje	Planina

Planinska jama sodi med najdaljše slovenske vodne jame. Vhod v jamo je v dolini pod približno 65 m visoko pečino, ki se odpira na severnem obrobju Planinskega polja, v bližini naselja Planina. 500 m od vhoda v jamo je sotočje rek Pivke, ki teče iz Postojnskega polja skozi Postojnsko jamo, ter Rake, ki teče iz Rakovega Škocjana (slika 6). Sotočje rek Pivke in Rake spada med največje podzemno sotočje rek v Evropi [11].

Posebnosti jame so kredni apnenci, ki so na delu Planinskega polja narinjeni na zgornje triasne dolomite. Vhodni del jame in Rakov rokav sta razvita v skladovitem apnencu z vložki dolomita in apnenih breč. Stranskih rogov je zelo malo in so zaradi višje lege v glavnem suhi. Reka Pivka je v preteklosti prinesla večje količine jamskih sedimentov, predvsem naplavin, kar nakazuje na to, da so bili ti deli jame v preteklosti vsaj enkrat popolnoma zapolnjeni [10].

Planinska jama je znana po človeški ribici, najdemo pa tudi druga živa bitja, kot so jamski ježki (Monolista), ceponožci in podzemeljski raki (Niphargus). V Planinski jami je bil tudi prvič najden endemit dinarskih podzemeljskih vod trdoživ (Velkovrhia enigmatica) [10].



Slika 6: Karta Planinske jame [6]

2 METODE

V tem poglavju bomo opisali metode izmere in osnovne podatke dveh instrumentov, pri katerih bomo primerjali hitrost, doseg, zahtevnost uporabe na terenu, gostoto oblaka, natančnost in razlike med zajetima oblakoma točk.

2.1 Zagotovitev koordinatne osnove

Pred Planinsko jamo smo s pomočjo metode RTK GNSS (angl. Global Navigation Satellite System) vzpostavili mrežo treh točk v realizaciji koordinatnega sistema ETRS89, datum D96/TM. Točke smo uporabili kot izhodišče pri klasični izmeri oslonilnih točk. Skednene jame nismo ponovno merili, saj so to že storili v predhodnih raziskavah [12 in 13].

2.2 Klasična metoda izmere

Za merjenje oslonilnih točk smo uporabili klasično metodo izmere, saj metoda GNSS v prostorih, kjer ni signala, odpove. Z metodo GNSS tako ne bi mogli posneti oslonilnih točk, ki smo jih stabilizirali na stenah jam. Ko imamo vzpostavljeno mrežo na površju, je tako lažje uporabiti klasično metodo, saj lahko točke prenesemo v notranjost jame, z uporabo metode slepega poligona. Čeprav so slepi poligoni v praksi manj natančni, saj lahko vsebujejo grobe pogreške, je za naše delo to dovolj natančno, saj bi grobe pogreške pri georeferenciranju oblakov točk zajetih z laserskimi skenerji hitro zaznali.

V našem primeru smo uporabili elektronski tahimeter Leica TS15, ki ima vgrajeno povezavo z GNSS-sistemom. Instrument smo postavili na rob vhoda v Planinsko jamo, položaj in orientacijo pa smo zagotovili z metodo prostega stojišča iz točk določenih z metodo RTK GNSS. Prosto stojišče je postopek določitve koordinat neznane točke na osnovi opazovanj smeri in dolžin do znanih točk. Oslonilne točke, ki so pozneje služile za georeferenciranje oblaka točk, smo posneli s polarno metodo izmere. Pri polarni metodi izmere stojišče predstavlja koordinatni sistem, s katerega se orientiramo na eno ali več smeri. Smeri so določene na podlagi opazovanega horizontalnega kota, poševne dolžine in zenitne razdalje. Oslonilne točke predstavljajo točke na terenu, ki imajo znane koordinate v prostorskem koordinatnem sistemu, kar pomeni, da so jim znane nadmorske višine in horizontalni položaj. Navedeno pomeni, da lahko oblak točk z njihovo pomočjo umestimo v izbrani koordinatni sistem.

2.3 Terestrično lasersko skeniranje

Poleg klasične polarne izmere smo uporabili tudi metodo terestričnega laserskega skeniranja, ki spada med novejša tehnologija zajema v geodeziji. Metoda, ki lahko v nekaj minutah zajame milijone točk, se uporablja predvsem v topografski ali detajlni izmeri, v gradbeništvu in arhitekturi, arheologiji in kulturni dediščini, kontrolah izvedbe in drugih podobnih nalogah.

Terestrični laserski skener (TLS) pridobi koordinate številnih točk na kopnem z oddajanjem laserskih impulzov ter merjenjem razdalje. Prednost pri tem je, da zajame večje število točk, kot jih lahko zajamemo s klasično metodo izmere.

Instrumenti za terestrično lasersko skeniranje so običajno razdeljeni v kategorije, ki jih ločimo po razdalji, ki jo laserska svetloba lahko prepotuje za snemanje točke v vidnem polju. Lahko so to so skenerji kratkega, srednjega ali dolgega dosega. Skenerji dolgih dosegov se običajno uporabljajo za merjenje večjih površin, medtem ko laserski skenerji krajšega dosega merijo prostorsko manjša območja, kjer je pomembna večja natančnost.

Skener deluje na osnovi laserske svetlobe. Senzor laserskega skenerja oddaja laserski žarek, ki se odbije od skenirane površine in ga ponovno sprejme sprejemna optika skenerja. V laserskih skenerjih se uporabljata dve metodi, in sicer impulzna metoda, ki meri čas potovanja svetlobe (Time Of Flight), in fazna metoda, ki meri fazne razlike med oddanim in prejetim valovanjem, zato so laserski skenerji razdeljeni v skupine TOF in fazne laserske skenerje. Postopki so povzeti po Kogoju [14].

Pri merjenju časa letenja (TOF) se merilni impulzi modelirajo na nosilnem valu, čas med oddajo in sprejemom pa se meri z natančnimi urami. Prednosti te metode so večji dosegi.

Pri fazni metodi pa se valovi, ki jih oddaja laserski skener, z različnimi valovnimi dolžinami med seboj primerjajo, nato se določi fazni zamik. Prednosti teh skenerjev so zelo velika hitrost merjenja, večja natančnost in večja ločljivost. To metodo se uporablja za skeniranje težje dostopnih mest oziroma detajlov.

V zadnjem času so vse uporabnejši barvni laserski skenerji, ki omogočajo, da se vsaki točki, ki je prostorsko določena s koordinatami y , x in z , dodelijo še informacije o barvi.

Rezultat pri vseh naštetih tipih laserskih skenerjev je oblak točk, v katerem ima vsaka točka svoje koordinate v lokalnem koordinatnem sistemu. V primeru, da smo s klasičnimi metodami geodezije določili položaje oslonilnih točk, lahko ta oblak točk umestimo v izbrani koordinatni sistem.

Če primerjamo klasično polarno metodo geodezije in terestrično lasersko skeniranje, lahko ugotovimo, da je razlika zelo očitna v natančnosti določitve koordinat posameznih točk. V primeru, da v analizo vključimo vse točke oblaka, pa nam nadštevilnost omogoča doseči večjo natančnost.

3 INSTRUMENTARIJ IN PRIBOR

Za zajem podatkov na terenu smo uporabili dva laserska skenerja, katerih podrobnosti bom opisal spodaj v preglednicah. V jamah je smiselna uporaba skenerja Leica BLK360, saj gre za lažji instrument, ki omogoča lažjo prenosljivost. Če primerjamo težo z Riegl VZ-400 je razlika očitna, še posebej zato, ker potrebujemo poleg skenerja še prenosni računalnik, ki ga povežemo s skenerjem.

3.1 Laserski skener Leica BLK360

Terestrični laserski skener (slika 7) uvrščamo med fazno-impulzne skenerje, glede na vidno polje med panoramske skenerje ter glede na doseg merjenja dolžin med skenerje kratkega dosega [14]. Gre za najmanjši in najlažji slikovni laserski skener, ki omogoča skeniranje celotnega vidnega polja v manj kot treh minutah. Prednost Leicinega BLK360 je, da ob povezavi s tabličnim računalnikom omogoča tudi sproten prikaz zajema in sprotno združevanje oblakov točk in stojišč. Laserski skener ima vgrajeno tudi inercialno enoto (IMU), ki sledi premikom skenerja ter pomaga pri kompenziranju nagibov, hkrati pa omogoča učinkovito združevanje oblakov točk. V primeru, da skener ni postavljen povsem horizontalno, nam omogoča avtomatsko horizontiranje skenov, saj ima vgrajen naklonomer. Povzetek je bil narejen po spletni strani podjetja Geoservis [15].

Več informacij o instrumentu predstavljamo v preglednici 3 in sliki 8.

Preglednica 3: Tehnične lastnosti laserskega skenerja Leica BLK360 [15]

Skeniranje	
Vidno polje	360° (horizontalno) x 300° (vertikalno)
Merilni doseg	0,6 m + 60 m
Ločljivost	5 mm, 10 mm ali 20 mm
Hitrost merjenja	360.000 točk/sekundo Zajem celotne okolice v manj kot 2 minutah
Natančnost merjenja dolžine	4 mm (10 m), 7 mm (20 m)
Natančnost 3D	6 mm (10 m), 8 mm (20 m)
Zajem	
Fotografija	15,1 MP sistem 3 kamer, HDR, LED bliskavice Zajem kalibrirane sferične fotografije (150 MP) Vidno polje 360° x 300°
Hitrost	Zajem celotne okolice z oblakom točk 360° panoramska fotografija 360° termografska slika v manj kot 3 minutah

...se nadaljuje

... nadaljevanje preglednice 3

Druge lastnosti	
Dimenzije	165 mm (višina) x 100 mm (premer)
Teža	1,1 kg
Temperaturno območje delovanja	+ 5 °C do + 40 °C



Slika 7: Leica BLK360 [15]



Slika 8: Podroben opis laserskega skenerja [15]

Merilni pribor:

- laserski skener Leica BLK360,
- ravne tarče,
- tarče – valj,
- tablični računalnik.

3.2 Laserski skener Riegl VZ-400

Laserski skener Riegl VZ-400 (sliki 9 in 10) spada med impulzne laserske skenerje, ki omogočajo skeniranje objektov daljšega dosega. Skener deluje tako, da poteka osnovna konfiguracija in nadzor preko vgrajenega uporabniškega vmesnika, upravljamo pa ga preko programa RiSCAN PRO na prenosnem računalniku, povezanim s skenerjem preko vmesnika LAN ali integriranega omrežja WLAN. Skener nam omogoča široko vidno polje 100° vertikalno in 360° horizontalno. Dodatno lahko na skener namestimo tudi fotoaparati. [16]

Več informacij o instrumentu predstavljamo v preglednici 4.

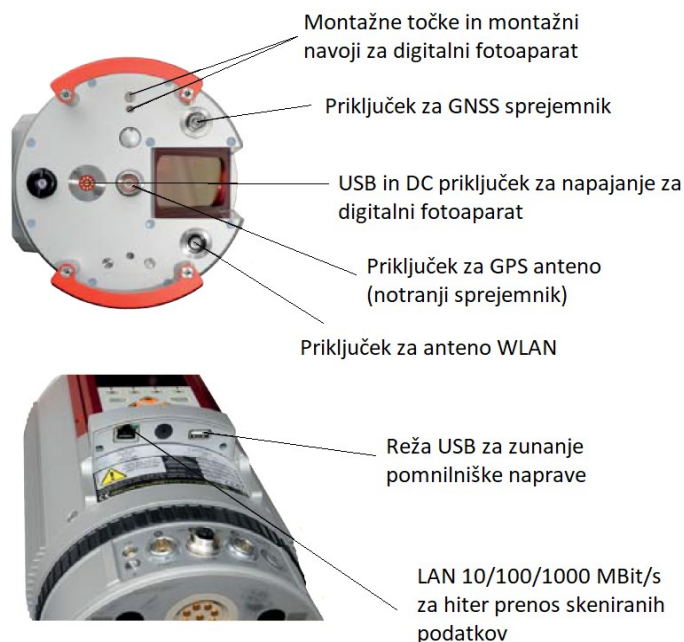
Preglednica 4: Tehnične lastnosti laserskega skenerja Riegl VZ-400 [16]

Skeniranje				
Vidno polje	$100^\circ (+60^\circ/-40^\circ)$ (vertikalno) 360° (horizontalno)			
Frekvenca laserskega impulza	100 kHz	300 kHz	600 kHz	1200 kHz
Maksimalni doseg ($\rho \geq 90\%$)	800 m	480 m	350 m	250 m
Maksimalni doseg ($\rho \geq 20\%$)	400 m	230 m	160 m	120 m
Število tarč glede na doseg	15	15	8	4
Najmanjša oddaljenost	1,5 m	1,2 m	0,5 m	0,5 m
Hitrost skeniranja	3 vrstice/sekundo do 120 vrstic na sekundo (vertikalno) 0° na sekundo do 60° na sekundo (horizontalno)			
Širina kotnega koraka	$0,0024^\circ \leq \Delta\theta \leq 0,288^\circ$ (vertikalno) $0,0024^\circ \leq \Delta\phi \leq 0,5^\circ$ (horizontalno)			
Ločljivost meritev	$0,0007''$ (2,5'') (vertikalno) $0,0005''$ (1,8'') (horizontalno)			
GNSS-sprejemnik	Opazovanja L1, GPS, GLONASS, Beidou			
Mehanizem	Rotirajoče, večstransko zrcalo (vertikalno) Rotirajoča glava skenerja (horizontalno)			
Druge lastnosti				
Dimenzije	346 mm (višina), 206 mm (širina)			
Teža	9,7 kg (skupaj z anteno)			
Temperaturno območje delovanja	Od 0°C do 40°C , maksimalna vlažnost 80 %			



Slika 9: Riegl VZ-400





Slika 10: Podroben opis laserskega skenerja Riegl VZ-400 [17]

Merilni pribor:

- laserski skener Riegl VZ-400,
- stativ,
- podnožje s pecljem in nastavki za tarče,
- prenosni računalnik,
- ravna tarča za skener Riegl.

3.3 Primerjava Leica BLK360 in Riegl VZ-400 – teoretično

Oba instrumenta spadata med natančnejše laserske skenerje. Razlika med njima je predvsem v dosegu, saj je Riegl VZ-400 laserski skener, s katerim je mogoče skenirati večje razdalje, medtem ko Leica BLK360 ne dosega tako velikih razdalj. Kot je razvidno iz preglednice 4, je doseg laserskega skenerja Riegl VZ-400 tudi do 600 m pri 100 kHz frekvenci laserskega skeniranja, medtem ko Leica BLK360 dosega največjo oddaljenost do 60 m.

Riegl VZ-400 dosega hitrost skeniranja od 3 do 120 vrstic na sekundo vertikalno in od 0° do 60° horizontalno. To pomeni, da lahko Riegl dosega hitrost do 120.000 točk na sekundo na oddaljenosti 600 m, medtem ko instrument Leica BLK360 dosega hitrost 360.000 točk na sekundo. Iz teh rezultatov vidimo, da Leica BLK360 v krajšem času kot Riegl VZ-400 skenira celotno vidno polje, kar je prednost, saj je čas skeniranja bistveno krajši.

Pri obeh skenerjih lahko nastavimo gostoto skeniranja. Leica BLK360 vedno zajema celotno vidno polje, izbiramo pa lahko gostoto skeniranja: 20, 10 ali 5 mm na 10 m oddaljenosti, kar ustreza kotnim

vrednostim koraka 0.115° , 0.057° in 0.028° . Število točk v oblaku celotnega vidnega polja naj bi bilo približno 3 milijone pri nizki resoluciji, 18 milijonov pri srednji resoluciji in 65 pri visoki resoluciji. Pri skenerju Riegl VZ-400 lahko ročno nastavljamo vidno polje in gostoto skeniranja. Pri vidnem polju smo omejeni z vertikalnim kotom 60° navzgor in -40° navzdol. Najmanjši možni nastavljen kotni korak je 0.0024° , največji pa 0.288° za vertikalne in 0.500° za horizontalne kote.

Oba instrumenta imata torej prednosti in slabosti. Če posplošimo, je teoretično Leica BLK360 boljši v hitrosti, medtem ko je Riegl VZ-400 boljši v dosegu. Največja dosegljiva gostota skeniranja je zelo podobna (0.028° in 0.024°).

3.4 Oprema za vzpostavitev koordinatne osnove

Za izvedbo magistrske naloge smo uporabili več metod geodetske izmere. Za vklop v geodetski državni koordinatni sistem smo uporabili GNSS-sprejemnik Leica Viva GS18 (slika 11) v kombinaciji s tahimetrom Leica Viva TS15 (slika 12).

3.4.1 GNSS-sprejemnik Leica Viva GS18

Preglednica 5: Tehnični podatki Leica Viva GS18 [25]

Signali	L1, L2, L2C, L5 L1, L2, L2C, L3 E1, E5a, E5b, AltBOC, E6 B1I, B1C, B2I, B2a, B3I
Število kanalov	555
Natančnost merjenja (standard ISO17123-8)	
Opazovanja v realnem času (RTK)	HZ 8 mm + 0,5 ppm V 15 mm + 0,5 ppm
Statična (dolga) opazovanja	HZ 3 mm + 0,1 ppm V 3,5 mm + 0,4 ppm
Kinematična opazovanja	HZ 8 mm + 1,0 ppm V 15 mm + 1,0 ppm
Kodna opazovanja (DGNSS)	HZ 25 cm V 50 cm
Teža in dimenzija	1,23 kg / 3,53 kg sprejemnik
Antena (višina in premer)	90 mm 190 mm
Temperaturno območje delovanja	-40 °C do +65 °C



Slika 11: Leica Viva GS18

Merilni pribor za GNSS:

- GNSS-sprejemnik Leica Viva GS18,
- stativ,
- togo grezilo.

3.4.2 Tahimeter Leica Viva TS15

Preglednica 6: Tehnični podatki Leica Viva TS15 [18]

Merjenje kotov	Hz, V 1"
Merjenje razdalje (prizma)	360° prizma – 2000 m Prizma tipa GPR1 – 3500 m
Merjenje razdalje (prizma) (avtomatsko prepoznavanje tarče – ATR) – doseg	Prizma tipa GPR1 – 1000 m 360° prizma – 800 m
Natančnost in čas merjenja do prizme	Standardno 1,0 mm + 1,5 ppm 2,4 s Hitri način 2 mm + 1,5 ppm 0,8 s Neprekinjen način 3 mm + 1,5 ppm < 0,15 s
Temperaturno območje delovanja	-20 °C do +50 °C
Dozna libela (ločljivost)	6'/2 mm
Elektronska libela (ločljivost)	2"
Možnost merjenja najkrajše razdalje	1,5 m
Način čitanja na krogih	Kodirni način
Standardni odklon (standard ISO-17123-3)	1"
Razdaljemer	
Valovna dolžina	100–150 MHz
Standardni odklon z reflektorjem (standard ISO-17123-4)	1 mm 1,5 ppm
Standardni odklon brez reflektorja (standard ISO-17123-4)	2 mm ; 2 ppm
Nosilno valovanje	0,658 μm



Slika 12: Tahimeter Leica Viva TS15 [18]

Merilni pribor za tahimeter Leica Viva TS15

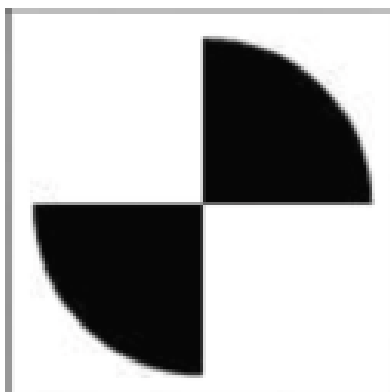
- tahimeter Leica Viva TS30,
- stativ,
- podnožje s pecljem,
- 360° prizma,
- merski trak (Leica).

3.4.3 Tarče in prizma

Za signalizacijo s tahimetrom smo uporabili prizmo Leica GRZ4 360° (slika 13). Gre za prizmo, ki je primerna za vse robotizirane tahimetre. Gre za 6 prizem, ki so zlepljene skupaj. Oslonilne točke, ki nam omogočajo vklop skeniranih oblakov točk v državni koordinatni sistem, so signalizirane s ploskovnimi tarčami, kot jo prikazuje na slika 14. Za skeniranje s skenerjem Riegl VZ-400 smo za signalizacijo oslonilnih točk uporabili cilindrične tarče (Slika 15). Opis tarče in prizme je povzet po Kogoju [14].



Slika 13: Prizma Leica GRZ4 360°



Slika 14: Tarča za laserske skenerje



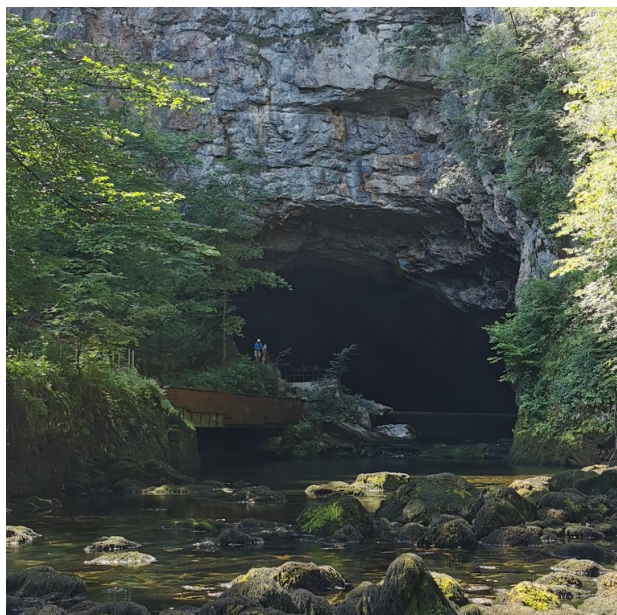
Slika 15: Cilindrična tarča ali »valj«

4 TERENSKO DELO

Na teren smo se opravili 29. 7. 2021. Zraven smo vzeli potrebno opremo, ki smo jo opisali v poglavju 3. Najprej smo se odpravili proti Planinski jami, kjer smo izvedli skeniranje vhodnega dela jame, ki je odprt za javnost.

4.1 Rekognosciranje terena

Z ogledom območja smo ugotovili, da sistem GNSS ne bo zagotavljal RTK točnosti za zagotovitev stojišča. Zato smo stojišče zagotovili z metodo prostega stojišča, kot je prikazano na sliki 16. V notranjosti jame smo postavili oslonilne točke, ki smo jih potrebovali za vklop oblakov točk v državni koordinatni sistem. Če bi želeli zagotoviti točnejši položaj jame z RTK metodo izmere, bi morali vzpostaviti poligonsko mrežo in določiti vsaj dve ali več točk na območju, kjer bi GNSS-sistem optimalno deloval. Ker za potrebe izdelave magistrske naloge to ni tako pomembno, smo se zadovoljili s približnim položajem točk, toliko da vzpostavimo sistem in določimo oslonilne točke za georeferenciranje v skupen oblakov. Izmere smo izvedli z instrumentom Leica Viva TS15 na vhodu v jamo, GNSS-sistem je bil nameščen na 360° prizmo.



Slika 16: Vhod v Planinsko jamo

4.2 Zajem s terestričnima laserskima skenerjema

Za izdelavo magistrske naloge smo uporabili dva laserska skenerja, ki sta opisana v poglavju 3. Leica BLK360 je enostaven instrument, ki se upravlja preko prenosnega tabličnega računalnika ali pa skeniranje zaganjamo s pritiskom na gumb in podatke shranjuje v notranji pomnilnik. Gre za lahko prenosljiv instrument, ki vsebuje naklonomer, ki poskrbi, da ni potrebe po točni horizontalni postavitvi instrumenta. Meritve izvedemo s sprožitvijo skeniranja, preko gumba ali prenosnega tabličnega

računalnika. Zahtevnejši za delo je Riegl VZ-400, ki ga moramo postaviti na stativ in priklopiti na prenosni računalnik. Problematično je prenašanje instrumenta z enega stojišča na drugo, saj sta za prenos instrumenta potrebna dva človeka. Skeniranje se sproži preko računalniškega programa RiSCAN PRO.

Pred izvedbo skeniranja smo po jami razpostavili oslonilne točke. Položaje točk smo izbrali tako, da so bile čim bolj prostorsko razporejene in da je v času skeniranja vidnih čim več veznih in oslonilnih točk, saj omogočajo lažjo registracijo oblakov skeniranih točk in georeferenciranje v državni koordinatni sistem.

Položaje stojišč laserskega skenerja smo v jami izbrali glede na vidnost tarč in skeniranega detajla. Prednost instrumenta Leica BLK360 je, da lahko že na terenu naredimo registracijo, saj programska oprema na tabličnem računalniku poveže oblake točk po principu »Cloud-to-cloud«. Registracija z Riegl VZ-400 je zahtevnejša, vendar smo tudi na terenu na osnovi definiranja veznih točk iz oblaka oblake registrirali v skupen oblak točk. Oslonilne točke so nam služile za poznejši postopek georeferenciranja v koordinatni sistem geodetske mreže. V jami smo posneli čim več veznih točk, saj njihovo število pozitivno vpliva na kakovost registracije.

Kakovost registracije izračuna program RiSCAN PRO. Tako lahko sproti ocenimo kakovost izračunanih transformacijskih parametrov, odstopanje med oslonilnimi točkami, ki jih skeniramo z različnih stojišč in odstopanje koordinat transformiranih veznih točk od danih točk.

5 PROGRAMSKA OPREMA

Rezultat laserskega skeniranja so oblaki točk, ki so brez ustrezne programske opreme neuporabni. Za obdelavo skeniranih oblakov točk smo uporabili programe Leica Cyclone REGISTER 360 (slika 17), Leica Cyclone 3DR (slika 18) in RiSCAN PRO (slika 19), ki jih bomo podrobneje opisali spodaj.

5.1 Leica Cyclone REGISTER 360

Podjetje Leica je razvilo programsko opremo za registracijo oblakov točk, ki za razliko od predhodnih programov omogoča nove zmogljivosti, kot je avtomatizirana registracija v času skeniranja. Torej že na terenu lahko registriramo skenogramе med seboj, saj ima program možnosti prepoznavanja skladnih delov oblakov točk. Program je namenjen tako začetnikom kot izkušenim uporabnikom, saj nam orodja omogočajo zagotavljanje kakovosti, hkrati pa nam podajajo informacije o kakovosti naše registracije. Program tudi omogoča, da lahko podatke neposredno prenesemo preko spletnega oblaka, tako da so nam na voljo kjerkoli. Opis je bil povzet po spletni strani Leica Cyclone Register 360 [19].

Leica Cyclone Register 360 smo uporabljali za delo s podatki, zajetimi s skenerjem BLK360.

5.2 Leica Cyclone 3DR

Program Cyclone 3DR je prav tako produkt podjetja Leica. Program nam omogoča upravljanje oblakov točk z avtomatizirano analizo oblaka točk. Namenjen je tako začetnikom kot izkušenim uporabnikom, da lahko na preprost način pridejo od uvoza do analize oblakov točk. Prednosti so predvsem v hitrem, lahkem in prilagodljivem orodju. Omogoča, da lahko obdelamo večje oblake točk, poleg analize pa omogoča tudi izris plastnic, 3D oblikovanje, merjenje dolžin, površin, volumnov in kotov, filtriranje oblakov točk in prelet prostorskih podatkov. Opis programa je bil povzet po spletni strani Leica Cyclone 3DR [20].

Cyclone 3DR smo uporabili za obdelavo podatkov obeh skenerjev Leica BLK360 in Riegl VZ-400.

5.3 RiSCAN PRO

Program RiSCAN PRO je programska oprema podjetja Riegl, ki jo uporabljamo pri skeniranju z laserskim skenerjem Riegl-VZ400. Zasnovan je tako, da lahko pridobiva podatke na terenu direktno s skenerja in ponuja orodja za vizualni pregled celotne skenirane okolice takoj po zajemu podatkov. Ponuja pa tudi različne funkcije za obdelavo podatkov. Program omogoča nemoten prenos podatkov, ki jih lahko obdelajo tudi tretje osebe. Opis je bil povzet po spletnem dokumentu podjetja Riegl [16].

Glavne značilnosti programa so:

- enostavna registracija,
- 2D in 3D vizualizacija,
- samodejno filtriranje,
- samodejna registracija,

- obarvanje oblakov točk,
- izračun prostornine.

Program RiSCAN PRO omogoča **avtomatsko registracijo**. To je samodejno združevanje oblakov točk in različnih stojišč skenerja. Ker lahko skeniramo zelo veliko število oblakov točk iz različnih stojišč, program omogoča zelo hitro registracijo.

Optimizacija se lahko izvede na več različnih načinov:

- skenirani podatki sosednjih oblakov točk se med seboj ujemajo,
- meritve s senzorji nagiba se ujemajo z orientacijo položaja skenerja,
- podatki skeniranja ustrezajo zunanjemu pregledu kontrolnih točk, kar pomeni, da je optimizacija pravilna in natančna.

Ker je mogoče s skenerjem zajeti večje število točk, nam program omogoča **filtriranje točk**, kjer lahko točkam izločamo odbojnost, preveliko odstopanje od veznih točk itd. Program pa ima tudi možnost samodejnega filtriranja, kjer prepozna večje pogreške pri točkah in jih tudi sam izloči [16].

6 REZULTATI

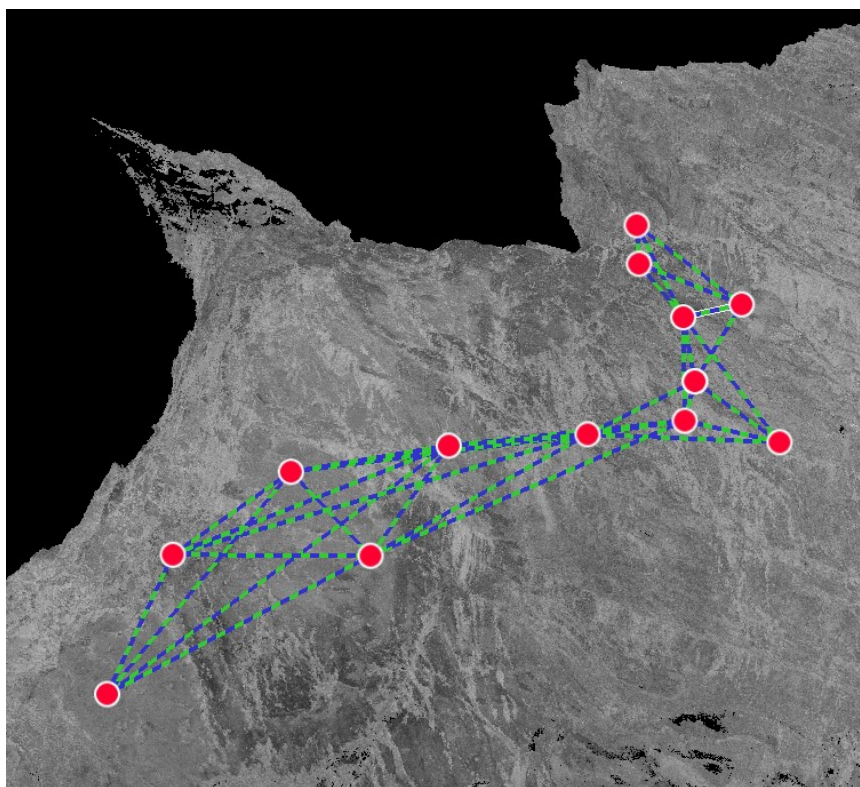
6.1 Planinska jama

Zaradi skeniranja iz več stojišč smo morali najprej izvesti registracijo in georeferenciranje za oba laserska skenerja, ker ima vsako stojišče svoj lokalni koordinatni sistem.

6.1.1 Registracija Leica BLK360

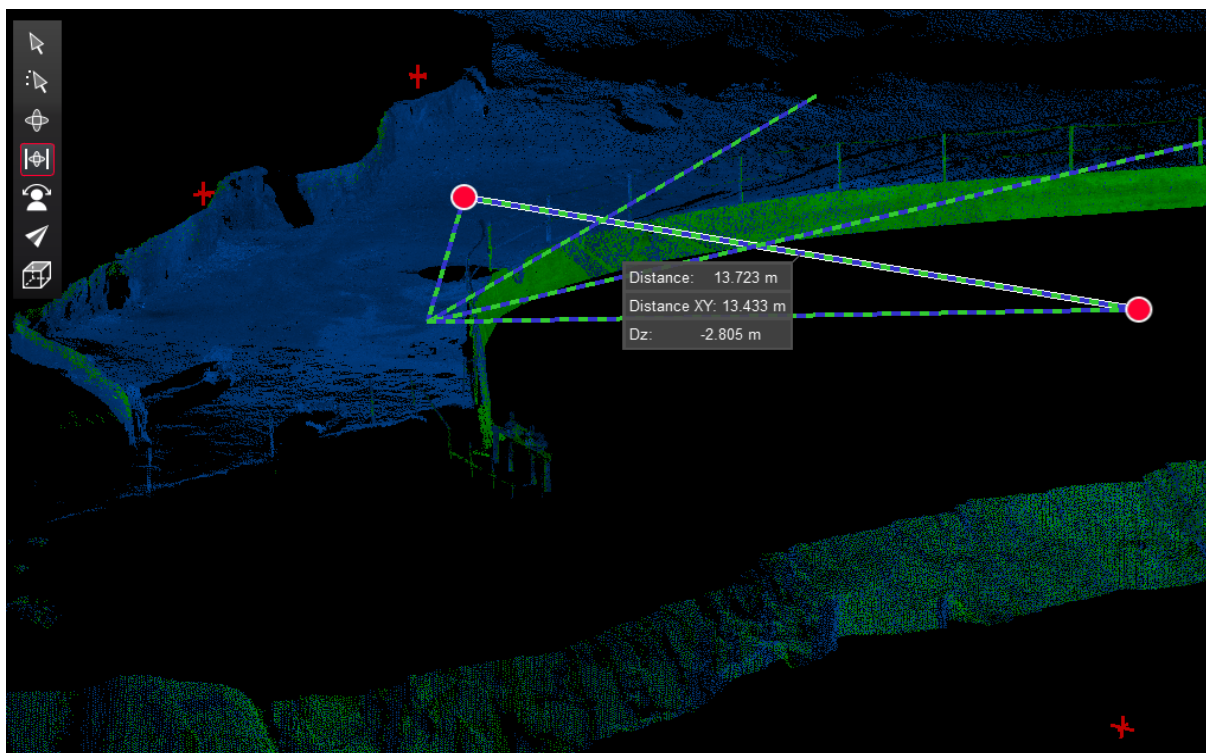
Postopek registracije pomeni združevanje skeniranih oblakov točk. Postopek se izvede tako, da vedno ko se premaknemo na drugo stojišče, določimo položaj skenerja na podlagi skladnih oblek v oblakih obeh stojišč.

Kot je razvidno iz slike 17, smo imeli z Leica BLK360 skupno 14 stojišč oziroma oblakov točk. Vseh 14 oblakov smo med seboj povezali že na samem terenu. To nam omogoča funkcija »visual alignment«, kjer program sam prepozna skenirane oblake, ki med seboj sovpadajo. Kasneje se uporabi ukaz »Cloud-to-Cloud«, ki deluje po principu ICP (ang. Iterative Closest Point), kjer nam program poda parametre registracije in tako da zmanjša odstopanje točk med oblaki.



Slika 17: Povezave med stojišči

Slika 18 prikazuje povezave med dvema stojiščema. Razvidno je, da se oddaljenosti med posameznimi stojišči razlikujejo, saj smo instrument postavili neodvisno in stojišč skenerja nismo imeli vnaprej določenih. Pomembno je bilo to, da smo videli čim več oslonilnih točk, ki nam omogočajo georeferenciranje. Oslonilne točke na sliki 18 predstavljajo rdeči križci, ki so postavljeni na stenah jame.



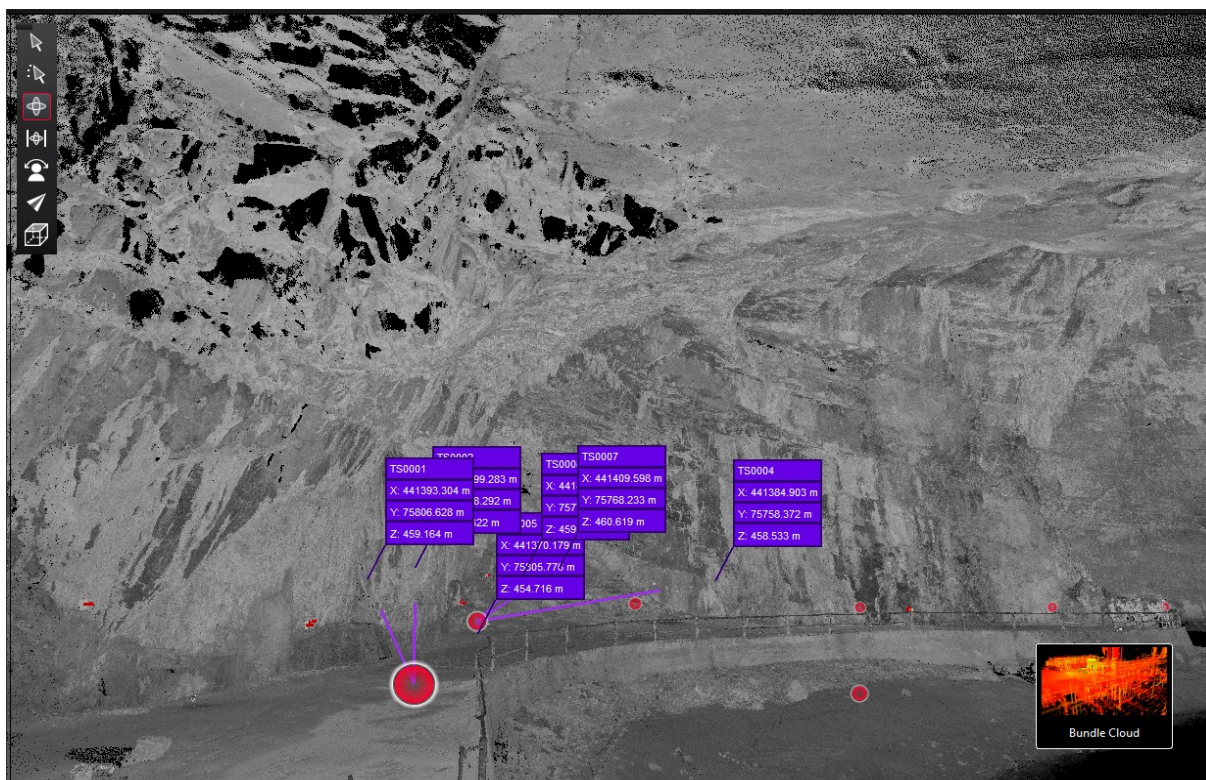
Slika 18: Primer stojišča, registracija in razdalja med dvema stojiščema

6.1.2 Georeferenciranje Leica BLK360

Po uspešno končani registraciji smo morali izvesti še georeferenciranje, kar pomeni, da se skupni oblak točk transformira v državni koordinatni sistem. Na sliki 19 prikazujemo oslonilne točke, ki imajo svoje koordinate v državnem koordinatnem sistemu. Položaj oslonilnih točk smo določili s klasično geodetsko izmero. Oslonilne točke so postavljene na začetku vhoda v jamo. Če bi zagotovili več oslonilnih točk v notranjosti jame, bi bilo odstopanje transformacije še manjše, ampak za naše delo jih je bilo postavljenih dovolj, saj namen naloge ni vzpostaviti koordinatne mreže. Posamezna odstopanja transformacije po oslonilnih točkah, ki so bile zajete iz prvega stojišča pri vhodu v jamo, prikazujemo v spodnji preglednici.

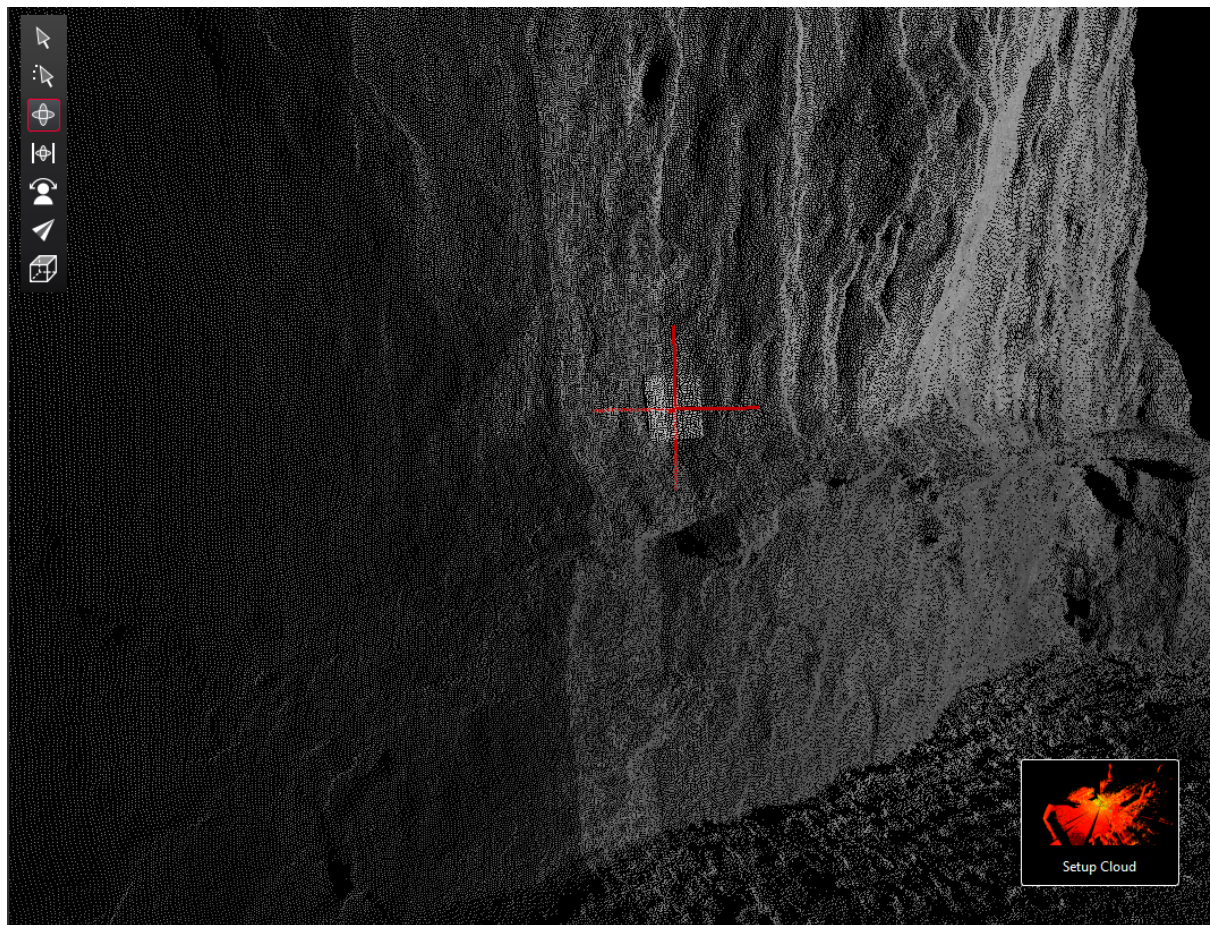
Preglednica 7: Odstopanje oslonilnih točk

Ime točke	Povprečno odstopanje [m]	odstopanje N [m]	odstopanje E [m]	odstopanje Z [m]
OS1	0,007	-0,001	0,001	-0,007
OS2	0,011	0,003	0,001	0,011
OS4	0,011	-0,004	-0,010	-0,002
OS5	0,021	0,009	0,019	0,005
OS7	0,015	-0,009	-0,007	0,010
OS8	0,017	0,002	-0,004	-0,017



Slika 19: Grafičen prikaz uporabljenih oslonilnih točk za georeferenciranje

Brez oslonilnih točk vklop v državni koordinatni sistem ni možen. Problem pri snemanju z laserskim skenerjem Leica BKL360 je v tem, da je v jamah osvetlitev slabša. Pomagali smo si z naglavnimi svetilkami in tako omogočili instrumentu, da je avtomatsko zaznal vse tarče. Oblak točk smo tako povezali s koordinatnim sistemom, ki smo ga definirali z meritvami s tahimetrom Leica Viva TS15 ob vhodu v jamo. Izločili smo oslonilni točki OS3 in OS6, saj sta vsebovali grobi pogrešek za več kot dva metra. Problem je verjetno nastal pri avtomatskem zaznavanju tarče, saj je skener zaznal odboj od katerega drugega predmeta. Točke smo lahko zaradi nadštevilnosti izločili, saj je bilo 6 oslonilnih točk dovolj, da smo dosegli dovolj natančne rezultate. Če bi želeli doseči še boljše rezultate, bi morali stabilizirati več oslonilnih točk po celotni jami, vendar to za naše delo ni bilo tako pomembno. Če katerih od tarč laserski skener ne bi zaznal avtomatsko, bi jih morali poiskati ročno. Primer je prikazan na sliki 20.



Slika 20: Oslonilna tarča na steni jame (ročno georeferenciranje)

6.1.3 Registracija in georeferenciranje Riegl VZ-400

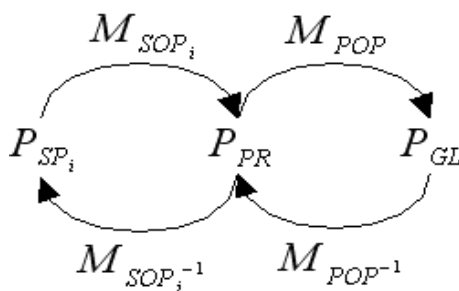
Za obdelavo smo uporabili program RiSCAN PRO. Registracijo in georeferenciranje smo izvedli že na terenu s prenosnim računalnikom.

Po končanem skeniranju posameznega stojišča je s finim skeniranjem retroreflektivnih tarč (cilindričnih tarč) potrebno poiskati vezne točke. Tarče so pri vizualizaciji skeniranega oblaka točk zaradi visoke reflektivnosti obarvane rdeče, kot prikazuje slika 21. Določimo vezne točke, za katere smo uporabili cilindrične tarče oziroma valje. Veznim točkam na prvem stojišču določimo imena, ki potem služijo za vsako naslednje stojišče.



Slika 21: Prikaz skenerja na prvem stojišču in vezne/oslonilne točke (rdeče)

Program RiSCAN PRO loči tri koordinatne sisteme, in sicer koordinatni sistem posameznega stojišča (SOCS – *Scanner own coordinate system*), projektni koordinatni sistem (PRCS – *Project coordinate system*) in globalni koordinatni sistem (GLCS – *Global coordinate system*). Naš skener je bil najprej postavljen v lastnem skenerjevem sistemu (SOCS), pozneje na terenu smo mu zagotovili globalni koordinatni sistem (GLCS), saj smo oslonilne točke posneli in jim določili koordinate v državnem koordinatnem sistemu. V preglednici 8 smo prikazali koordinate posamezne oslonilne točke, ki smo jo vnesli v program. Če bi želeli spremeniti koordinatni sistem, bi morali uporabiti 6 ali 7 parametrično transformacijo z matrikami SOP, da podatke iz SOCS transformiramo v PRCS. Lokalne koordinate točk lahko pretvorimo v globalni koordinatni sistem tako, da podatke naprej pomnožimo z matriko M_{SOP} , da preidemo v PRCS in nato še z matriko M_{POP} , ki transformira podatke iz PRCS v GLCS (slika 22). Transformacijske matrike SOP in POP vsebujejo 6-parametrične transformacije, tri premike in tri zasuke, merilo pa je zagotovljeno z opazovanji dolžin [21 in 16].



Slika 22: Shema - registracija in georeferenciranje v programu RiSCAN PRO [16]

MATRIX

Calculated matrix:

0.999950627	0.000727587	-0.009910278	-0.042471463
-0.001041596	0.999496345	-0.031717064	0.052633236
0.009882209	0.031725821	0.999447755	0.020002552
0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000

Slika 23: Primer matrike SOP iz drugega stojišča

Registracija v programu RiSCAN se izvede za vsak položaj skenerja posebej, kjer z veznimi točkami v skenerjevem lastnem in projektnem koordinatnem sistemu določimo transformacijsko matriko SOP (slika 23).

Ker imamo na terenu posnete oslonilne točke v ETRS/TM koordinatnem sistemu, smo tako lahko izvedli še georeferenciranje iz projektnega koordinatnega sistema (PRCS) v globalni koordinatni sistem (GLCS).

Preglednica 8: Koordinate oslonilnih točk v D96/TM koordinatnem sistemu

Oslonilna točka	E [m]	N [m]	H [m]
TS001	441393,304	75806,628	459,164
TS002	441399,283	75798,292	460,422
TS003	441403,622	75753,138	459,852
TS004	441384,903	75758,372	458,533
TS005	441370,179	75805,776	454,716
TS006	441376,110	75828,076	453,887
TS007	441409,598	75768,233	460,619

Registracijo smo izvedli tako, da smo po končanem skeniranju vsak posamezni skenogram prenesli v globalni koordinatni sistem na podlagi poimenovanja oslonilnih točk. Tako smo lahko za dve stojišči skenerja preverili natančnost določitve koordinat v državnem koordinatnem sistemu, kot je prikazano v preglednici 9. Na natančnost georeferenciranja vpliva več faktorjev, od kakovosti naprav za zajem slik, nagib in vrsta terena, metode izravnave ipd..

Preglednica 9: Koordinate oslonilnih točk in odstopanja točk po transformaciji

Oslonilna točka	E [m]	N [m]	H [m]	Δ_E [m]	Δ_N [m]	Δ_H [m]
TS001	441393,304	75806,628	459,164	0,000	0,000	0,000
TS002	441399,283	75798,292	460,422	-0,002	-0,001	0,001

...se nadaljuje

... nadaljevanje preglednice 9

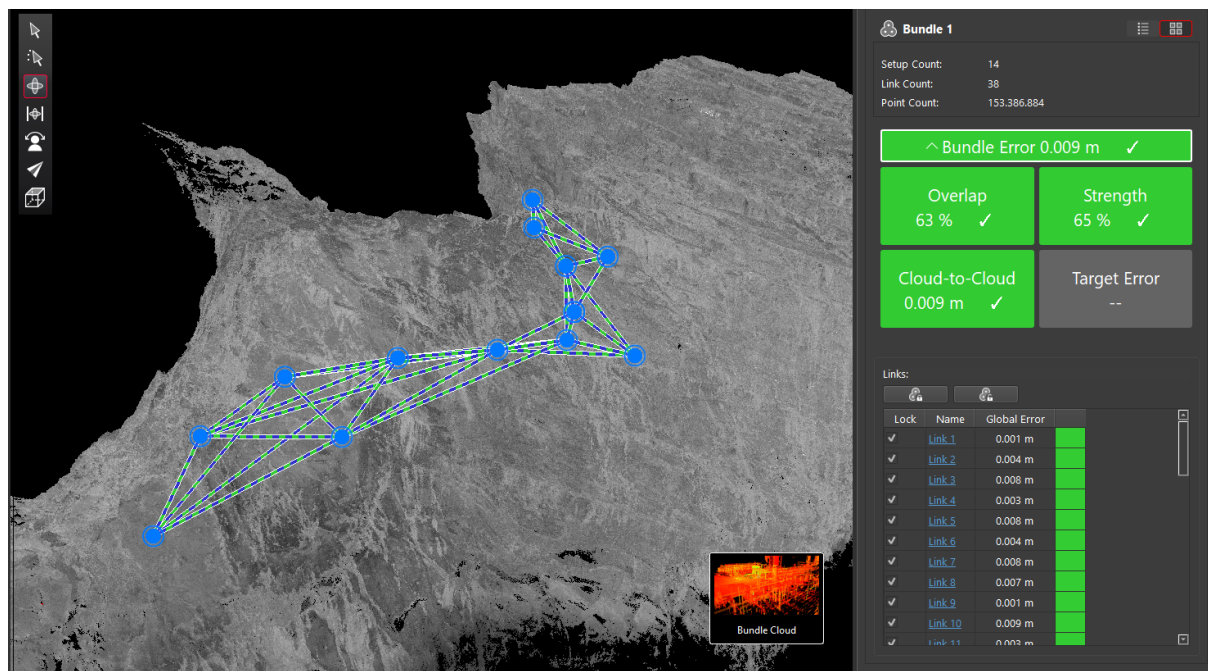
TS003	441403,622	75753,138	459,852	0,000	-0,001	0,000
TS004	441384,903	75758,372	458,533	-0,004	0,000	-0,002
TS005	441370,179	75805,776	454,716	0,002	0,001	0,002
TS006	441376,110	75828,076	453,887	0,001	0,004	0,001
TS007	441409,598	75768,233	460,619	0,002	-0,003	0,003

Za vsako posamezno tarčo smo tudi preverili, s kolikšnim številom točk smo jo zajeli. Količina točk se tako giblje med 3.000 pa do 50.000 točk na tarčo. Koliko točk je bilo zajetih za posamezno tarčo, je odvisno tudi od stojišča skenerja oziroma od oddaljenosti med skenerjem in tarčo.

6.1.4 Natančnost

Leica BLK360

Ko imamo vse oblake med seboj registrirane in georeferencirane, nam program poda skupno oceno oziroma pogrešek, ki je prikazan na sliki 24.



Slika 24: Prikaz skupne ocene pogreška natančnosti

Kot je razvidno iz slike 24, smo dosegli povprečno oceno natančnosti vklopov »Cloud-to-cloud« 9 mm, kar je dobro, glede na število skeniranih točk, ki jih je bilo več kot 153 milijonov. Povprečna napaka (»Bundle Error«) je torej enaka kot natančnost izravnave »Cloud-to-Cloud«.

Program nam poda tudi oceno natančnosti na posamezni povezavi (preglednica 9), prekrivanje med oblaki pa je bilo povprečno 63 %. Kot lahko razberemo iz slike 24, je bilo vseh povezav med stojišči 38, imeli pa smo 14 stojišč laserskega skenerja.

Riegl VZ-400

Ker smo v našem primeru izvedli registracijo iz PRCS v GLCS, smo prevzeli odstopanja oslonilnih točk pri transformaciji iz projektnega v globalni koordinatni sistem (slika 25).

PRCS_001	2	RIEGL Cylinder 10 cm	0.00	441400.249	75794.931	458.051	0.000	0.001	0.001	0.001
PRCS_003	2	RIEGL Cylinder 10 cm	0.00	441403.597	75777.232	458.422	0.000	0.002	0.001	0.001
PRCS_006	2	RIEGL Cylinder 10 cm	0.00	441374.025	75757.361	457.586	0.000	0.001	0.000	0.001
PRCS_007	2	RIEGL Cylinder 10 cm	0.00	441375.320	75742.148	457.420	0.000	0.000	0.001	0.000
PRCS_008	3	RIEGL Cylinder 10 cm	0.00	441377.850	75726.839	457.673	0.000	0.002	0.003	0.001
PRCS_009	3	RIEGL Cylinder 10 cm	0.00	441372.678	75713.773	454.937	0.000	0.003	0.002	0.006
PRCS_010	2	RIEGL Cylinder 10 cm	0.00	441395.894	75708.370	458.760	0.000	0.006	0.017	0.002
PRCS_011	2	RIEGL Cylinder 10 cm	0.00	441379.481	75710.828	456.508	0.000	0.001	0.003	0.011
PRCS_012	2	RIEGL Cylinder 10 cm	0.00	441402.275	75685.734	459.681	0.000	0.001	0.009	0.002

Slika 25: Seznam veznih točk s koordinatami in natančnostjo v globalnem koordinatnem sistemu

Corresponding tiepoints:	6	Avg. radial deviation [m]:	0.0017
Standard deviation [m]:	0.0077	Avg. theta deviation [m]:	0.0007
		Avg. phi deviation [m]:	0.0015

Slika 26: Natančnost vklopa na vezne točke na prvem stojišču

Po uspešno končani registraciji in georeferenciranju program poda oceno natančnosti vklopa veznih točk, kjer lahko vidimo, da smo dosegli 7,7 mm natančnost (slika 26).

Če primerjamo obe natančnosti instrumentov Leica BLK360 in Riegl VZ-400, ugotovimo, da smo kljub ročnemu določevanju točk dosegli boljšo natančnost z instrumentom Riegl VZ-400. Natančnost pri Leica BLK360 je pri avtomatski registraciji znašala 9 mm, pri Riegl VZ-400 pa 7 mm. Ker gre za minimalno določeno natančnost, sta oba instrumenta dosegla zelo dobre rezultate registracije.

6.1.5 Hitrost laserskih skenerjev

Leica BLK360

Laserski skener Leica BLK360 omogoča tri načine skeniranja v odvisnosti od izbrane ločljivosti: nizko, srednjo in visoko. Za potrebe izdelave magistrske naloge smo se v našem primeru odločili za srednjo ločljivost, kar pomeni 10 mm/10 m. Čas trajanja izmere enega stojišča pri srednji ločljivosti je trajal 1 minuto in 50 sekund, kar je zelo hiter postopek v primerjavi z Riegl VZ-400.

Prednost Leica BLK360 je tudi v tem, da za sprožitev laserskega skenerja ne potrebujemo prenosnega računalnika, ampak zadostuje že prenosna računalniška tablica, izmero pa sprožimo s tipko v programu. Prav tako nam uporaba tablice omogoča avtomatsko registracijo v realnem času.

V celotni Planinski jami smo naredili 14 neodvisnih stojišč in oblake med seboj povezali. Gostota oblaka se med stojišči razlikuje, številke pa so se gibale nekje okrog 6.000.000 na minuto. Kolikšna je bila gostota oblaka točk po posameznem stojišču na 1 minuto skeniranja, je razvidno iz preglednice 10.

Preglednica 10: Število posnetih točk iz enega stojišča na 1 minuto

Stojišče	Število točk v oblaku
ST1	6.080.406
ST2	6.168.509
ST4	6.077.021
ST5	5.983.121
ST6	5.983.178
ST7	5.760.080
ST8	5.985.546
ST9	6.126.578
ST10	6.226.039
ST11	6.121.548
ST12	5.720.814
ST13	5.980.446
ST14	5.673.560
ST15	5.778.722

Riegl VZ-400

Zajem z laserskim skenerjem Riegl VZ-400 je potekal dlje kot pri instrumentu Leica BLK360. Skener ima lahko več nastavitev hitrosti skeniranja, odvisno kako veliko gostoto želimo doseči. Mi smo uporabili hitro skeniranje, kar pomeni gostoto oblaka točk 5 mm/10 m, zato je skeniranje trajalo nekje 4 minute.

Prednost Riegl VZ-400 je, da lahko na podlagi panoramske fotografije ugotovimo, ali bodo vidne vse vezne točke, časovno pa je skeniranje tudi pri najvišji hitrosti skenerja počasnejše kot pri Leica BLK360. Prav tako je instrument težje prenosljivi.

Kot bomo videli pozneje v preglednici 11, je bilo s skenerjem Riegl VZ-400 v eni minuti zajetih tudi do en milijon točk več kot pri Leica BLK360. Razlika je nastala pri številu stojišč, saj je bilo pri laserskem skenerju Riegl VZ-400 postavljeno manj stojišč kot pri laserskem skenerju Leica BLK360. Če izračunamo po minutah, brez prenosa instrumenta na drugo stojišče in brez začetnega panoramskega predogleda pri Rieglu, smo pri Leici porabili približno 23 minut, pri Rieglu pa 20 minut. Če upoštevamo še predogled pri Rieglu, potem se čas poveča še za približno 10 minut.

S skenerjem smo v celotni Planinski jami naredili 5 stojišč, kar je 9 manj kot z instrumentom Leica BLK360. Povprečno je bilo po posameznem stojišču zajetih od 6.500.000 do 7.000.000 točk na 1

minuto. Gostota oblaka točk, skeniranih po posameznem stojišču na 1 minuto je prikazana v preglednici 11.

Preglednica 11: Število posnetih točk iz enega stojišča na 1 minuto

Stojišče	Število točk v oblaku
ScanPos001	6.581.140
ScanPos002	7.170.517
ScanPos003	6.717.923
ScanPos004	6.965.473
ScanPos005	6.892.681

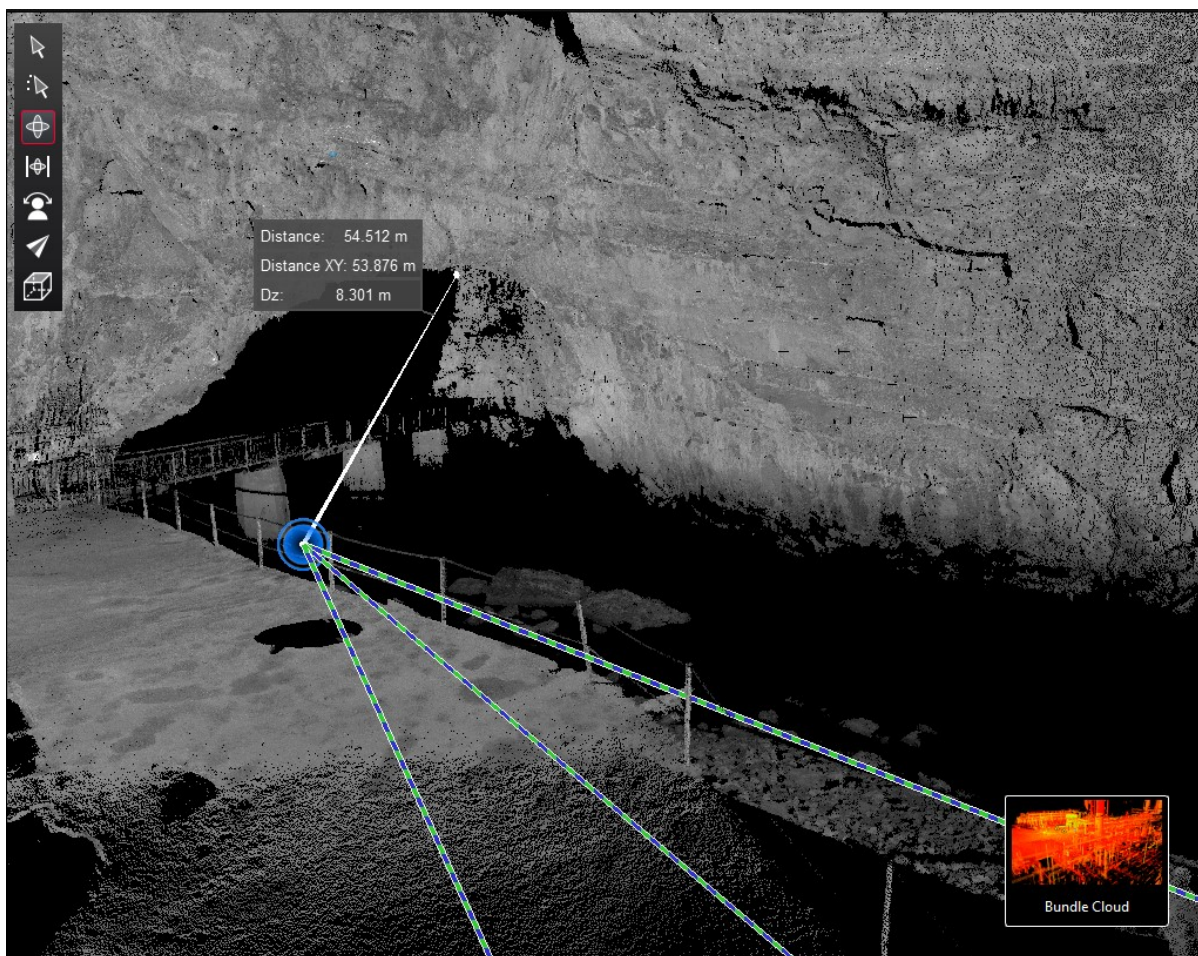
Če podatke primerjamo z Leicinim skenerjem, je bilo posnetih okrog milijon več točk po posameznem stojišču na 1 minuto.

6.1.6 Doseg

Zanimalo nas je tudi, ali laserska skenerja dosegata rezultate, kot so navedeni v tehničnih podatkih, zato smo poiskali najbolj oddaljeno točko pri obeh laserskih skenerjih, da smo lahko primerjali doseg in dejansko odstopanje od tehničnih podatkov.

Leica BLK360

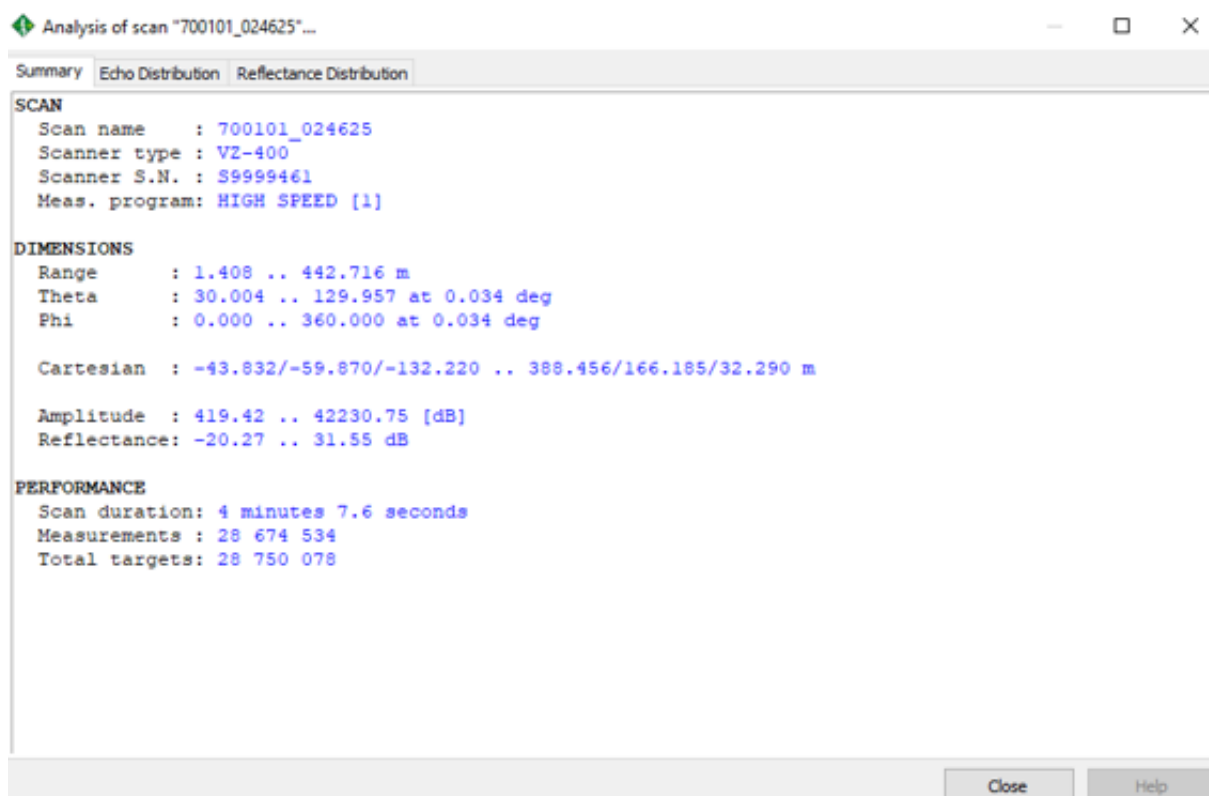
V programu Leica Cyclone Register 360 smo poiskali najbolj oddaljeno točko, ki jo je instrument še dokaj razločno posnel. Kot je razvidno iz slike 30, je točka oddaljena 54,512 m, višinska razlika med instrumentom in posneto točko pa je bila 8,30 m. V tehničnih podatkih instrumenta proizvajalec navaja maksimalno oddaljenost posnetih točk 60 m. Na spodnji sliki 27 vidimo rob skena, ki nastane zaradi selekcije točk. Skener točk ne beleži, če so oddaljene več kot 60 m.



Slika 27: Maksimalna oddaljenost točke pri skeniranju z Leica BLK360 – viden rob dosega skenerja 60 m

Riegl VZ-400

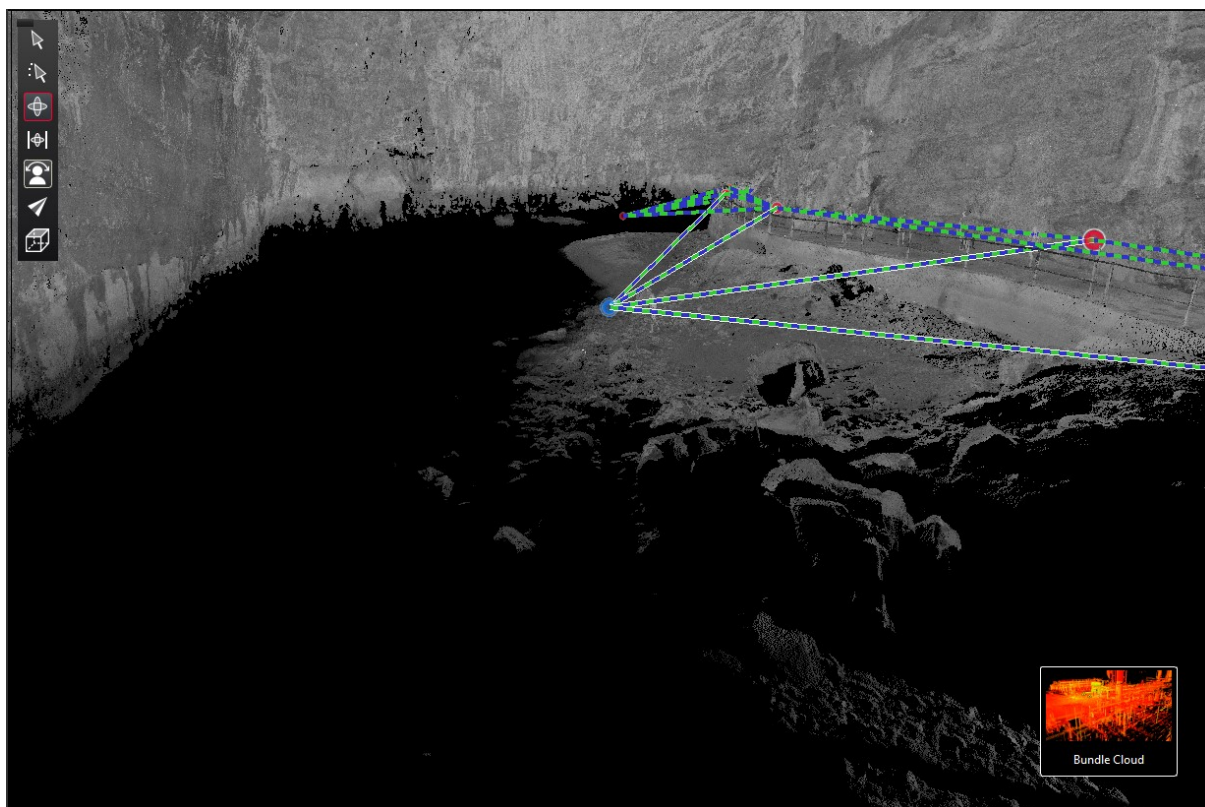
Pri našem terenskem delu instrumenta Riegl VZ-400 ne moremo primerjati z instrumentom Leica BLK360, saj je največja možna dosežena razdalja 600 m, najmanjša pa 1,5 m (teoretično). Iz spodnje slike 28 je razvidno, da je skener na stojišču 4 dosegel največjo razdaljo skoraj 443 m, najmanjšo razdaljo pa 1,40 m.



Slika 28: Minimalna (1,408 m) in maksimalna (442,716 m) dosežena razdalja v Planinski jami
Skener je torej v našem primeru dosegel vse, kar navaja proizvajalec.

6.1.7 Zahtevnost na terenu

Skeniranje z obema laserskima skenerjema smo izvedli v Planinski jami, kjer je pot omejena oziroma zaščitena z varovano ograjo. Pod varovano ograjo teče reka Pivka, ki je bila v času skeniranja nižja, zato smo lahko skeniranje z Leica BLK360 izvedli tudi pod varovano ograjo, saj nam instrument omogoča lažjo prenosljivost (slika 29). Z instrumentom Riegl VZ-400 je to težje izvedljivo, saj je potrebno zraven nositi tudi prenosni računalnik in sta za izmero potrebna dva človeka. Ker je oporni zid precej visok, smo izmere raje izvedli ob varovani ograji. V tem primeru se je Leica BLK360 izkazal za boljšega, saj izmera z Riegl VZ-400 pod varovano ograjo ni bila mogoča.



Slika 29: Stojišče pod varovano ograjo

6.2 Skednena jama

V Skedneni jami bomo primerjali samo rezultate, posnete z Leica BLK360 in Riegl VZ-400, saj so jamo lasersko skenirali že v predhodnih raziskav [12 in 13]. Torej v tem sklopu magistrske naloge ne bomo opisovali registracije, ampak podali samo rezultate. Georeferenciranje smo izvedli s programom Cyclone Register 360 za instrument Leica BLK360. V času terenskega ogleda smo za lažjo predstavo naredili obhod skozi jamo.

6.2.1 Georeferenciranje

Leica BLK360

Na podlagi danih točk v lokalnem koordinatnem sistemu smo izvedli georeferenciranje oblaka točk. Rezultate odstopanja po posamezni oslonilni točki smo podali v preglednici 12. Prikazali smo rezultate iz prvega stojišča, ki se nahaja pred vhodom v jamo.

Preglednica 12: Odstopanje oslonilnih točk

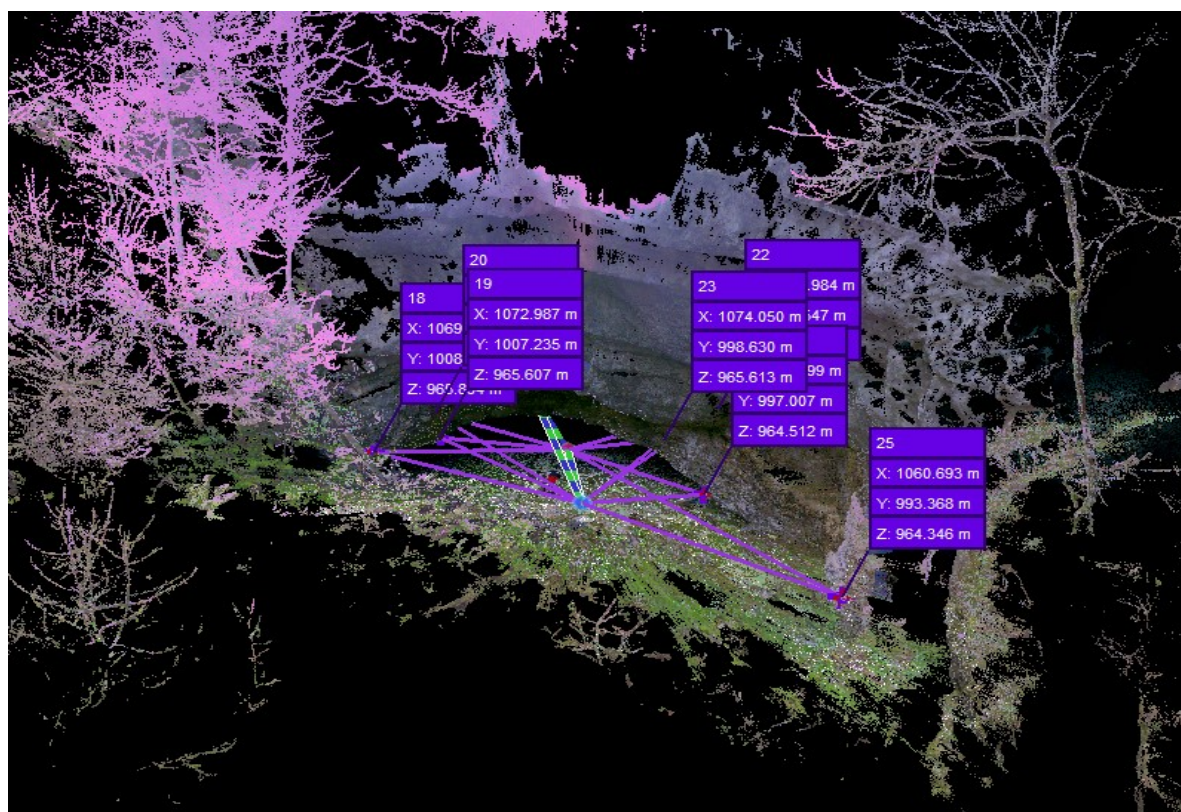
Ime točke	Povprečno odstopanje [m]	Odstopanje N [m]	Odstopanje E [m]	Odstopanje Z [m]
24	0,009	-0,000	-0,002	-0,009
19	0,004	0,004	0,002	0,001

...se nadaljuje

...nadaljevanje preglednice 12

20	0,004	-0,002	0,001	0,002
23	0,004	-0,001	-0,001	-0,001
25	0,003	-0,001	0,001	0,003
22	0,003	-0,001	0,003	0,001
18	0,002	-0,002	0,001	0,000

Če primerjamo preglednico oslonilnih točk v Planinski jami in Skedneni jami, opazimo, da je v Skedneni jami manjše odstopanje po oslonilnih točkah. V Planinski jami je odstopanje za nekaj milimetrov večje. Vseeno pa je odstopanje v Planinski jami dokaj majhno, zato lahko zagotovimo visoko natančnost koordinat. V obeh primerih so bile oslonilne točke poiskane avtomatsko s programom (slika 30). Z ročnim vnosom točk bi mogoče dosegli celo slabšo natančnost, zato program Leica Cyclone REGISTER 360 zelo dobro deluje v avtomatskem iskanju oslonilnih točk.

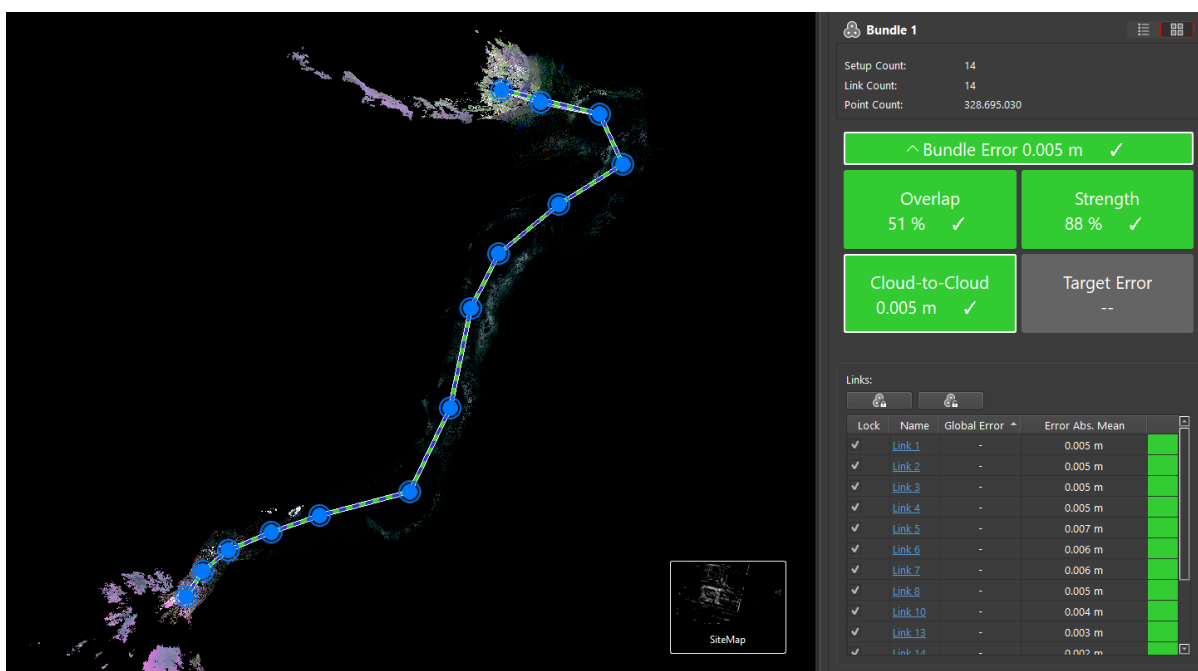


Slika 30: Grafičen prikaz podanih oslonilnih točk na severnem vhodu Skednene jame

6.2.2 Natančnost

Leica BLK360

Skupno je bilo za posnetek jame postavljenih 14 stojišč in izmerjenih več kot 328 milijonov točk. Natančnost je zelo visoka, saj je povprečno odstopanje pri registraciji »Cloud-to-Cloud« 5 mm. Povprečni preklap med oblaki je 51 %, kot je prikazano na sliki 31.



Slika 31: Prikaz skupne ocene pogreška natančnosti

Število stojišč v Skedneni jami je odvisno od terena. Največja razdalja med stojiščema je znašala 18,8 m (slika 33).

Riegl VZ-400

Z instrumentom Riegl VZ-400 je bilo skupno v jami posnetih 374.912.407 točk. Stojišče je bilo manj kot z instrumentom Leica BLK360. Na prvem stojišču je bilo posnetih 68.868.256 točk, resolucija $0.023^\circ \sim 4 \text{ mm}/10 \text{ m}$, na ostalih stojiščih pa 43.720.593 točk, resolucija $0,029^\circ \sim 5 \text{ mm}/10 \text{ m}$. Skupno število posnetih točk znaša 374.912.407. Čas skeniranja na prvem stojišču je bil 9 minut in 28 sekund, čas skeniranja na ostalih stojiščih pa 6 minut in 1 sekundo.

Corresponding tiepoints:	6	Avg. radial deviation [m]:	0.0010
Standard deviation [m]:	0.0068	Avg. theta deviation [m]:	0.0006
		Avg. phi deviation [m]:	-0.0009

Slika 32: Natančnost skeniranja z instrumentom Riegl VZ-400

Kot je razvidno iz slike 31, je povprečna natančnost vklopov z instrumentom Leica BL360 5 mm, kar pomeni, da je dosegel boljšo natančnost kot Riegl VZ-400 z 6,8 mm (slika 32). Tako kot pri Planinski jami je tudi tukaj razlika v natančnosti zelo majhna. Leica BLK360 je na podlagi avtomatske registracije dosegel malo boljšo natančnost.

6.2.3 Hitrost laserskih skenerjev

Leica BLK360

V celotni Skedneni jami so izvedli meritve iz 14 stojišč in oblake med seboj povezali. Gostota oblaka se med stojišči razlikuje, številke pa so se gibale okoli 12.000.000 točk v oblaku. Kolikšna je bila gostota oblaka točk po posameznem stojišču, posnetih na 1 minuto, je razvidno iz spodnje preglednice 13.

Gostoto oblaka in število točk laserskega skenerja Riegl VZ–400 smo že opisali v poglavju natančnost.

Preglednica 13: Število posnetih točk iz enega stojišča na 1 minuto

Stojišče	Število točk v oblaku
ST1	13.343.947
ST2	15.377.035
ST3	6.450.160
ST4	6.487.549
ST5	6.474.491
ST6	6.557.296
ST7	6.580.048
ST8	6.563.885
ST9	6.557.118
ST10	6.571.390
ST11	6.570.593
ST12	6.489.137
ST13	14.533.362
ST14	13.738.917



Slika 33: Največja razdalja med stojišči

Največja izmerjena razdalja (slika 33) med stojiščema 5 in 6 je skoraj 19 metrov.

6.3 Primerjava hitrosti laserskega skenerja Leica BLK360 in Riegl VZ-400

Z laserskim skenerjem Riegl VZ-400 so izmere posameznega stojišča izvedli v približno šestih minutah. Princip delovanja je malenkost drugačen kot pri Leica BLK360, saj skener najprej izvede panoramsko skeniranje, nato, če smo z rezultatom zadovoljni, sprožimo skeniranje. Registracijo so izvedli že na terenu, kjer so morali najprej poiskati vezne točke. Vsa ta obdelava je potekala preko prenosnega računalnika, kar pomeni, da je hitrost skeniranja in obdelave podatkov zamudnejša kot pri skenerju Leica BLK360.

Glede hitrosti je Leica BLK360 v veliki prednosti kot Riegl VZ-400, zlasti v:

- prenosu instrumenta,
- avtomatski registraciji,
- hitrosti skeniranja,
- tabličnem računalniku.

Če primerjamo rezultate gostote oblaka točk, je Riegl VZ-400 v šestih minutah zajel več točk kot Leica BLK360 v 1 minuti in 50 sekundah (od stojišča 3 do stojišča 12). Riegl VZ-400 je torej v 1 minuti zajel 7.266.581 točk, Leica BLK360 pa 6.530.167 točk. V tem delu se moremo vprašati, če nam je bolj pomembno, da imamo obliko jame posneto z manj ali več detajla.

6.4 Rezultati georeferenciranja

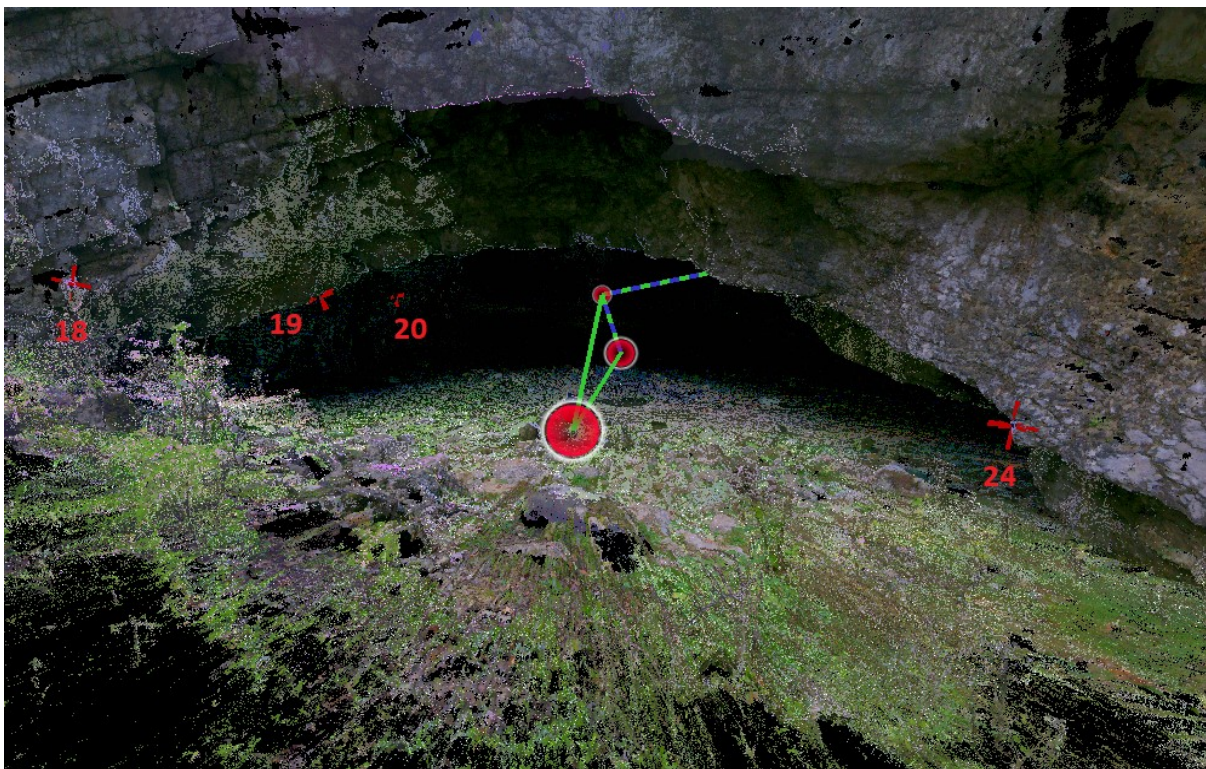
Na koncu smo primerjali še rezultate georeferenciranja oblaka točk v Skednjeni jami, kjer so bile oslonilne točke posnete na obeh vhidih (severni in južni vhod). Razdalja med vhodoma znaša približno 125 m.

Najprej smo izvedli georeferenciranje na točke pri severnem vhodu, torej na točke, kot so že opisane zgoraj v poglavju georeferenciranje Skednene jame.

Kontrolo smo izvedli tako, da smo najprej poiskali koordinate tarč ročno na severnem (slika 34) in pozneje še na južnem (slika 35) delu jame. Rezultate prikazujemo v preglednici 14.



Slika 34: Severni vhod v Skedneno jamo z označenimi oslonilnimi točkami



Slika 35: Južni vhod v Skedneno jamo z označenimi oslonilnimi točkami

Primerjava:

Preglednica 14: Ročno izbrane koordinate tarč, georeferenciranje na severni in južni strani jame

Točka	Georeferenciranje na severni strani Skednene jame			Georeferenciranje na južni strani Skednene jame		
	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
18	1069,075	1008,639	965,891	1069,147	1008,665	965,810
24	1069,796	997,021	964,519	1069,867	997,041	964,450
26	1063,147	880,701	988,485	1063,144	880,760	988,581
17	1058,884	882,545	988,272	1058,882	882,605	988,363

Preglednica 15: Odstopanje po koordinatah

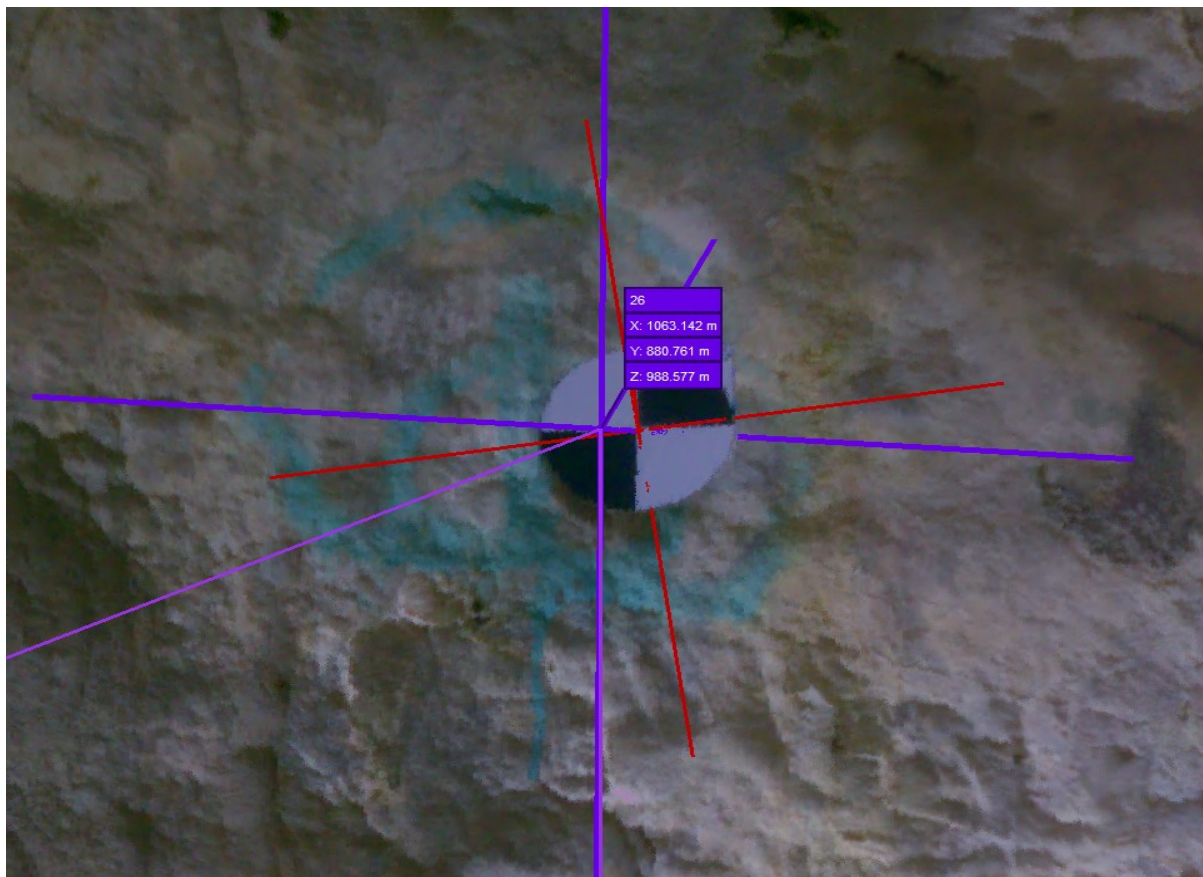
Odstopanje po koordinatah			
Točka	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]
18	0,072	0,026	0,081
24	0,071	0,020	0,069
26	0,003	0,059	0,096
17	0,002	0,060	0,091

Iz preglednice 15 vidimo, da nastane razlika, če georeferenciramo oblak točk na eni ali na drugi strani. Pri dolžini 125 m so položajna odstopanja X in Y do 7 cm, višinsko odstopanje Z pa tudi do 10 cm. V tem primeru bi bilo potrebno narediti georeferenciranje ročno, torej na vse točke in ne samo z ene strani. Če bi izvedli georeferenciranje na vse oslonilne točke, bi dobili koordinate, kot so prikazane v preglednici 16.

Preglednica 16: Koordinate v primeru vklopa na vse oslonilne točke

Točka	X [m]	Y [m]	Z [m]
18	1069,077	1008,658	965,887
24	1069,799	997,036	964,519
26	1063,145	880,735	988,582
17	1058,881	882,579	988,365

V vsakem primeru dobimo največjo razliko v koordinati X , kjer so lahko razlike tudi do 7 cm. To lahko opazimo že v samem programu, kjer bi morali izvesti ročno georeferenciranje, saj program ne najde najbolje tarč, kot če bi vklopili samo na eni strani. Kako najde program tarčo v primeru georeferenciranja z obeh strani, je prikazano na sliki 36.



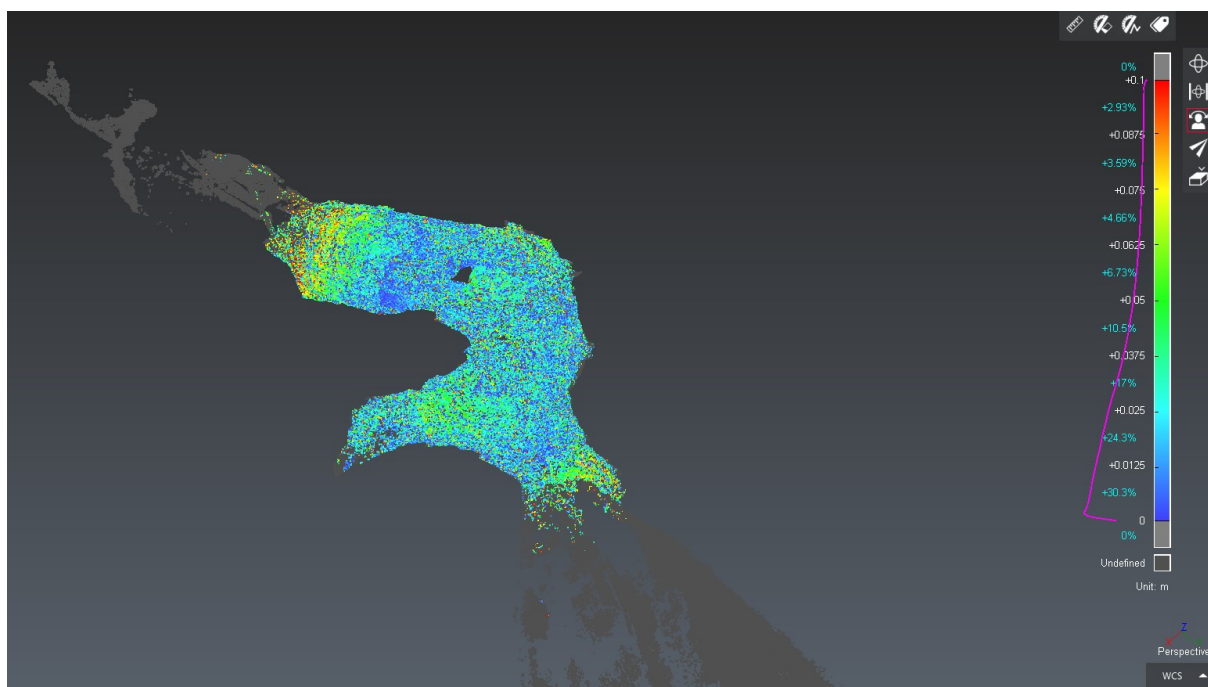
Slika 36: Napake pri georeferenciranju z dveh strani (vijolična barva – avtomatsko georeferenciranje, rdeča barva – ročno georeferenciranje)

Natančnost vklopa lahko tako povečamo z ročnim popravkom določitve položaja tarč.

6.5 Primerjava oblakov točk s programom Cyclone 3DR

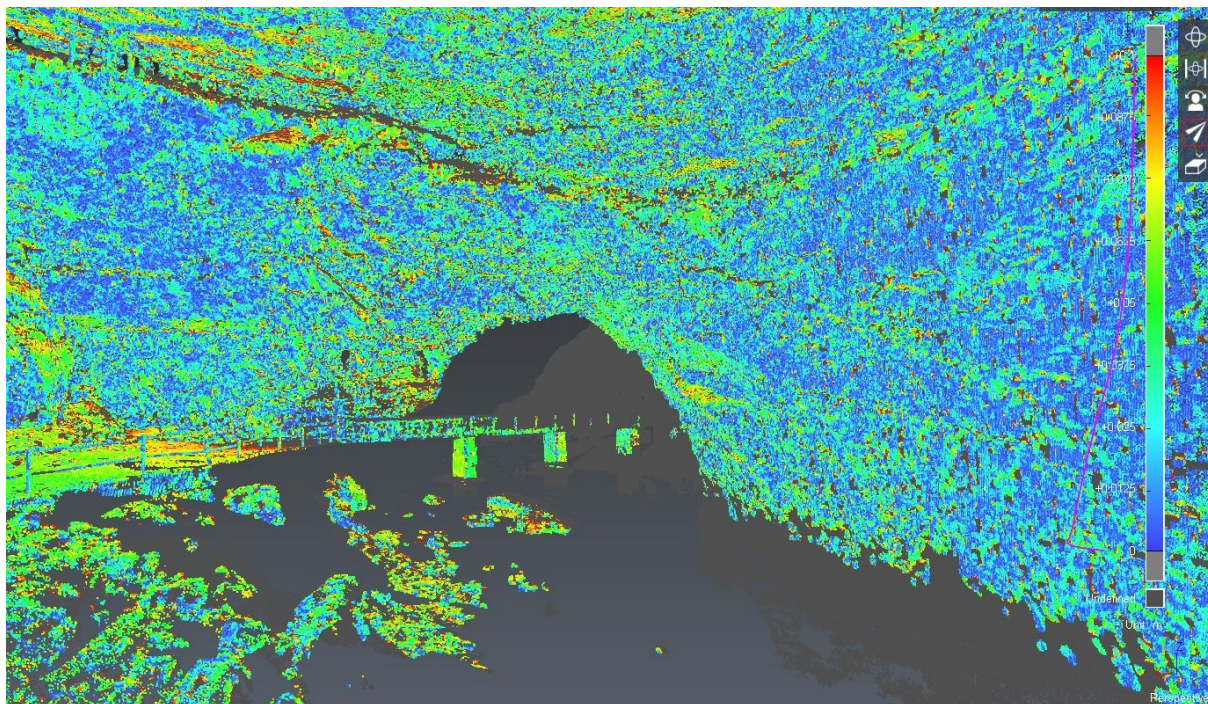
Na koncu smo v programu Cyclone 3DR primerjali oba oblaka točk, posneta z Leica BLK360 in Riegl VZ-400. Primerjavo oblakov točk smo v programu izvedli s funkcijo »Analysis – Inspect Cloud vs Cloud«, kjer nam program primerja medsebojne točke, posnete z obema instrumentoma. Maksimalno oddaljenost smo določili na 10 cm, kar se sklada z 10 cm pri primerjavi vklopov na severni in južni del Skednene jame, saj tako dobimo točno primerjavo med obema oblakoma.

6.5.1 Planinska jama



Slika 37: Razdalje med oblakoma točk Planinske jame VZ-400 in BLK360

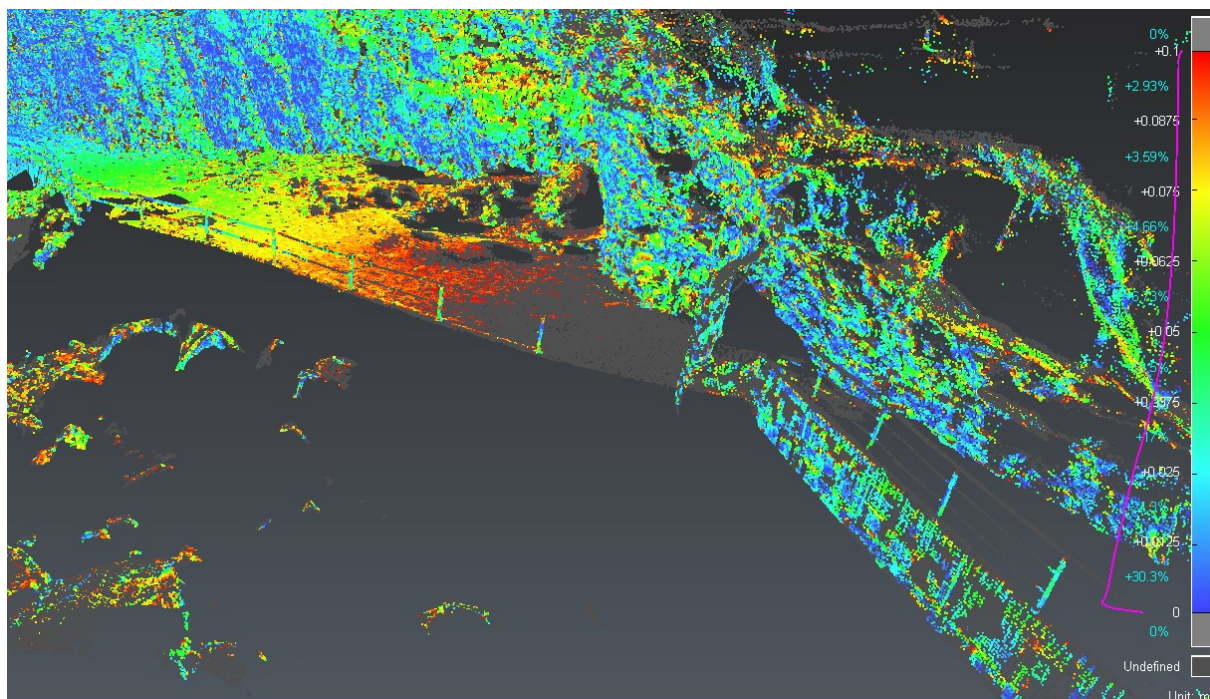
Iz slike 37 je mogoče razbrati, da točke sovpadajo v notranjosti jame, kjer je oddaljenost od tal do stropa enaka pri obeh instrumentih. Dobro prekrivanje točk (30% vseh točk) je na histogramu prikazano v modri barvi. Posledica ujemanja obeh oblakov točk v začetku jame je tudi v georeferenciranju, saj so bile oslonilne točke postavljene in skenirane pri vhodu v jamo. V nekaterih točkah je razvidno prekrivanje med oblakoma točk nekje 5 cm, kar je na sliki 38 in histogramu prikazano v zeleni barvi (približno 16% vseh točk).



Slika 38: Konec Planinske jame in razlike med dvema oblakoma

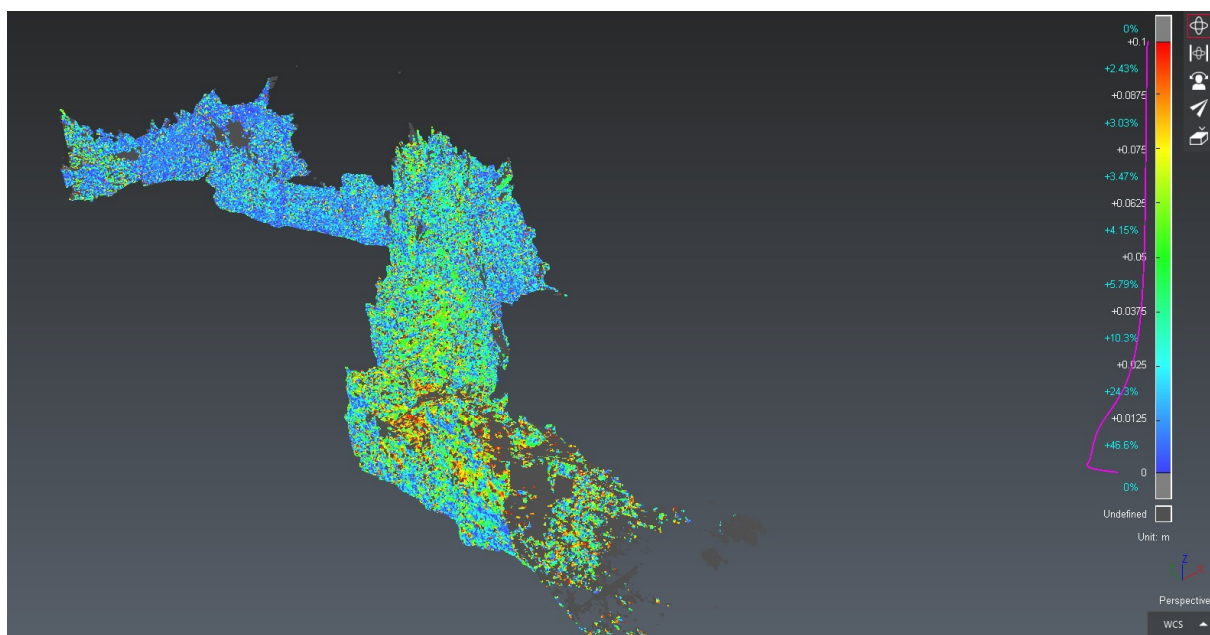
V tem delu imamo odstopanje oblakov od 7 do 10 cm, še posebej pri koncu jame. Skenerja sta bila na koncu jame postavljena na približno enakem položaju, vendar se tukaj pokaže prednost Riegl VZ-400, ki je zajel več točk in tudi točke, ki so bolj oddaljene.

Iz histograma na slikah 37, 38 in 39 lahko sklepamo, da sta laserska skenerja dosegla 30 % odstopanje od 0 do 1,25cm. 3 % je rdečih vrednosti, kar pomeni, da oblaka točk nista dosegla ujemanja, kar je v največjem obsegu pri koncu jame. Zaključimo lahko, da se med obema oblakoma točk ujema 72 % točk do 5 cm, ostalih 28 % pa do 10 cm. Ker smo imeli oslonilne točke postavljene samo v začetku jame, je možna različna orientacija in s tem zasuk celotnega oblaka točk, kar privede do večjega odstopanja pri koncu jame, kjer ni bilo postavljenih oslonilnih točk. Analizo bi lahko izboljšali tako, da bi oslonilne točke postavili po celotni jami in izvedli georeferenciranje na vse točke.



Slika 39: Največje odstopanje med obema skenerjema (do 10 cm – rdeča barva)

6.5.2 Skednena jama



Slika 40: Razlike med oblakoma točk Skednene jame Riegl VZ-400 in BLK360

Iz primerjave oblaka točk (slika 40) lahko vidimo, da je v Skedneni jami boljše ujemanje med obema oblakoma točk. Najslabše ujemanje je bilo pri vhodu, kar je po mojem mnenju zaradi enega stojišča, večje oddaljenosti oziroma večje stene severnega vhoda Skednene jame. Če bi postavili več stojišč, bi bilo ujemanje boljše. Pri južnem vhodu Skednene jame lahko vidimo, da je ujemanje med oblakoma okrog 1 do 2 cm, kar je posledica nižje stene vhoda in posnetih točk iz notranjosti in zunanosti vhoda.

V Skedneni jami se 87 % točk ujema pod 5 cm, kar je zelo dober rezultat. Posledica tega je tudi v velikosti jame, saj Skednena jama ni tako visoka kot Planinska jama.

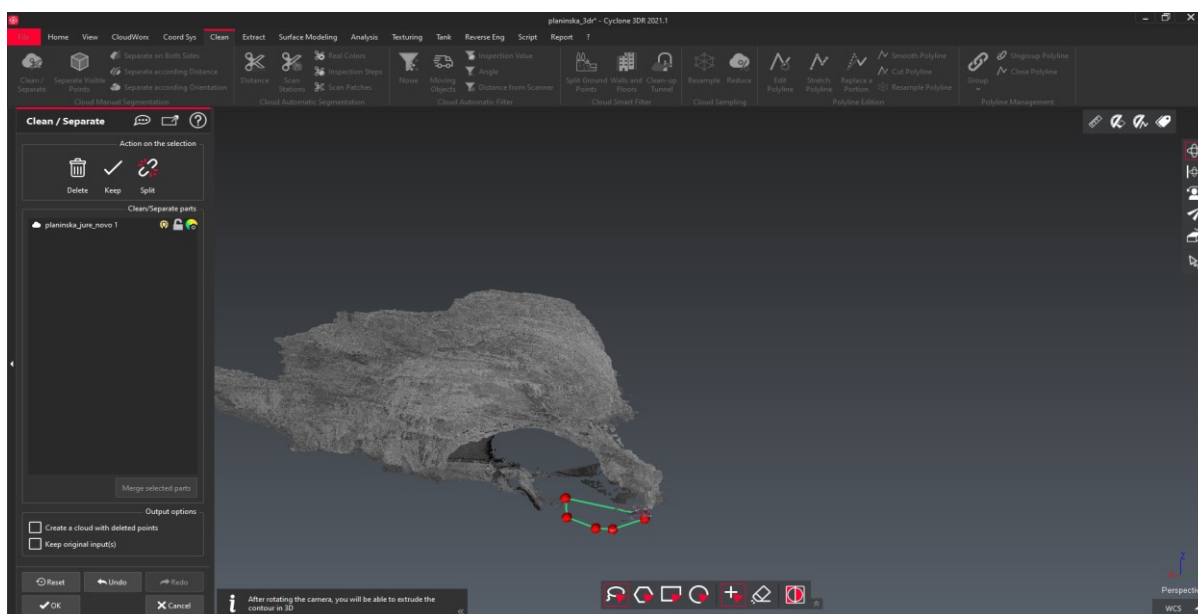
Na koncu lahko po analizi obeh rezultatov sklepamo, da je Leica BLK360 primerljiv z Riegl VZ-400 v kraških jamah z manjšimi rovi, saj v primeru večjih oddaljenosti med tlemi in stropom ne dosega tako dobre natančnosti kot Riegl VZ-400. Mogoče bi lahko dosegli večjo natančnost, če oslonilne točke razvrstili po celotni jami in naredili georeferenciranje na vse oslonilne točke. Rešitev je tudi, da bi del kraške jame posneli dvakrat iz različnih stojišč. Tako bi dobili gostejši oblak točk in boljšo natančnost.

7 IZDELAVA PRELETA JAME

7.1 Planinska jama

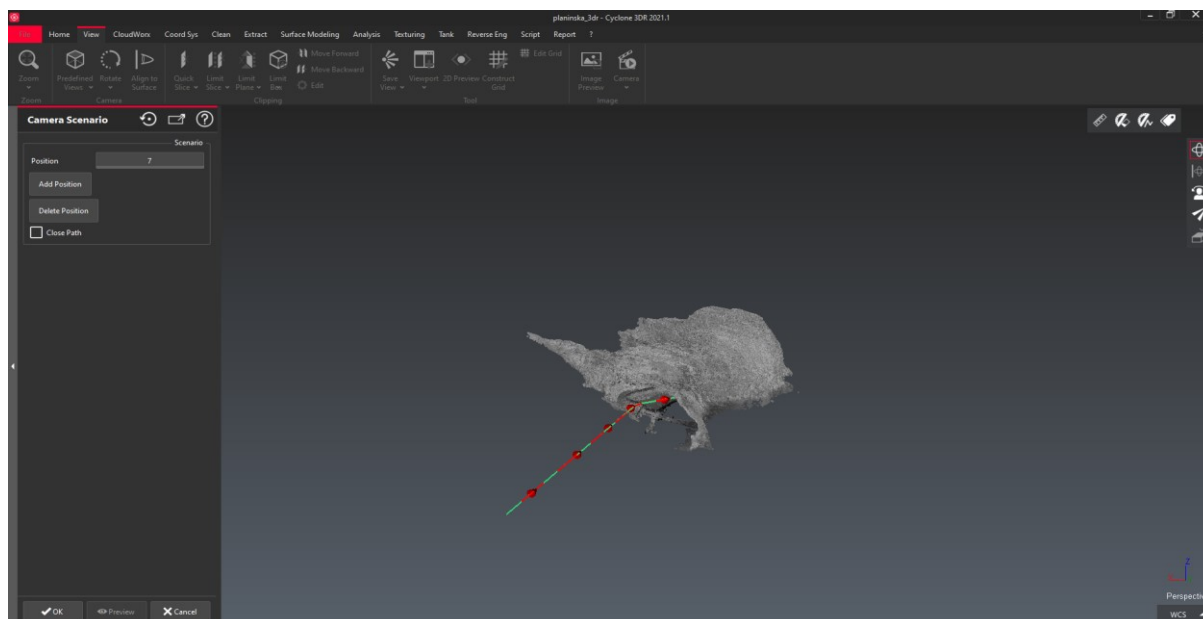
Izdelavo magistrske naloge smo zaključili z izdelavo preleta jame. Prelet jame smo izvedli s programom Leica Cyclone 3DR 2021, saj omogoča tvorjenje posnetkov.

Pred začetkom izdelave preleta smo najprej počistili nepotrebno vegetacijo, ki jo je laserski skener zajel iz notranjosti jame. To smo naredili z ukazom Clean/Separate, kot je razvidno iz slike 41.



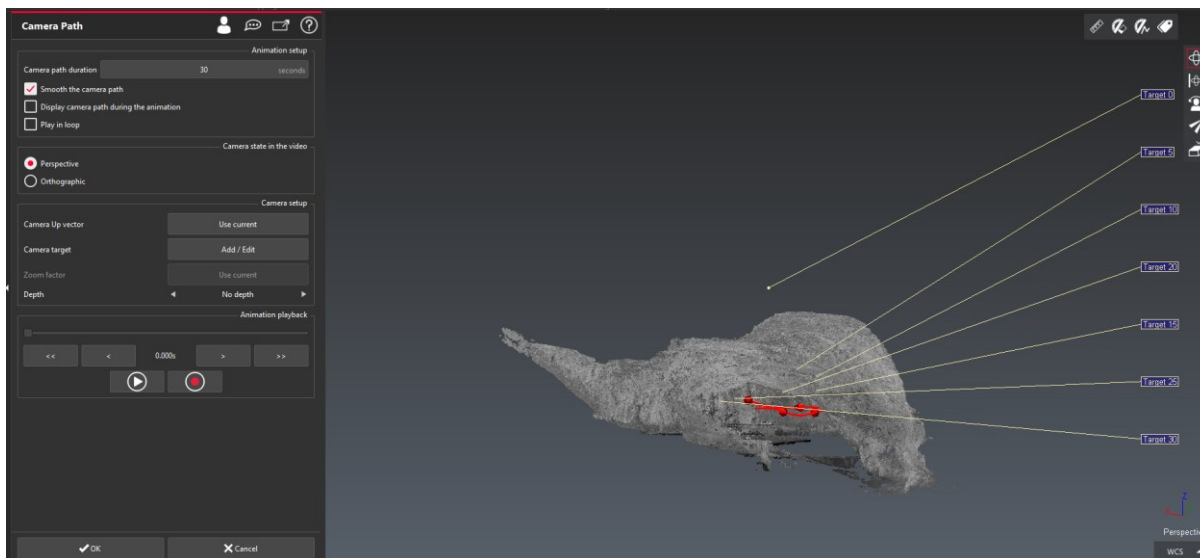
Slika 41: Izrezovanje nepotrebnih točk

Prelet jame smo naredil tako, da smo določili točke oziroma linije (slika 42), po katerih naj program izdeluje posnetke. Linije smo tvorili tako, da se čim bolj zajame celotna jama.



Slika 42: Določanje linij poti kamere Planinske jame

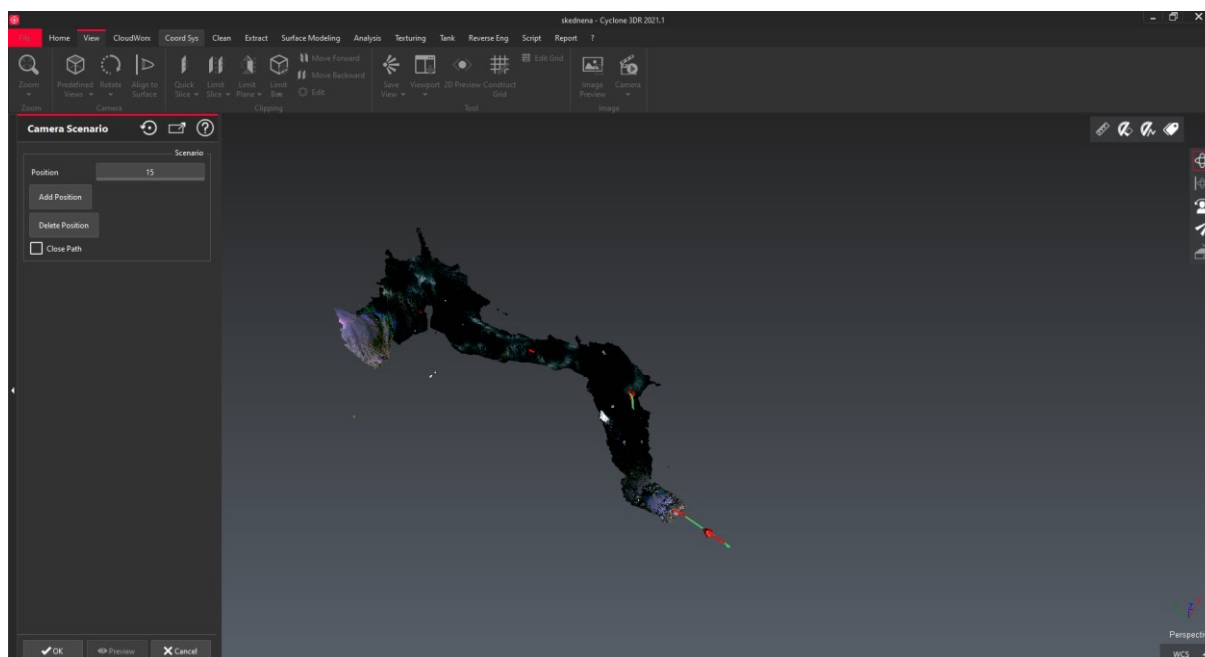
Ko so kamere urejene, smo uredili še animacijo, ki preprečuje hitre spremembe kamere, kot je razvidno iz slike 43.



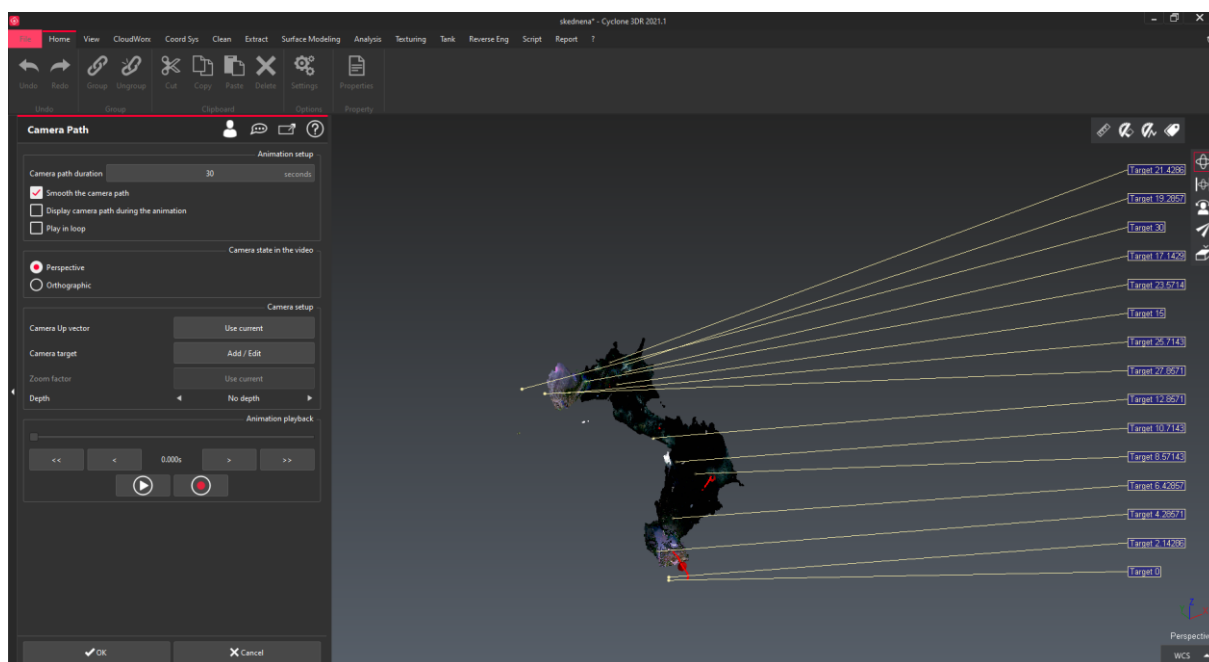
Slika 43: Nastavitev animacije v programu Cyclone 3DR (Planinska jama)

7.2 Skednena jama

Tako kot za Planinsko jamo smo tudi za Skedneno jamo naredili prelet celotne jame. Postopek je potekal enako kot pri Planinski jami, za razliko od tega, da je pri tej jami zaradi drugačne oblike narejenih več pozicij kamere (slika 44 in slika 45).



Slika 44: Določanje linij poti kamere Skednene jame



Slika 45: Nastavitev animacije v programu Cyclone 3DR (Skednena jama)

8 ZAKLJUČEK

V okviru magistrskega dela smo naredili primerjavo dveh laserskih skenerjev Leica BLK360 in Riegl VZ-400 za skeniranje kraških jam. Preizkušali smo ju v Planinski in Skedneni jami. Primerjavo smo izvedli na podlagi posnetega oblaka točk, ki je rezultat laserskega skeniranja. Iz vsakega oblaka točk lahko pridobimo različne informacije. Nas je zanimala predvsem primerjava postopkov registracije in georeferenciranja, hitrosti, dosega, zahtevnosti za uporabo na terenu, natančnost in gostota oblaka točk. Za kakovostno določitev vseh lastnostih pa smo morali v izmero vključiti tudi druge geodetske metode. Z GNSS-metodo smo določili približne koordinate za orientacijo tahimetra za določitev položaja točk v državnem koordinatnem sistemu, zato lahko rečemo, da smo določitev položaja Planinske jame dosegli na osnovi GNSS-izmere, klasične polarne geodetske izmere in laserskega skeniranja. V Skedneni jami teh metod nismo uporabili, saj so zajem izvedli že v preteklih raziskavah [12 in 13]. Naša naloga je bila primerjava obeh laserskih skenerjev.

Zaradi večjega števila oblaka točk je bilo potrebno najprej izbrati primerno programsko opremo, saj je na voljo veliko komercialnih programov. Izbrali smo programsko opremo, ki je na voljo na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, saj so vsi ti programi plačljivi. S programi je mogoče ugotoviti in primerjati različne skenerje, saj lahko z njimi izmerimo dolžine med vsako točko ali oblakom točk, preverimo količino zajetih podatkov, izvedemo georeferenciranje z navezavo na več oslonilnih točk in pozneje izdelamo 3D-vizualizacijo za lažjo predstavo kraškega sveta.

V okviru izdelave magistrske naloge smo ugotovili, da je Leica BLK360 lažji instrument in bolj praktičen za izvedbo meritev v jamskem svetu, zlasti če smo omejeni na okolico jame. Problem lahko nastane pri instrumentu Riegl VZ-400, in sicer pri prenosu instrumenta iz enega stojišča na drugega. V tem primeru sta potrebna vsaj dva človeka, saj moramo zraven skenerja nositi tudi prenosni računalnik, če želimo registracijo izvesti že na terenu. Leica BLK360 teh problemov nima, saj lahko meritve sprožimo preko prenosne tablice, ki nam pozneje tudi omogoča registracijo oblakov točk. Večji problem se pri skenerju Leica BLK360 pojavi, ker lahko pride do napak pri georeferenciranju oblakov točk v državni ali lokalni koordinatni sistem, kadar imamo posnete oslonilne točke na različnih vhodih. Odstopanje je lahko tudi do 7 cm, kar pomeni, da milimetre natančnosti v državnem koordinatnem sistemu ne moremo zagotoviti. Problem bi lahko rešili z zaključenim poligonom in izravnavo mreže. Če želimo imeti večji oblak točk, potem je izmere bolje opraviti z instrumentom Riegl VZ-400, ki je v primerjavi z Leica BLK360 posnel v minuti tudi do milijon točk več. Prav tako je pri tem instrumentu večji tudi doseg, saj lahko meri točke, ki so oddaljene tudi do 600 m. V našem primeru je bila najbolj oddaljena točka na dolžini 400 m. Pri instrumentu Leica BLK360 je doseg manjši in znaša približno 60 m. V našem primeru je bil doseg najbolj oddaljene točke pri instrumentu Leica BLK360, in sicer 54 metrov.

Na koncu smo naredili analizo primerjave obeh oblakov točk. Ugotovili smo, da z instrumentom Leica BLK360 potrebujemo več stojišč in gostejši oblak točk. Le tako točno določimo oslonilne točke za potrebe georeferenciranja. Smiselno je razporediti oslonilne točke po celotni jami in narediti georeferenciranje na vse oslonilne točke. Tako se izognemo različni orientaciji in s tem zasuku celotnega oblaka točk, kar privede do večjih odstopanj dlje kot smo oddaljeni od oslonilnih točk. Instrument Riegl VZ-400 v takih okoliščinah dobro deluje. Kot je razvidno tudi iz rezultatov, je ob manjšem številu stojišč posnel več točk, kar pomeni gostejši oblak točk. Razlika se je pokazala v Skedneni jami, kjer je strop nižji kot v Planinski jami. To pomeni, da je Leica BLK360 primernejši za manjše in nizke kraške jame, medtem ko Riegl VZ-400 enako deluje v majhnih in velikih jamah.

V okviru izdelave magistrskega dela smo dosegli vse zahtevane rezultate in tako ugotovili prednosti in slabosti obeh instrumentov. Če želimo doseči realen pregled kraškega sveta, je dovolj, da uporabimo laserski skener Leica BLK360, saj je zelo natančen, omogoča lažjo registracijo in zadostno količino oblaka točk za potrebne analize.

Na koncu smo izdelali še prelet celotne jame, vendar je bila za to potrebna tudi dobra računalniška oprema, saj oblaki vsebujejo velike količine podatkov.

9 VIRI

- [1] Zakon o varstvu podzemnih jam. Uradni list RS št. 2/04, 61/06 – ZDru-1, 46/14 – ZON-C in 21/18 – ZNOrg.
- [2] Blais, F. 2004. Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging*. 13, 1: 231–240.
<https://www.spiedigitallibrary.org/journals/journal-of-electronic-imaging/volume-13/issue-1/0000/Review-of-20-years-of-range-sensor-development/10.1117/1.1631921.short?SSO=1> (Pridobljeno 15. 10. 2021.)
- [3] Robson Brown, K. A., Chalmers, A., Saigol, T., Green, C., D’Errico, F. 2001. An automated laser scan survey of the Upper Palaeolithic rock shelter of Cap Blanc. *Journal of Archaeological Science*. 28, 3: 283–289.
- [4] Perperidoy, D. G., Tzortzioti, E., Sigizis, K. 2010. A new methodology for surveying and exploring complex environments using 3D scanning. V: *The XXIV FIG International Congress 2010*, 11–16. april 2010, Sydney, Avstralija: str. 1–14.
- [5] Fryer, J. G., Chandler, J. H., El-Hakim, S.F. 2005. Recording and modelling an aboriginal cave painting: with or without laser scanning? *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*: 1–8.
- [6] Oludare, I. M., Pradhan, B. 2016. A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development. *International Journal of Speleology*. 45, 1: 71–88.
<https://digitalcommons.usf.edu/ijs/vol45/iss1/8/> (Pridobljeno 26. 10. 2021.)
- [7] eKataster jam.
<https://www.katasterjam.si/> (Pridobljeno 15. 9. 2020.)
- [8] OpenStreetMap.
<https://www.openstreetmap.org> (Pridobljeno 15. 9. 2020.)
- [9] Jakopin, P. 1981. Macrostereological Evaluation of Cave Space. *Proceedings of the 3rd European symposium for stereology. Stereol. Jugosl.* 3, 1: 621–628.
- [10] Planinska jama.
<http://planina.si/kategorija/planinska-jama> (Pridobljeno 5. 10. 2021.)
- [11] Planinska jama.
https://sl.wikipedia.org/wiki/Planinska_jama (Pridobljeno 5.10.2021.)
- [12] Urbančič, T., Mihevc, A. 2019. Movements and polygonal ground formation monitoring with terrestrial laser scanning in the cave Skednena jama. V: *European Geosciences Union, General Assembly 2019*, Dunaj, Avstrija, Geophysical research abstracts, Vol. 21.
- [13] Mihevc, A., Urbančič, T. 2019. Spremljanje premikov in oblikovanja poligonalnih tal v Skedneni jami s terestričnim laserskim skeniranjem. V: *Raziskave s področja geodezije in*

- geofizike. Kuhar, M. (ur.), Vreča, P. (ur.), Zupančič P. (ur.) idr. 24. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 121–130.
- [14] Kogoj, D., Kregar, K. 2019. Zapiski in gradivo predavanj in vaj. Geodetski merski sistemi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (neobjavljeno gradivo).
- [15] Leica BLK360 slikovni laserski skener.
<https://www.geoservis.si/produkti/51-laserski-skenerji/423-leica-blk360> (Pridobljeno 23. 9. 2021.)
- [16] RIEGL Laser Measurement Systems. 2004. RiSCAN PRO User manual. Horn, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH: 150 str.
<http://www.riegl.com/nc/products/> (Pridobljeno 15. 10. 2021.)
- [17] RIEGL Laser Measurement Systems. 2019. Riegl VZ-400i Technical data. Horn, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH: 9–10.
- [18] Leica TS15 Imaging Total Station.
<https://totalstations.co/leica-viva-ts15-imaging-total-station/> (Pridobljeno, 15. 10. 2021.)
- [19] Leica Cyclone REGISTER 360 - 3D Laser Scanning Point Cloud Registration Software.
<https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-register-360> (Pridobljeno 8. 10. 2021.)
- [20] Leica Cyclone 3DR - All-in-one Deliverable Solution.
<https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-3dr> (Pridobljeno 8. 10. 2021.)
- [21] Hostnik, A. 2013. Analiza postopkov obdelave podatkov terestričnega laserskega skeniranja v programu RiSCAN PRO. Diplomsko naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Hostnik): 24–28.
- [22] RIEGL VZ-400i.
<http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/48/> (Pridobljeno 13. 10. 2021.)
- [23] Aljančič, M. (ur.). 1983. Naše jame, 25. Ljubljana, Jamarska zveza Slovenije: 122 str.
- [24] Presetnik, P., Mayaud, C., Blatnik, M. 2018. Nyctalus noctula, 22. 8. 2018, cave Planinska jama, Slovenia. Hypsugo, Glasnik za istraživanje šišmiša Balkana. 3, 2: 31–33.
<http://centarzakrs.ba/sismisi/2018/12/30/hypsugo-3-2-2018/> (Pridobljeno 10. 10. 2021.)
- [25] Leica Viva.
<https://www.geoservis.si/novosti/116-leica-viva-image-assisted-surveying> (Pridobljeno 26. 9. 2021.)
- [26] Leica TS30. Technical Data.

- https://leica-geosystems.com/sftp/files/archived-files/TS30_Technical_Data_en.pdf
(Pridobljeno 26. 9. 2021.)
- [27] Leica GS18 T GNSS RTK Rover.
<https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-gs18-t> (Pridobljeno 26. 9. 2021.)
- [28] Kraška jama.
https://sl.wikipedia.org/wiki/Kra%C5%A1ka_jama (Pridobljeno 15. 9. 2021.)
- [29] Kraške jame in posebnosti živalstva.
<http://www.slovenijanadlani.si/kraske-jame/> (Pridobljeno 18. 9. 2021.)
- [30] Planinska jama.
<https://www.visit-postojna.si/si/kaj-videti/cudovito-planinsko-polje/planinska-jama>
(Pridobljeno 8. 10. 2021.)
- [31] Konič, S. 2008. Prispevek k preverjanju zdrsa skalnega bloka z modelom medsebojne preslikave oblakov točk. Diplomsko naloga. Ljubljana, Naravoslovnotehniška fakulteta (samozaložba S. Konič): 115 str.
- [32] Kraus, K. 2004. Photogrammetry. Geometry from Images and Laser Scans. Vol.1. Second edition. Berlin, Walter de Gruyter: 459 str.
- [33] Tsakiri, M., Sigizis, K., Billiris, H., Dogouris, S. 2007. 3D Laser Scanning for the Documentation of Cave Environments. V: 11th ACUUS Conference: Underground Space, Expanding the Frontiers, 10–13. september 2007, Atene: str. 403–408.
- [34] Fryer, J., El-Hakim, S. F., Picard, M. 2004. Modeling and visualization of aboriginal rock art in the Baiame Cave. V: Proceedings of the XXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, Turčija, 12–23. julij 2004, Commission V, Working Group: str. 990–995.