

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujte na
bibliografske podatke, kot je navedeno:

Bončina, N., 2016. Analiza uporabe stereoparov bližnjeslikovnih aerofotografij za izdelavo geodetskega načrta. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Kosmatin Fras, M.): 61 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5863/>

Datum arhiviranja: 5-10-2016

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's
bibliographic information as follows:

Bončina, N., 2016. Analiza uporabe stereoparov bližnjeslikovnih aerofotografij za izdelavo geodetskega načrta. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kosmatin Fras, M.): 61 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5863/>

Archiving Date: 5-10-2016



Kandidatka:

NINA BONČINA

**ANALIZA UPORABE STEREOPAROV
BLIŽNjeslikovnih aerofotografiј za
izdelavo geodetskega načrta**

Diplomska naloga št.: 1003/G

**ANALYSIS OF THE USE OF CLOSE-RANGE AERIAL
STEREO-PAIRS FOR PRODUCING A GEODETIC PLAN**

Graduation thesis No.: 1003/G

Mentorica:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Ljubljana, 16. 09. 2016

ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Ta stran je namenoma prazna.

IZJAVE

Spodaj podpisana študentka Nina Bončina, vpisna številka 26201734, avtorica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Analiza uporabe stereoparov bližnjeslikovnih aerofotografij za izdelavo geodetskega načrta

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
 - b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V: Ljubljani

Datum: 20. 8. 2016

Podpis študentke:

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.7/.8 (043.2)
Avtor:	Nina Bončina
Mentorica:	doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
Naslov:	Analiza uporabe stereoparov bližnjeslikovnih aerofotografij za izdelavo geodetskega načrta
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	61 str., 15 preg., 52 sl., 37 en., 5 pril.
Ključne besede:	bližnjeslikovna aerofotogrametrija, stereopar, oblak točk, zrakoplov, geodetski načrt

Izvleček

V diplomski nalogi je predstavljena izdelava geodetskega načrta iz stereoparov aerofotografij, posnetih z brezpilotnim zrakoplovom. Namen naloge je ugotoviti prednosti in slabosti metode stereozajema za izdelavo geodetskih načrtov velikih meril v primerjavi s klasičnim postopkom izdelave geodetskega načrta, kakršna je terestrična geodetska izmerna. V nalogi na praktičnem primeru opišemo postopek zajema aerofotografij z brezpilotnim zrakoplovom Aibotix X6, postopek obdelave aerofotografij v programskem orodju PhotoScan ter izdelavo stereoparov in fotogrametrični zajem v programskem orodju STEZA, predstavimo izdelane fotogrametrične izdelke (oblak točk, DMR, DMP in ortofoto) ter ocenimo kakovosti stereozajema. Primerjamo tri različne metode zajema podatkov in predstavimo njihovo uporabnost.

Z oceno natančnosti in analizo uporabnosti metode stereozajema so bila potrjena naša predvidevanja, da je ta metoda primerna za izdelavo načrtov velikih meril, dosega ustrezne natančnosti in je veliko hitrejša za zajem podatkov v primerjavi s klasično terensko izmero. Fotogrametrični izdelki, ki nastanejo v postopku obdelave, imajo dodano uporabno vrednost, ki je klasična geodetska izmerna ne prinaša.

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK:	528.7/.8 (043.2)
Author:	Nina Bončina
Supervisor:	Assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph.D.
Title:	Analysis of the use of close-range aerial stereo-pairs for producing a geodetic plan
Document Type:	Graduation Thesis – University studies
Notes:	61 p., 15 tab., 52 fig., 37 eq., 5 ann.
Key words:	close-range aerial photogrammetry, stereo-pair, point cloud, UAV, geodetic plan

Abstract

The thesis presents the analysis of the use of close-range aerial stereo-pairs for producing a geodetic plan. The aim of the thesis is to analyze strengths and weaknesses of stereoscopic data acquisition of stereo-pairs for producing a large-scale geodetic plan, and to compare the data with the reference data represented by classical geodetic measurements. We use a practical case to describe data acquisition process by means of the unmanned aerial vehicle (UAV) Aibotix X6; image processing by means of the photogrammetric software PhotoScan; process of making stereo-pairs and stereoscopic data acquisition performed by the photogrammetric workstation. Photogrammetric products (dense point cloud, digital terrain and surface model, orthophoto) are presented as well as their accuracy and stereoscopic data acquisition quality analysis. Three different methods of data acquisition are compared and their suitability is evaluated.

Data evaluation results show that UAV system can be used for large scale mapping. In comparison with reference classical geodetic measurement method, the proposed method is cheaper and faster while producing comparable results. Photogrammetric products show an added value not present in the classical geodetic survey.

Ta stran je namenoma prazna.

ZAHVALA

Iskrena hvala mentorici Mojci Kosmatin Fras za idejo, sprejem mentorstva in zaupanje.

Hvala tudi podjetju Geodetska družba d. o. o., ker so mi omogočili izdelavo diplomske naloge, ter posebna hvala sodelavcu in neuradnemu mentorju Blažu Vidmarju za vse nasvete, ideje in strokovno pomoč.

Zahvala gre tudi moji širši družini za podporo in spodbudo.

Žiga, hvala za potrpežljivost.

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	V
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	VII
ZAHVALA	IX
1 UVOD.....	1
1.1 Motivacija.....	1
1.2 Opredelitev ciljev naloge	2
1.3 Pregled literature in raziskav	2
1.4 Struktura naloge.....	3
2 TEORETIČNE OSNOVE.....	5
2.1 Geodetski načrt	5
2.2 Bližnjeslikovno aerofotografinanje	5
2.2.1 Načrtovanje leta in zajem fotografij	6
2.2.2 Obdelava fotografij	7
2.2.2.1 Orientacija fotografij in kalibracija fotoaparata	7
2.2.2.2 Izdelava fotogrametričnih izdelkov	8
2.3 Fotogrametričen zajem podatkov	9
2.4 Standard ASPRS za določitev položajne točnosti prostorskih podatkov.....	9
2.4.1 Enačbe za izračun RMSE po standardu NSSDA	10
2.4.2 Ocena kakovosti fotogrametričnih izdelkov.....	11
3 ZAJEM PODATKOV	12
3.1 Zahteve naročnika.....	12
3.2 Načrtovanje.....	12
3.2.1 Namen in merilo načrta	12
3.2.2 Območje načrta	12
3.2.3 Uporabljena oprema in programska orodja	13
3.2.3.1 Brezpilotni letalnik Aibot X6	13
3.2.3.2 Fotografski aparat Nikon CoolPix A	14
3.2.3.3 Programsко orodje PhotoScan	15
3.2.3.4 Programski paket STEZA	16
3.2.3.5 Druga programska orodja	17
3.3 Izvedba meritev	17

3.3.1	Signalizacija in snemanje oslonilnih točk.....	18
3.3.2	Snemanje površja z zrakoplovom.....	18
3.3.3	Terenska izmera detajla	20
4	OBDELAVA PODATKOV	21
4.1	Obdelava podatkov v programskem orodju PhotoScan	22
4.1.1	Pregled in priprava fotografij	22
4.1.2	Povezovanje fotografij prek homolognih točk	23
4.1.2.1	Določitev objektnega koordinatnega sistema	23
4.1.2.2	Določitev parametrov notranje orientacije	23
4.1.2.3	Določitev približnih zunanjih parametrov orientacije	24
4.1.2.4	Določitev točnih zunanjih parametrov orientacije.....	24
4.1.3	Izdelava gostega oblaka točk	26
4.1.4	Izdelava digitalnega modela reliefsa	26
4.1.5	Izdelava ortofota	27
4.2	Stereozajem v programskem paketu STEZA	29
4.2.1	Metoda in viri za stereozajem.....	29
4.2.2	Izdelava piramid	29
4.2.2.1	Izdelava piramid aeroposnetkov	29
4.2.2.2	Izdelava piramid rastrskih slojev	31
4.2.2.3	Izdelava piramid točkovnih podatkov.....	31
4.2.3	Stereozajem podatkov.....	31
4.2.3.1	Pravila za zajem.....	31
4.2.3.2	Predmet zajema.....	32
4.2.3.3	Potek dela	32
4.2.3.4	Problemi pri zajemu detajla	33
4.3	Izdelava in izris geodetskega načrta v programskem orodju AutoCAD	33
4.4	Geometrične primerjave.....	33
4.4.1	Priprava podatkov za primerjavo.....	34
4.4.2	Izvedba geometričnih primerjav	34
4.4.2.1	Cesta in robniki.....	35
4.4.2.2	Železnica.....	35
4.4.2.3	Teren in vegetacija.....	36
4.4.2.4	Stavbe	37
4.4.2.5	Točkovni znaki	38
5	REZULTATI OBDELAVE IN PRIMERJAVA METOD.....	39

5.1	Rezultati obdelave	39
5.1.1	Fotogrametrični oblak točk	39
5.1.2	DMR in DMP	39
5.1.3	Ortofoto	41
5.1.4	Geodetski načrt, izdelan z zajemom iz stereoparov	41
5.2	Ocena kakovosti in natančnosti obdelave v programu PhotoScan	42
5.3	Ocena kakovosti in položajne točnosti fotogrametričnih izdelkov	43
5.3.1	Položajna točnost geodetskega načrta	43
5.3.2	Položajna točnost ortofota in DMR	44
5.4	Rezultati geometričnih primerjav	44
5.4.1	Cesta	44
5.4.2	Železnica	47
5.4.3	Vegetacija	50
5.5	Analiza uporabnosti testiranih metod	53
6	RAZPRAVA	55
VIRI		57

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Enačbe za izračun parametrov leta (povzeto po: Kraus, 2007)	7
Preglednica 2.2: Mere za določitev točnosti prostorskih podatkov (ASPRS, 2014).....	10
Preglednica 2.3: Mere točnosti prostorskih podatkov (ASPRS, 2014)	10
Preglednica 2.4: Zahtevane natančnosti oslonilnih točk in projekcijskih centrov ob dani točnosti končnega izdelka	11
Preglednica 3.1: Tehnične karakteristike letalnika Aibot X6 (Aibotix, 2016).....	14
Preglednica 3.2: Tehnične lastnosti fotoaparata Nikon CoolPix A (Nikon, 2016)	15
Preglednica 3.3: Minimalna in priporočljiva konfiguracijo računalnika	15
Preglednica 3.4: Zahtevana in uporabljena strojna oprema	16
Preglednica 3.5: Parametri snemanja študijskega območja z zrakoplovom.....	19
Preglednica 4.1: Kalibracijski parametri fotoaparata Nikon CoolPix A	24
Preglednica 5.1: Natančnost določitve položaja fotoaparata in oslonilnih točk po izravnavi bloka fotografij	42
Preglednica 5.2: Ocena položajne točnosti na kontrolnih točkah, zajetih z metodo stereozajema	43
Preglednica 5.3: Ocena položajne točnosti na kontrolnih točkah, zajetih s kombinirano metodo	44
Preglednica 5.4: Časovna ocena izdelave geodetskega načrta (19 ha).....	53
Preglednica 5.5: SWOT analiza testiranih metod za zajem podatkov visoke natančnosti	54

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Delovni postopek zajema in obdelave fotografij posnetih z zrakoplovom (povzeto po: Nex in Remondino, 2014).....	6
Slika 2.2: Prikaz leta in opis pomena prametrov leta (Kraus, 2007, str. 132).....	6
Slika 3.1: Območje geodetskega načrta Črnuče, omejeno z rdečo linijo (Vir: ortofoto; GURS, 2012)	13
Slika 3.2: Uporabljen brezpilotni letalnik Aibot X6 in fotoaparat Nikon CoolPix A	14
Slika 3.3: Uporabljen fotogrametrična postaja	16
Slika 3.4: Shema priprave podatkov in njihova uporaba s programom STEZA (STEZA, 2014: str. 11).....	17
Slika 3.5: Območje zajema, omejeno z rdečo linijo, in lokacije oslonilnih točk (Vir: ortofoto; GURS 2012)	18
Slika 3.6: Načrt leta	19
Slika 4.1: Shema poteka obdelave podatkov in uporabljen programska orodja	21
Slika 4.2: Primer EXIF metapodatkov uporabljenih fotografij	22
Slika 4.3: Vse posnete fotografije (levo) in fotografije, ki smo jih vključili v analizo (desno)	23
Slika 4.4: Primera točnega lociranja markerja.....	25
Slika 4.5: Prikaz natančnosti položaja fotoaparata in markerjev po končanem slikovnem ujemaju	25
Slika 4.6: Parametri zunanje orientacije, potrebni za uvoz v program STEZA	26
Slika 4.7: Levo prikaz lukanj v klasificiranem oblaku točk in desno prikaz točk šuma (rožnate točke)	27
Slika 4.8: Jašek na ortofotu s prostorsko ločljivostjo 5 cm (levo) in 2,2 cm (desno)	27
Slika 4.9: Po korakih prikazano popravljanje ortomozaika	28
Slika 4.10: Ortofoto, izdelan na podlagi DMR (levo) in DMP (desno).....	28
Slika 4.11: Most na ortofotu, izdelan na podlagi DMR (levo) in DMP (desno).....	28
Slika 4.12: Izdelava piramid stereoposnetkov v programu STEZA	30
Slika 4.13: Prikaz stereopara v programu STEZA	30
Slika 4.14: Prikaz stereopogleda (levo) in monopogleda (desno) v programu STEZA.....	31
Slika 4.15: Stereopogled (levo) in monopogled (desno) v programu STEZA po naloženih vseh piramidah, kjer stereopogled prikazuje še lidarske (rdeče) in DMR točke (modre)	31
Slika 4.16: Prikaz zajema, levo je trenutno območje v stereopogledu in desno v monopogledu	32

Slika 4.17: Delni izris načrta pred (levo) in po (desno) urejanju v AutoCADu	33
Slika 4.18: Shema geometričnih primerjav.....	34
Slika 4.19: Detajlne točke na območju ceste	35
Slika 4.20: Detajlne točke na območju železnice	36
Slika 4.21: Zajem železnice po fotogrametričnem oblaku točk	36
Slika 4.22: Detajlne točke na območju zarasti ozziroma visoke vegetacije	37
Slika 4.23: Zajete strehe stavb v stereopogledu (levo), na ortofotu (v sredini) in na oblaku točk (desno)	37
Slika 4.24: Drevo v stereopogledu (levo) in na ortofotu (desno).....	38
Slika 5.1: Fotogrametrični oblak točk z izbrano srednjo kakovostjo in agresivno globino filtriranja	39
Slika 5.2: Izdelan 3D model reliefa, (a) v pravih barvah, (b) prikaz ploskve	40
Slika 5.3: Izdelan DMP.....	40
Slika 5.4: Izrez geodetskega načrta.....	41
Slika 5.5: Prvi prečni profil.....	45
Slika 5.6: Grafični prikaz primerjave treh metod na primeru ceste	45
Slika 5.7: Histogram višinskih razlik med terenskimi točkami in stereozajemom (levo) in lokacije točk (desno).....	46
Slika 5.8: Histogram višinskih razlik med terenskimi točkami in DMR (levo) in lokacije točk (desno)	46
Slika 5.9: Histograma horizontalnih odstopanj med terensko izmerno in stereozajemom na območju ceste	47
Slika 5.10: Histograma horizontalnih odstopanj med terensko izmerno in ortofotom na območju ceste	47
Slika 5.11: Prvi prečni profil železnice.....	48
Slika 5.12: Grafični prikaz odstopanj med metodami na primeru železnice.....	48
Slika 5.13: Histogram odstopanj med terenskimi točkami in stereozajemom (levo) in lokacije točk (desno) na območju železnice	49
Slika 5.14: Histogram odstopanj med terenskimi točkami in DMR (levo) in lokacije točk (desno) na območju železnice	49
Slika 5.15: Histograma odstopanj med terensko izmerno in stereozajemom na območju železnice	50
Slika 5.16: Histograma odstopanj med terensko izmerno in ortofotom na območju železnice	50
Slika 5.17: Prvi prečni profil na zaraščenem območju	51
Slika 5.18: Grafični prikaz odstopanj med metodami na primeru goste in visoke vegetacije	51

Slika 5.19: Histogram odstopanj med terenskimi točkami in stereozajemom (levo) in lokacije točk (desno) na območju visoke vegetacije 52

Slika 5.20: Histogram odstopanj med terenskimi točkami in DMR (levo) in lokacije točk (desno) na območju visoke vegetacije 52

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

- 2D Dvodimenzionalni prostor; dvodimenzionalen
- 3D Tridimenzionalni prostor; tridimenzionalen
- CAS Ciklično aerofotografiranje Slovenije
- CMOS *Complementary Metal–oxide–semiconductor*, sl. vrsta slikovnega senzorja
- EXIF *Exchangeable Image File Format*, sl. format za shranjevanje metapodatkov fotografij
- DMP Digitalni model površja
- DMR Digitalni model reliefa
- DMV Digitalni model višin
- DSLR *Digital Single-lens Reflex*, sl. digitalni zrcalnorefleksni fotoaparat
- DTK5 Vektorska zbirka topografskih podatkov, ki ustreza ravni merila 1:5000
- GCP *Ground Control Point*, sl. oslonilna točka
- GJI gospodarska javna infrastruktura
- GKOT Georeferenciran in klasificiran oblak točk
- GNSS *Global Navigation Satellite System*, sl. globalni satelitski navigacijski sistem
- GPS *Global Positioning system*, sl. globalni sistem pozicioniranja
- GSR *Ground Sampling Resolution*, sl. prostorska ločljivost na tleh
- INS *Inertial Navigation System*, sl. inercialni navigacijski sistem
- LIDAR *Light Detection and Ranging*, sl. lasersko skeniranje
- LSS Lasersko skeniranje Slovenije
- NVA *Non-vegetated Vertical Accuracy*, sl. vertikalna natančnost za neporaščena območja
- OTR Georeferenciran oblak točk
- RMSE *Root Mean Square Error*, sl. koren srednjega kvadratnega pogreška
- RTK *Real Time Kinematic*, sl. kinematična metoda GNSS izmere v realnem času
- SHP *Shapefile*, sl. podatkovni vektorski format
- TIN *Triangulated Irregular Network*, sl. mreža nepravilnih trikotnikov
- VVA *Vegetated Vertical Accuracy*, sl. vertikalna natančnost za poraščena območja

1 UVOD

Geodetski načrt, izdelan iz stereoparov bližnjeslikovnih aerofotografij oziroma aeroposnetkov, ni več novost, saj so brezpilotni zrakoplovi ali letalniki pri zajemu prostorskih podatkov vse bolj učinkoviti. Geodetski načrt je le eden izmed mnogih izdelkov, ki ga omogoča snemanje z brezpilotnim zrakoplovom.

V diplomski nalogi je predstavljena izdelava geodetskega načrta iz stereoparov aerofotografij, posnetih z brezpilotnim zrakoplovom. Namen naloge je preveriti uporabnost metode stereozajema za izdelavo geodetskih načrtov velikih meril, primerjati to metodo s klasičnim postopkom izdelave geodetskega načrta, kakršna je terestrična geodetska izmera, ter ugotoviti njene prednosti in slabosti.

Poudarek je na opisu postopka izdelave stereoparov in fotogrametričnem stereozajemu ter njegovi analizi natančnosti, ki je pri izdelavi načrtov velikih meril izredno pomembna. Pri analizi uporabnosti izdelka smo metodo stereozajema primerjali s kombinirano metodo zajema iz ortofota in fotogrametričnega oblaka točk ter z metodo klasične terenske izmere.

Pri izdelavi diplomske naloge sem z dovoljenjem uporabila bližnjeslikovne aerofotografije, ki so jih z brezpilotnim zrakoplovom zajeli sodelavci Geodetske družbe d. o. o. Pri načrtovanju snemanja in terenski izvedbi snemanja nisem sodelovala, sem pa opisala tehnične podatke tega dela projekta, saj so pomembni za razumevanje in analizo rezultatov. Moje delo se je nanašalo predvsem na pripravo stereoparov, izvedbo stereozajema, izdelavo ortofota in oblaka točk, sodelovala sem tudi pri terenski geodetski izmeri detajlov, ki so bili uporabljeni za primerjalno analizo. Za pripravo in obdelavo podatkov sem uporabljala programsko opremo, ki je last Geodetske družbe d. o. o. (v nadaljevanju tudi: GD d.o.o.).

1.1 Motivacija

Stereozajem je fotogrametrični zajem podatkov iz stereoparov, to je dveh delno prekrivajočih se fotografij, ki omogočata stereoskopsko opazovanje. Fotografije so lahko posnete iz zraka (aerofotografije, aeroposnetki) ali s stojišč na tleh (terestrične fotografije ali posnetki). Aeroposnetki so lahko izdelani s fotogrametričnim snemalnim sistemom iz letala ali helikopterja ali z običajnim fotoaparatom, nameščenim na brezpilotnem zrakoplovu. V slednjem primeru fotografiranje poteka z nižjih višin, zato lahko tak način snemanja uvrstimo v področje bližnjeslikovne fotogrametrije. Tradicionalno aerofotografiranje za namene masovnega zajema topografskih podatkov meril 1 : 5000 in manjših meril je že dolgoletna praksa. V Sloveniji že od leta 1975 poteka projekt CAS (Ciklično aerofotografiranje Slovenije). Stereopari CAS so primarni vir za zajem topografskih podatkov za izdelavo kart in podatkovnih baz. V zadnjih dveh letih pa se je uveljavil kombiniran fotogrametrični zajem iz stereoparov CAS in podatkov LSS (Lasersko skeniranje Slovenije) za izdelavo DTK5 (vektorska zbirka topografskih podatkov) ter za zajem podatkov hidrografije in dejanske rabe vodnega zemljišča (Navodila ..., 2015). Gre torej za uporabo aerofotografij, ki so posnete s profesionalno mersko kamero iz letala, kar pomeni relativno visoko višino leta in posledično slabšo prostorsko ločljivost fotografij. V diplomski nalogi smo se osredotočili predvsem na uporabo bližnjeslikovne aerofotogrametrije, ki jo omogočajo brezpilotni zrakoplovi. Ti v primerjavi s profesionalnimi fotogrametričnimi snemalnimi sistemi omogočajo mnogo nižjo višino leta in s tem boljšo prostorsko ločljivost aerofotografij, ki je nujna za zajem prostorskih podatkov visoke položajne točnosti, kamor uvrščamo tudi geodetski načrt.

1.2 Opredelitev ciljev naloge

V diplomski nalogi smo si zastavili dva poglavitna cilja. Prvi cilj je izdelava geodetskega načrta merila 1 : 500 iz bližnjeslikovnih aerofotografij z metodo stereozajema. Iz istih aerofotografij smo izdelali tudi oblak točk, digitalni model reliefsa in ortofoto, ki so standardni izdelki na tem področju. Vse končne izdelke smo nato analizirali z vidika položajne točnosti.

Drugi cilj je analiza uporabe stereoparov, pri čemer smo metodo stereozajema primerjali s kombinirano metodo zajema iz ortofota in digitalnega modela reliefsa ter nato še s klasično terensko izmero, ki nam je služila kot referenčna vrednost. Na izbranih vsebinah smo s kombinacijo zajema iz ortofota in digitalnega modela reliefsa zajeli iste objekte kot iz stereoparov, podatke smo zajeli tudi s klasično terensko metodo. Rezultate smo analizirali z vidika položajne točnosti, porabljenega časa in s tem povezanih stroškov. Z metodo SWOT smo ocenili prednosti, slabosti, priložnosti in nevarnosti uporabljenih metod.

1.3 Pregled literature in raziskav

Raziskave na področju bližnjeslikovne aerofotogrametrije (v nadaljevanju: fotografija) se osredotočajo predvsem na postopek obdelave fotografij, ki so ključne za pridobivanje prostorskih podatkov. Razvijajo se nove tehnike, programska orodja in algoritmi, ki omogočajo kompleksne in zahtevne obdelave fotografij. Metode klasične aerofotogrametrije, značilne za velike letalske sisteme, za to niso primerne, predvsem zaradi značilnosti zrakoplovov (nestabilnost), načina snemanja (ne samo nadirne fotografije, temveč fotografije posnete z različnih zornih kotov) in uporabe amaterskih fotoaparatorov. Največji problemi so se pojavljali pri ugotavljanju pravilne orientacije ogromne množice posnetih fotografij. Potreben je bil nov pristop k celotni metodologiji obdelave fotografij. V razvoj potrebnih algoritmov in rešitev se vse bolj vključuje področje računalniškega vida (angl. *computer vision*) (Colomina in Molina, 2014).

Ena izmed najpomembnejših nalog fotogrametrije in računalniškega vida je orientacija več fotografij v prostoru (Remondino in sod., 2012). V klasični aerofotogrametriji je ta problem rešen z avtomatsko aerotriangulacijo, ki je postopek pridobitve parametrov zunanje orientacije fotografij. Vhodni podatki za aerotriangulacijo so med drugim tudi vezne točke. To so fotogrametrične točke, ki povezujejo homologne točke na čim več posnetkih hkrati (Kosmati Fras, 2004). V zadnjih letih razvijajo algoritme, predvsem na področju računalniškega vida, ki omogočajo samodejno prepoznavanje značilnih točk na osnovi detektorjev in deskriptorjev teh točk (Colomina in Molina, 2014). Prvi tak algoritem je razvil Lowe (2004) in ga poimenoval SIFT (*Scale-invariant Feature Transform*). Novi algoritmi, ki so zdaj na voljo, so njegove izpeljanke. Morda še največkrat uporabljen in v literaturi omenjen je SURF (*Speeded-up Robust Features*) (Bay in sod., 2006).

Veliko raziskav je usmerjenih v izboljšanje slikovnega ujemanja. Razvite so bile različne metode, zdaj pa slikovno ujemanje temelji predvsem na uporabi stereoparov (angl. *stereomatching*) ali na identifikaciji korespondenc na več fotografijah (angl. *Multi-view Stereo, MVS*) (Remondino in sod., 2014). Najnovejše študije so usmerjene na »gosto« slikovno ujemanje (angl. *dense image matching*), ki ga je omogočil razvoj računalniške strojne opreme in algoritmov, ki prihajajo s področja računalniškega vida. »Gosto« slikovno ujemanje omogočajo različne metode slikovnega ujemanja, ki obsegajo različne kriterije za ugotavljanje podobnosti, rezultat teh postopkov pa je gost oblak točk (Haala in Rothermel, 2012; Remondino in sod., 2013; Dall'Asta in Roncella, 2014; Remondino in sod., 2014).

Vzporedno z razvojem različnih metod obdelave fotografij so bila razvita tudi programska orodja. V raziskavah so pogosto primerjali komercialna in odprtakodna programska orodja. Remondino in sod. (2014) primerjajo štiri najsodobnejša programska orodja, ki temeljijo na metodah »gostega« slikovnega ujemanja, in sicer SURE (*SURface REconstruction*), ki je MVS metoda, kjer se referenčna fotografija primerja s SGM (*Semi Global Matching*) metodo, MicMac, in PMVS (*Patch-based MVS*), ki sta odprtakodna programa, ter PhotoScan, ki je komercialno programsko orodje. Njihove ugotovitve potrjujejo domnevo, da vse metode omogočajo natančno in točno izdelavo gostih oblakov točk in 3D-modelov, vendar pa avtorji poudarjajo, da morajo programi podajati statistiko celotnega postopka obdelave, hkrati predlagajo izboljšave postopkov.

Dall'Asta in Roncella (2014) sta primerjala različne metode stereo slikovnega ujemanja (angl. *stereo image matching*), pri čemer sta uporabila odprtakodni programski orodji MicMac in Open CV ter njune rezultate primerjala z rezultati komercialnega programskega orodja PhotoScan.

Narejene so bile tudi primerjalne študije med oblakom točk, pridobljenim iz bližnjeslikovnih fotografij, ter oblakom točk, pridobljenim s terestričnim laserskim skeniranjem. Eno izmed takih študij so naredili Mancini in sod. (2013), ki so s SfM metodo (*Structure from Motion*) izdelali oblak točk in DMP (digitalni model površja), katerega so nato primerjali z DMP, izdelanim z laserskim skeniranjem. Rezultati so pokazali majhna, centimeterska odstopanja med obema metodama, vertikalna točnost pa je ustrezala točnosti, pridobljeni z GNSS metodo.

Rhee in Kim (2015) sta primerjala DMP, ki je bil izdelan iz bližnjeslikovnih fotografij, in DMP, izdelanim iz lidarskih podatkov. Rezultati so pokazali precej velike višinske razlike pri mostu in na cesti (zaradi homogene tekture). Avtorja predlagata razvoj boljših interpolacijskih metod in novih metod za zmanjševanje šuma.

Med tujo literaturo zasledimo tudi dela, ki raziskujejo možnost uporabe fotografij za kartiranje in izdelavo načrtov velikih meril. Devriendt in Bonne (2014) raziskujeta možnost uporabe fotografij za natančno kartiranje, pri čemer uporabita izdelan popolni ortofoto, DMP in vektorski zajem podatkov z digitalno fotogrametrično postajo.

Možnost uporabe fotografij pri posodobitvi katastrskih mej opisujejo Kurczynski in sod. (2016). Za zajem podatkov uporabijo metodi stereozajema in večslikovne meritve, podajo oceno natančnosti meritve ter poudarjajo, da problem uporabljenih metod ni natančnost, saj je ta ustrezna, ampak fotointerpretacija operaterja, na katero vpliva kakovost posnetih fotografij.

Veliko študij se ukvarja s primerjalno analizo natančnosti klasične tahimetrične izmere in izmere GPS-RTK s pridobljenimi podatki iz fotografij. Te raziskave poudarjajo prednosti zajema prostorskih podatkov z brezpilotnimi zrakoplovi in na primerih dokazujejo, da so tako pridobljeni podatki primerni za izdelavo načrtov velikih meril (Barry, 2014).

1.4 Struktura naloge

Diplomska naloga vsebuje šest poglavij. Uvodno poglavje je namenjeno opredelitvi motivacije, ciljev in namena naloge, vključuje pa tudi pregled literature in raziskav z obravnavanega področja.

Drugo poglavje zajema pregled teoretičnih osnov o geodetskem načrtu, bližnjeslikovnem aerofotografiranju, orientaciji fotografij in slikovnem ujemanju. Predstavljeni so tudi glavni izdelki fotogrametrije, to so fotogrametrični oblak točk, digitalni model reliefsa in ortofoto.

V tretjem poglavju je podan opis praktičnega dela diplomske naloge, ki obsega zajem podatkov, uporabljeno programsko opremo in postopke ter terensko izmero.

Četrto poglavje je namenjeno opisu obdelave podatkov. Je najobširnejše poglavje v diplomski nalogi, v katerem je po korakih prikazana metodologija obdelave podatkov v raznih programskih orodjih; zaključi se s poglavjem geometričnih primerjav.

Peto poglavje zajema rezultate obdelav, primerjave in analize.

V zadnjem, šestem poglavju so zbrani vsi pomembni zaključki diplomske naloge. Sledi mu še navedba uporabljenih virov in prilog.

2 TEORETIČNE OSNOVE

To poglavje zajema osnovne informacije o geodetskem načrtu ter se osredotoča na bližnjeslikovno aerofotografiranje, kjer podajamo teoretične osnove metod in postopkov, ki so povezani z zajemom in obdelavo bližnjeslikovnih aerofotografij. Opišemo slikovno ujemanje, ki obravnava nove pristope popolne avtomatizacije postopkov v zvezi z orientacijo aerofotografij in izdelavo fotogrametričnega oblaka točk. Predstavimo tudi osnove fotogrametričnega zajema iz stereoparov in opišemo standard ameriškega združenja APSRS (*American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*) za določitev položajne točnosti izdelkov.

2.1 Geodetski načrt

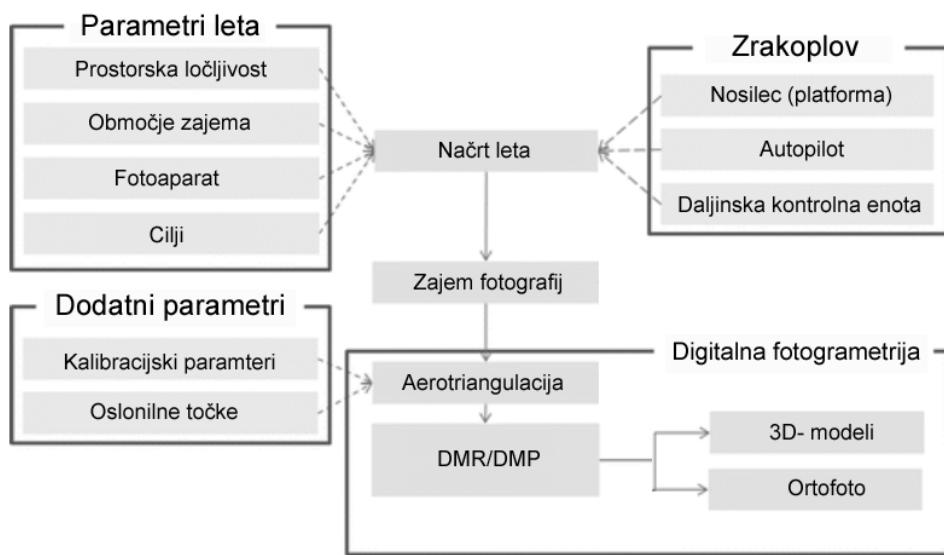
Vsebino, izdelavo in uporabo geodetskega načrta določa Pravilnik o geodetskem načrtu, ki geodetski načrt opredeljuje kot prikaz fizičnih struktur in pojavov na zemeljskem površju, nad in pod njim v pomanjšanem merilu po kartografskih pravilih (Pravilnik ..., 2004). Lahko vsebuje podatke o reliefu, vodah, rastlinstvu, stavbah, zemljiških parcelah, zemljepisnih imenih, geodetskih točkah, itn. (Pravilnik ..., 2004). Glavni sestavini geodetskega načrta pa sta grafični prikaz, kjer se za prikaz vsebine uporablajo znaki, določeni v topografskem ključu, in pripadajoč certifikat, s katerim odgovorni geodet potrdi skladnost izdelanega geodetskega načrta s predpisi, ki urejajo to področje.

Geodetski načrt je zelo široko opredeljen in ga pravno opredeljuje več predpisov:

- Zakon o geodetski dejavnosti – ZgeoD (Uradni list RS št. 77/2010),
- Zakon o urejanju prostora – ZUreP (Uradni list RS št. 110/2002),
- Zakon o graditvi objektov – ZGO (Uradni list RS št. 102/2004),
- Pravilnik o geodetskem načrtu (Uradni list RS št. 40/2004).

2.2 Bližnjeslikovno aerofotografiranje

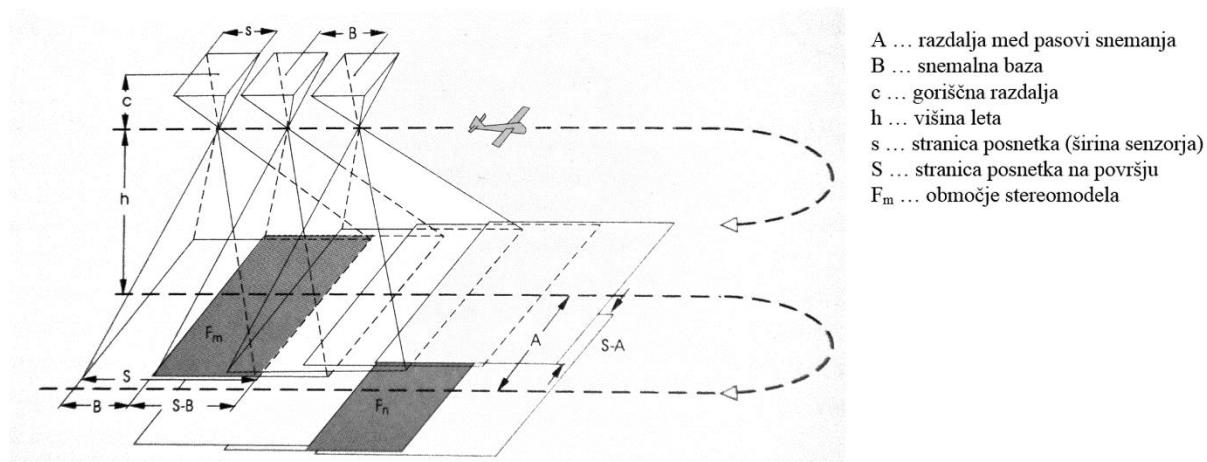
Cilj aerofotografiranja je zajem in izmera naravnih in umetnih prostorskih objektov na površju Zemlje. Tipično aerofotografiranje z zrakoplovom potrebuje načrt leta in izmero oslonilnih točk za potrebe georeferenciranja. Po zajemu podatkov sledi postopek obdelave, ki potrebuje parametre kalibracije fotoaparata. Z obdelavo pridobimo fotogrametrične izdelke, večinoma gre za DMR ali DMP, ki jih nato uporabimo za izdelavo ortofota ali za nadaljnjo pridobivanje merskih informacij. Slika 2.1 prikazuje celoten delovni postopek zajema in obdelave fotografij za pridobivanje prostorskih podatkov.



Slika 2.1: Delovni postopek zajema in obdelave fotografij posnetih z zrakoplovom (povzeto po: Nex in Remondino, 2014)

2.2.1 Načrtovanje leta in zajem fotografij

Dobro načrtovan let je ključnega pomena, saj pomembno prispeva k kvaliteti zajetih podatkov in uspešni ter varni izvedbi projekta. Pri načrtovanju leta preučimo cilje projekta, lokacijo in površino območja snemanja, upoštevamo želeno prostorsko ločljivost in karakteristike fotoaparata, ki ga imamo na voljo (velikost senzorja, goriščna razdalja, velikost fotografije v pikslih) (Nex in Remondino, 2014). Načrtovanje leta je narejeno s programom, ki ga običajno dobimo z zrakoplovom. Obstajajo pa tudi odprtakodne rešitve.



Slika 2.2: Prikaz leta in opis pomena parametrov leta (Kraus, 2007, str. 132)

Pri aerofotografiranju površja se območje zajema posname s fotografijami, ki formirajo vzporedne pasove, ti pa tvorijo blok fotografij (slika 2.2). Pri snemanju z zrakoplovi je izrednega pomena zadostno prekrivanje fotografij, ki je večje kot pri klasičnem zračnem snemanju, in znaša vsaj 80% v smeri leta ter 60% med pasovi leta (v prečni smeri). Tako velik preklop fotografij je potreben zaradi karakteristik zrakoplova (nestabilnost, majhna teža, velik vpliv vetra), hkrati pa omogoča večjo povezanost fotografij in s tem boljšo orientacijo fotografij v prostoru ter natančnejšo aerotriangulacijo.

V preglednici 2.1 so po Krausu (2007) povzete enačbe, ki so potrebne za preračun vseh pomembnih parametrov leta.

Preglednica 2.1: Enačbe za izračun parametrov leta (povzeto po: Kraus, 2007)

Parametri	Enačbe
Merilo fotografije	$m_b = \frac{h}{c}$
Stranica posnetka na površju	$S = s \cdot m_b$
Višina leta	$h = c \cdot m_b$
Nadmorska višina leta	$Z_0 = h + Z$
Vzdolžni preklop (%)	$l = \left(1 - \frac{B}{S}\right) 100$
Prečni preklop (%)	$q = \left(1 - \frac{A}{S}\right) 100$
Dolžina snemalne baze pri vzdolžnem preklopu	$B = S \left(1 - \frac{l}{100}\right)$
Razdalja med pasovi snemanja pri prečnem preklopu	$A = S \left(1 - \frac{q}{100}\right)$
Območje stereomodela	$F_m = (S - B)S$
Število modelov v pasu (dolžine L)	$n_m = \frac{L}{B} + 1$
Število fotografij v pasu	$n_b = n_m + 1$

2.2.2 Obdelava fotografij

Obdelavo fotografij, posnetih z zrakoplovom, razčlenimo na več korakov. V literaturi (Colomina in Molina, 2014; Nex in Remondino, 2014) je postopek obdelave opisan v dveh korakih, in sicer:

- orientacija fotografij in kalibracija fotoaparata,
- rekonstrukcija površja (izdelava fotogrametričnih izdelkov).

2.2.2.1 Orientacija fotografij in kalibracija fotoaparata

Orientacija fotografij in kalibriran fotoaparat sta dva osnovna pogoja za pridobivanje podatkov iz fotografij (Nex in Remondino, 2014). V klasični aerofotogrametriji je značilno, da se kalibracija merskih fotoaparatorov izvede na vsakih nekaj let, pri bližnjeslikovni aerofotogrametriji pa je snemanje praviloma

opravljeno z amaterskimi fotoaparati, ki velikokrat niso kalibrirani, kar pomeni, da elementov notranje orientacije (gorična razdalja fotoaparata, lokacija projekcijskega centra in napake fotografij, npr. radialna distorzija) ne poznamo. V tem primeru te izračunamo s samo-kalibracijo v postopku izravnave bloka fotografij. Colomina in Molina (2014) navajata, da ima samo-kalibracija določene prednosti, vendar pa so rezultati samo-kalibracije in pred-kalibracije (laboratorijska kalibracija) podobni.

Remondino in sod. (2012) navajajo, da je ena izmed najpomembnejših nalog fotogrametrije in računalniškega vida orientacija več fotografij v prostoru. Ta problem se rešuje z avtomatsko aerotriangulacijo in izravnavo, za katero so eni izmed vhodnih podatkov tudi vezne točke. To so fotogrametrične točke, ki povezujejo homologne točke na čim več posnetkih hkrati (Kosmati Fras, 2004). V klasični aerofotogrametriji se vezne točke lahko določi ročno, pol-avtomatsko ali avtomatsko, medtem ko se pri bližnjeslikovni aerofotogrametriji določajo izključno avtomatsko. Algoritmi samodejno prepoznavata značilne točke na več fotografijah. V literaturi sta najpogosteje omenjena algoritma SIFT (Lowe, 2004) in SURF (Bay in sod., 2006). Oba samodejno prepoznavata značilne točke na osnovi njihovih detektorjev in deskriptorjev, neodvisno od spremembe merila, zasukov in premikov (Vidmar, 2014).

Na področju računalniškega vida so razvili postopek, ki omogoča izdelavo 3D-modelov iz fotografij in ga poimenovali *Structure from Motion* (SfM). S tem postopkom lahko hkrati določimo orientacijo (notranjo in zunanjo) fotografij in 3D-modele, kar pomeni izračun koordinat veznih točk, izvedemo pa tudi izravnavo.

Georeferenciranje je faza orientacije fotografij, kjer določimo njihovo lego in orientacijo v objektnem koordinatnem sistemu, najpogosteje je to državni koordinatni sistem. Avtopiloti zrakoplovov so v večini opremljeni z nizkocenovnimi navigacijskimi sistemi GNSS/INS in ne omogočajo direktne orientacije senzorja (direktno georeferenciranje, direktna določitev zunanjih orientacijskih parametrov brez oslonilnih točk). To pomeni, da so za indirektno orientacijo senzorja oslonilne točke še vedno potrebne, GNSS/INS podatki pa pripomorejo k avtomatski določitvi veznih točk in so kot približne vrednosti vključene v izravnavo bloka fotografij (Colomina in Molina, 2014).

2.2.2.2 Izdelava fotogrametričnih izdelkov

Prvi izdelek obdelave fotografij je redek oblak točk, ki ga sestavljajo vezne točke, ki so bile uspešno povezane na več fotografijah. Za zgostitev oblaka točk potrebujemo zelo veliko število novih veznih točk, za katere bi bilo potrebno najti medsebojne povezave (Bhandari, 2015). To fazo zgostitve dobimo z iterativnimi postopki avtomatskega »gostega« slikovnega ujemanja. Najsodobnejše metode slikovnega ujemanja prihajajo s področja računalniškega vida. V literaturi največkrat omenjeni in testirani metodi sta MVS metoda (*Multi-view Stereo*), kjer temelji slikovno ujemanje na identifikaciji korespondenc na več fotografijah, in SGM (*Semi Global Matching*), ki je tudi stereo metoda in je trenutno ena najboljših metod slikovnega ujemanja (Dall'Asta in Roncella, 2014).

V postopku zgoščevanja oblaka točk z izbranim algoritmom slikovnega ujemanja se ustvari še na milijone novih veznih točk z znanimi objektnimi koordinatami. Tako ustvarjeni gosti oblaki točk pa imajo lahko vrzeli oziroma luknje, to so območja, kjer slikovno ujemanje ni bilo uspešno. Fotogrametrični oblak točk nima enakomerne gostote, saj je ta odvisna od površja snemanja. Značilno je, da so odboji slabši na homogenih površinah, kot so asfalt, svetleče površine, drevesa.

Gost oblak točk je osnova za izdelavo ostalih fotogrametričnih izdelkov, katerih izdelava je v programske orodijih popolnoma avtomatizirana, nekateri programi pa omogočajo tudi naknadno urejanje izdelkov.

Programska orodja, ki smo jih v literaturi največkrat zasledili in omogočajo rekonstrukcijo površja in izdelavo fotogrametričnih izdelkov, so:

- PhotoScan (Agisoft, <http://www.agisoft.com/>)
- Pix4Dmapper (Pix4D, <https://pix4d.com/>)
- MicMac (odprtokodni program, <http://logiciels.ign.fr/?Micmac>)
- Open CV (odprtokodni program, <http://opencv.org/>)
- SURE (Institut fur Photogrammetrie,
<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/sure/index.html>)
- 3Dsurvey (Modri planet, <http://www.3dsurvey.si/>)

2.3 Fotogrametričen zajem podatkov

Postopek izmere v fotogrametriji, ki je najbolj pogost in uporaben, je stereofotogrametrični postopek izmere (stereozajem), ki uporablja človeški stereoskopski vid. Ta postopek temelji na vzpostavitvi stereomodela, ki ga tvorita dva merska posnetka oziroma fotografiji, ki sta posneti iz različnih položajev, vendar imata določeno stopnjo prekrivanja (vsaj 50%) (Kraus, 2007). Ti dve fotografiji tvorita stereopar. S prikazom prve fotografije v levem in druge v desnem očesu se v možganih vzpostavi navidezni stereomodel, ki ga nato uporabimo za zajem prostorskih podatkov (STEZA, 2014). Da pa lahko iz stereoparov pridobimo merske podatke, moramo fotografije pravilno orientirati. Parametre orientacije pridobimo v postopku obdelave fotografij, ki je podrobneje opisana v poglavju 2.2.2.

Stereofotogrametrična izmara ali stereozajem vektorskih podatkov se izvaja na digitalni fotogrametrični postaji, ki je sestavljena iz strojne in ustrezne programske opreme, ki omogoča stereozajem. Učinek stereofekta dosežemo na različne načine, poznana sta na primer anaglifni pristop ter polarizacijski ali »*crystal eyes*« pristop.

Točnost stereofotogrametrične izmere je odvisna od ločljivosti fotografij, natančnosti orientacije fotografij, izkušenosti operaterja in povečave, ki jo operater uporablja za zajem (STEZA, 2014).

2.4 Standard ASPRS za določitev položajne točnosti prostorskih podatkov

Za določitev položajne točnosti prostorskih podatkov smo uporabili novi standard ameriškega združenja ASPRS iz leta 2014. Ta standard kot osnovno mero horizontalne in vertikalne točnosti navaja koren srednjega kvadratnega pogreška RMSE (angl. *Root Mean Square Error*) (preglednica 2.2). Položajna točnost je ocenjena s statistiko RMSE v horizontalni ravnini, to je z $RMSE_x$, $RMSE_y$ in $RMSE_r$, slednji predstavlja skupni (totalni) pogrešek. Vertikalna točnost pa je ocenjena z $RMSE_z$, kjer ločimo še testiranje točnosti na neporaščenih in poraščenih območjih (ASPRS, 2014).

Mere za določitev točnosti prostorskih podatkov (ortofoto, planimetrične karte, digitalni model višin) temeljijo na vrednosti RMSE in ne več na merilu karte ali velikosti piksla. Novi standard ASPRS uvaja dva nova termina, in sicer NVA (*Non-vegetated Vertical Accuracy*), ki je mera za vertikalno točnost na neporaščenih območjih, in VVA (*Vegetated Vertical Accuracy*), ki je mera za vertikalno točnost na poraščenih območjih. Razlika med obema je, da se za NVA predpostavlja, da se pogreški razporejajo z

normalno porazdelitvijo, medtem ko za VVA to ni nujno. Kadar se torej pogreški ne razporejajo po normalni porazdelitvi, se uporabi 95. percentil, ker bolje podaja točnost pri 95-odstotni stopnji zaupanja.

Preglednica 2.2: Mere za določitev točnosti prostorskih podatkov (ASPRS, 2014)

Razred horizontalne točnosti	Absolutna točnost			Ortomozaik Neujemanje šivov (cm)
	RMSE _x in RMSE _y (cm)	RMSE _r (cm)	Horizontalna točnost pri 95-odstotni stopnji zaupanja	
X-cm	$\leq X$	$\leq 1,414 \cdot X$	$\leq 2,448 \cdot X$	$\leq 2 \cdot X$
Razred vertikalne točnosti	Absolutna točnost			
	RMSE _z za neporaščeno (cm)	NVA pri 95-odstotni stopnji zaupanja	VVA pri 95. percentilu	
X-cm	$\leq X$	$\leq 1,96 \cdot X$	$\leq 3,00 \cdot X$	

2.4.1 Enačbe za izračun RMSE po standardu NSSDA

V diplomski nalogi smo poleg standarda ASPRS uporabili še starejši standard NSSDA (*National Standard for Spatial Data Accuracy*), ki ga povzema tudi standard ASPRS ter se v strokovni literaturi pogosto omenja in uporablja. Standard NSSDA navaja enačbe za izračun statističnih mer točnosti prostorskih podatkov (preglednica 2.3), ki veljajo ob pogoju, da se pogreški porazdeljujejo v normalni porazdelitvi (ASPRS, 2014).

Preglednica 2.3: Mere točnosti prostorskih podatkov (ASPRS, 2014)

Mere točnosti	Enačbe
Število kontrolnih točk	n
Srednja vrednost opazovanj	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
Standardni odklon	$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
Koren srednjega kvadratnega pogreška (RMSE)	$RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i(merjen)} - x_{i(referenčen)})^2}$
Skupni koren srednjega kvadratnega pogreška (RMSE _r)	$RMSE_r = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$
Horizontalna točnost pri 95-odstotni stopnji zaupanja	$2,4477 \cdot \left(\frac{RMSE_r}{1,4142} \right) = 1,7308 \cdot RMSE_r$
Vertikalna točnost pri 95-odstotni stopnji zaupanja	$1,9600 \cdot RMSE_r$

2.4.2 Ocena kakovosti fotogrametričnih izdelkov

Na kakovost fotogrametričnih izdelkov neposredno vplivajo vse predhodne faze, med drugim tudi aerofotografiranje in aerotriangulacija (v nadaljevanju tudi: AT). Standard ASPRS predpisuje statistične mere in način kontrole predhodnih faz in tudi končnega izdelka.

Za zagotavljanje kakovosti v postopku AT določa zahteve za natančnost, število ter lociranje oslonilnih in kontrolnih točk. Podaja tudi enačbo (enačba 1) za izračun potrebne natančnosti oslonilnih točk, ki bodo uporabljene v AT ob dani natančnosti končnega fotogrametričnega izdelka.

$$RMSE_{x(OT),y(OT),z(OT)} = \frac{1}{4} \cdot RMSE_{x(izdelka),y(izdelka),z(izdelka)} \quad (1)$$

Standard ASPRS podaja tudi enačbo (enačba 2) za izračun natančnosti količin (koordinate projekcijskih centrov) po postopku AT in izravnave ob dani točnosti končnega (fotogrametričnega) izdelka.

$$RMSE_{x(AT),y(AT),z(AT)} = \frac{1}{2} \cdot RMSE_{x(izdelka),y(izdelka),z(izdelka)} \quad (2)$$

Obe enačbi veljata v primeru, ko je končni fotogrametrični izdelek 3D-izdelek.

V preglednici 2.4 je prikazan primer, kjer je zahtevana položajna in višinska točnost končnega izdelka (geodetskega načrta) ± 10 cm. Glede na standard ASPRS to pomeni, da morajo biti oslonilne točke določene z vsaj 2,5-centimetrsko natančnostjo, rezultati aerotriangulacije in izravnave, to je natančnosti koordinat projekcijskih centrov, pa ne smejo presegati dovoljenega RMSE (5 cm).

Preglednica 2.4: Zahtevane natančnosti oslonilnih točk in projekcijskih centrov ob dani točnosti končnega izdelka

Položajna točnost izdelka	Natančnost izračunanih količin po aerotriangulaciji	Natančnost oslonilnih točk
RMSE _x , RMSE _y , RMSE _z (cm)	RMSE _x , RMSE _y , RMSE _z (cm)	RMSE _x , RMSE _y , RMSE _z (cm)
10	5	2,5

Standard ASPRS podaja tudi smernice za kontrolo prostorskih podatkov oziroma (fotogrametričnih) izdelkov. To so predvsem kontrole položajne točnosti izdelkov. Standard poudarja, da morajo biti kontrolne točke izmerjene z neodvisnimi meritvami, njihova položajna natančnost pa mora biti vsaj trikrat boljša od tolerance izdelka. Kontrolne točke morajo biti dobro definirane, enakomerno porazdeljene, njihovo število pa ne sme biti manjše od dvajset.

3 ZAJEM PODATKOV

3.1 Zahteve naročnika

Projekt izdelave geodetskega načrta se začne z naročnikovo zahtevo za izdelavo geodetskega načrta za območje ter opredelitvijo namena in želenega merila prikaza. Naročnik lahko poda tudi nekatere smernice glede vsebine.

V našem primeru je bila želja naročnika, Mestne občine Ljubljana, izdelava geodetskega načrta za namen izdelave strokovnih podlag za Občinski podrobni prostorski načrt 150 (P+R Črnuče). Geodetski načrt je bil v celoti izdelan v sodelovanju z Geodetsko družbo d. o. o.; pri njegovi izdelavi sem tudi sama sodelovala.

Ob upoštevanju zahtev naročnika se lotimo prve faze izvedbe, to je načrtovanja.

3.2 Načrtovanje

V fazi načrtovanja preučimo vse pomembne dejavnike, ki vplivajo na izdelavo geodetskega načrta (v nadaljevanju: načrt), in sicer:

- namen in merilo prikaza načrta,
- lokacijo in površino območja načrta,
- razgibanost terena in poseljenost,
- metodo izmere,
- potrebno opremo in inštrumentarij,
- potrebno strojno in programsko opremo.

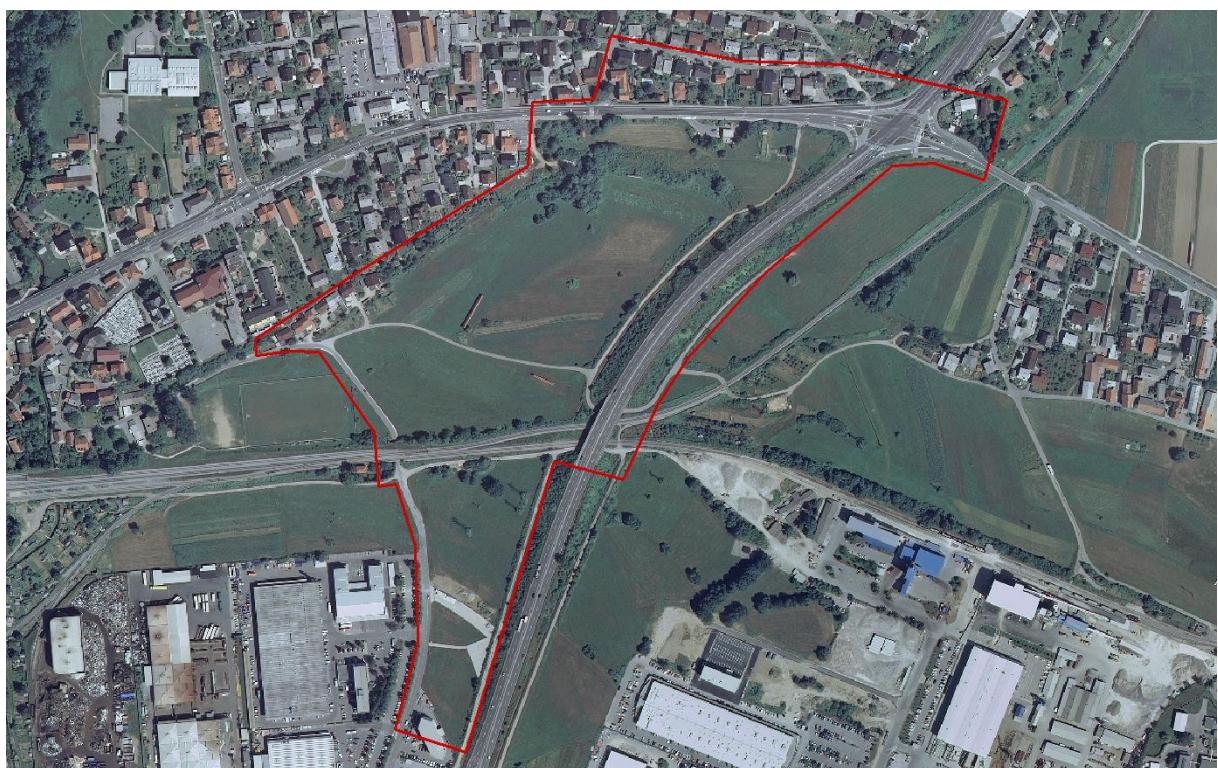
3.2.1 Namen in merilo načrta

Načrt je namenjen izdelavi strokovnih podlag za Občinski podrobni prostorski načrt. Zato je treba, čeprav naročnik tega ne zahteva posebej, preveriti tudi predpise, s katerimi je urejeno področje občinskih podrobnih prostorskih načrtov in ki so povezani z geodetsko dejavnostjo. Tu gre za Pravilnik o vsebinah, oblikah in načinu priprave občinskega podrobnega prostorskog načrta (2007), v katerem je med drugim tudi navedeno, da natančnost merila ne sme biti manjša od 1 : 5000 in ne večja od 1 : 500.

3.2.2 Območje načrta

Najprej preučimo lokacijo načrta, saj je od nje odvisen nadaljnji postopek izdelave načrta, nato pa še velikost območja (slika 3.1), da izberemo primerno metodo zajema podatkov.

V našem primeru so se strokovnjaki na Geodetski družbi d. o. o. odločili, da je za izdelavo načrta najprimernejša uporaba stereoparov ter nato fotogrametrični zajem, po potrebi pa se načrt dopolni s terenskimi meritvami. Taki odločitvi je botrovalo dejstvo, da ima podjetje na voljo lasten brezpilotni zrakoplov ter da so velikost območja, razgibanost terena in poseljenost primerni za snemanje iz zraka.



Slika 3.1: Območje geodetskega načrta Črnuče, omejeno z rdečo linijo (Vir: ortofoto; GURS, 2012)

3.2.3 Uporabljena oprema in programska orodja

Za izdelavo načrta z uporabo bližnjeslikovnih aerofotografij smo uporabili zrakoplov Aibotix Aibot X6, pripadajočo programsko opremo AiProFlight za njegovo upravljanje, fotoaparat Nikon CoolPix A, inštrumentarij za klasično terestrično izmerno in metodo izmere GPS-RTK, programsko opremo PhotoScan za obdelavo fotografij in izdelavo fotogrametričnih izdelkov ter program STEZA za fotogrametrični zajem.

3.2.3.1 Brezpilotni letalnik Aibot X6

Aibotix je nemško podjetje, ki je v sodelovanju z Leico Geosystems izdelalo brezpilotni zrakoplov Aibot X6, prilagojen predvsem za zajem prostorskih podatkov iz zraka ter industrijski nadzor (Lazar in Kregar, 2014).

Zrakoplov je heksakopter (slika 3.2) z nosilcem kamere, ki ima vgrajeno samodejno kompenzacijo nagibov in rotacije ter je združljiv z DSLR fotoaparati, termografskimi in video kamerami ter laserskim skenerjem (Geoservis, 2016) (preglednica 3.1).



Slika 3.2: Uporabljen brezpilotni letalnik Aibot X6 in fotoaparat Nikon CoolPix A

Preglednica 3.1: Tehnične karakteristike letalnika Aibot X6 (Aibotix, 2016)

Parametri	Vrednosti
Mere: dolžina, širina, višina	1,05 x 1,05 x 0,45 m
Ohišje	ogljikova vlakna
Teža (prazen)	3,4 kg
Teža (naložen)	4,6 – 6,6 kg
Največja teža tovora	2,0 kg
Največja hitrost	40 km/h
Hitrost vzpenjanja	8 m/s
Višina leta	do 1000 m v idealnih razmerah, do 3000 m nad morjem
Doseg radijske povezave	do 1000 m, vedno v vidnem polju
Čas leta	20 min
Delovna temperatura	od -10°C do 40°C
Vgrajeni senzorji	GPS-sprejemnik, žiroskop, pospeškometer, barometer, magnetometer, ultrasonični senzor
Upravljanje	daljinska kontrolna enota, avtonomno letenje
Baterije	LiPo pogonski akumulator 2 x 5000mAh
Programska oprema	AiProFlight, Agisoft PhotoScan

3.2.3.2 Fotografski aparat Nikon CoolPix A

Uporabljeni fotoaparat Nikon CoolPix A je kompakten digitalni nemerski fotoaparat, ki ima glede na svojo velikost vgrajen velik 16MP CMOS senzor, kakršnega imajo večji DSLR fotoaparati. Njegove tehnične lastnosti prikazuje preglednica 3.2.

Preglednica 3.2: Tehnične lastnosti fotoaparata Nikon CoolPix A (Nikon, 2016)

Parametri	Vrednosti
Ločljivost	4928 x 3264 (16,2MP)
Tipalo	23,6 x 15,6 mm CMOS senzor
Goriščna razdalja	18,5 mm (ekvivalentno 28 mm)
Zaslonka	f/2,8
Format datotek	JPEG, RAW
Mere: dolžina, širina, višina	111,0 x 64,3 x 40,3 mm
Teža	299 g

3.2.3.3 Programsko orodje PhotoScan

PhotoScan je programsko orodje ruskega podjetja Agisoft LLC, namenjeno fotogrametrični obdelavi digitalnih fotografij in izdelavi 3D prostorskih modelov za široko paleto uporabe. Temelji na MV (angl. *Multi-view*) tehnologiji ter omogoča izdelavo 3D-modelov iz fotografij, posnetih z različnih zornih koton, pri čemer je celoten postopek slikovnega ujemanja in izdelave 3D-modela popolnoma avtomatiziran. (PhotoScan, 2016).

Programsko orodje za svojo delovanje potrebuje zmogljivo računalniško strojno opremo (preglednica 3.3), kar je samoumevno, saj hkrati obdeluje ogromne količine podatkov. Za namene diplomske naloge smo uporabili profesionalno različico PhotoScan Pro 1.2.3, nameščeno na delovno postajo (preglednica 3.4), ki ima vse potrebne funkcije za izvedbo naše naloge, in sicer (Agisoft, 2016):

- slikovno ujemanje,
- izdelava gostega oblaka točk,
- izdelava 3D-modela,
- izdelava DMV,
- izdelava ortofota,
- georefenciranje,
- izravnava.

Preglednica 3.3: Minimalna in priporočljiva konfiguracija računalnika

Konfiguracija	Minimalne zahteve	Priporočene zahteve
Operacijski sistem	Windows XP ali novejša verzija, Debian/Ubuntu (64 bit), Mac OS X Snow Leopard ali novejša verzija	Windows XP ali novejša verzija (64 bit), Debian/Ubuntu (64 bit), Mac OS X Snow Leopard ali novejša verzija
Procesor	Intel Core 2 Duo procesor	Intel Core i7 procesor
Spomin	2GB of RAM	12GB of RAM
Grafična kartica	GeForce 8xxx ali novejša serija, Radeon HD 5xxx ali novejša serija	

3.2.3.4 Programski paket STEZA

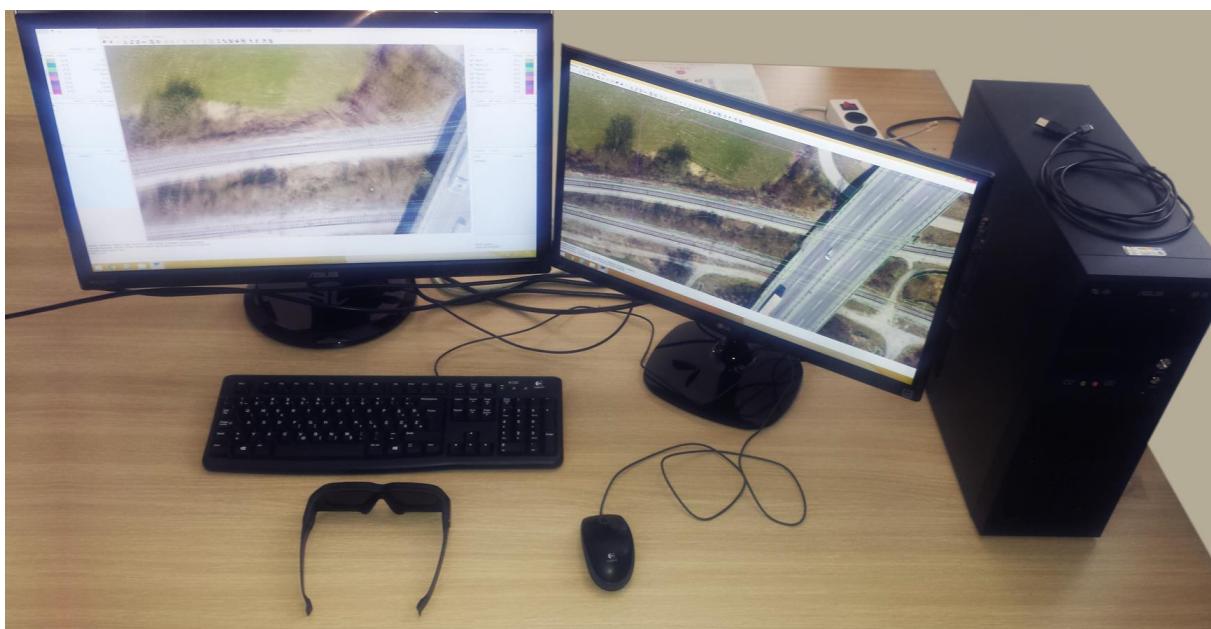
Fotogrametrični programski paket STEreo ZAjem (STEZA) so v sodelovanju z Geodetskim inštitutom Slovenije razvili v Laboratoriju za geometrijsko modeliranje in algoritme multimedijev (GeM²A) Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru. Namenjen je 3D fotogrametričnemu zajemu vektorskih podatkov in njihovih atributov na podlagi stereoposnetkov in aerolaserskih podatkov (STEZA, 2014).

Aplikacija STEZA za svoje delovanje zahteva fotogrametrično strojno opremo, in sicer aktivna polarizacijska stereoočala, emitor (IR-oddajnik) in 3D monitor (STEZA, 2014).

Izvedba naloge je potekala na fotogrametrični delovni postaji (slika 3.3) s programsko in strojno opremo, ki jo prikazuje preglednica 3.4.

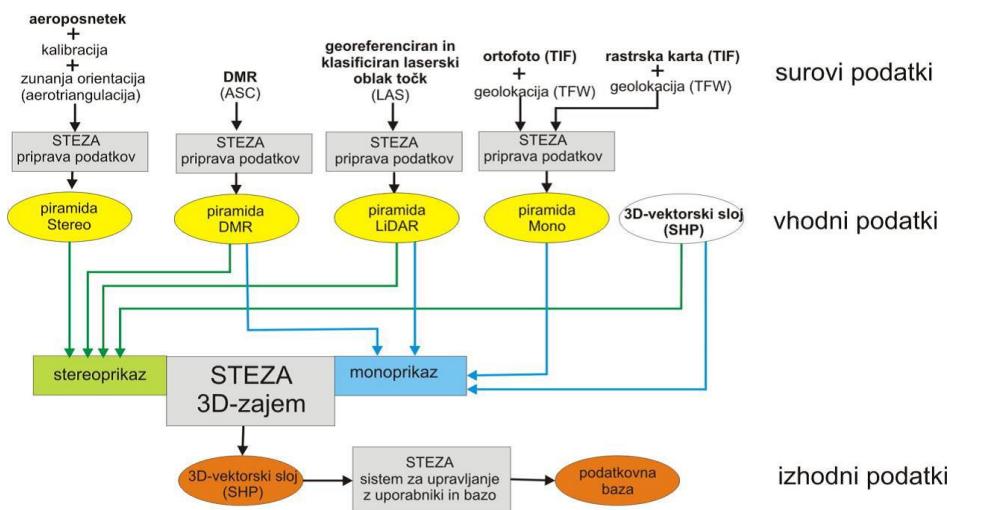
Preglednica 3.4: Zahtevana in uporabljena strojna oprema

Konfiguracija	Zahteve	Delovna postaja na GD d. o. o.
Operacijski sistem	Windows 7 ali 8	Windows 8.1 Pro
Grafična kartica	NVidia Quadro, generacije 410 in dalje, ki omogoča stereoskopski pogled	NVidia GeForce GTX 750 Ti
Monitor	NVidia 3D Vision read	ASUS VG278
Emitor	NVidia 3D Vision in pripadajoča očala	NVidia 3D Vision 2 Wireless glasses kit
Internet	dostop do spletu	omogočen
Procesor	/	Intel i5-4590 CPU, 3.30 GHz
Pomnilnik	/	8 GB RAM



Slika 3.3: Uporabljeni fotogrametrični postaja

STEZA poleg izmere, zajema in urejanja tridimenzionalnih vektorskih točkovnih, linijskih in ploskovnih slojev v SHP-formatu v postopku stereozajema omogoča tudi uporabo drugih rastrskih in vektorskih podatkov, kot so ortofoto, TTN5, DMR in GKOT (Triglav Čekada in sod., 2016).



Slika 3.4: Shema priprave podatkov in njihova uporaba s programom STEZA (STEZA, 2014: str. 11)

3.2.3.5 Druga programska orodja

Za izvedbo naloge smo uporabili tudi:

- Autodesk AutoCAD Map 2004,
- Autodesk AutoCAD Civil 3D (demo verzija),
- GeoPro 2.0,
- CloudCompare 2.7.0.

Autodeskov program AutoCAD smo potrebovali za urejanje in končni izris geodetskega načrta ter izdelavo profilov za namene primerjave višin.

Program GeoPro 2.0, ki je izdelek Geodetske družbe d. o. o., je bil uporabljen za izračun tahimetrije, za potrebne transformacije med koordinatnimi sistemi ter za pretvorbo različnih vrst datotek (npr. SHP v DXF).

CloudCompare je odprtokodno programsko orodje za urejanje in obdelavo oblakov točk. V osnovi je namenjeno primerjavam oblakov točk, omogoča pa tudi primerjave med oblaki točk in trikotniškimi mrežami ter omogoča določene statistične izračune (CloudCompare, 2015).

3.3 Izvedba meritve

Terenske meritve so potekale v več fazah:

- signalizacija in izmera oslonilnih točk,
- snemanje območja z zrakoplovom,
- klasična izmera detajla, kjer ga ni bilo mogoče zajeti iz stereoparov,
- naknadna klasična izmera detajla za analize in primerjave.

Vse faze terenske izmere je izpeljala Geodetska družba d. o. o., sama sem sodelovala pri zadnji fazi - izmeri detajla za namene analiz in primerjav uporabljenih metod.

3.3.1 Signalizacija in snemanje oslonilnih točk

Signalizacija in izmera oslonilnih točk je bila izvedena v dveh dneh v marcu 2016, tik pred snemanjem površja z zrakoplovom. Za oslonilne točke so izbrali talne oznake na terenu (talna prometna signalizacija, jaški) in lastne oznake, narejene s signalnim razpršilcem.

Za izmero oslonilnih točk se je razvila najprej izmeritvena geodetska mreža z metodo GPS-RTK ter nato s klasičnimi terestričnimi meritvami znotraj nje še poligonska mreža točk, ki so bile uporabljene kot stojišča tahimetrične izmere, s katerih so bile nato izmerjene oslonilne točke (slika 3.5). Za vklop v višinski državni koordinatni sistem so bile z metodo trigonometričnega višinomerstva izmerjene še višinske razlike do reperja PNI-211.

Pri metodi GPS-RTK je bil uporabljen inštrument Leica GS08, pri klasični terestrični metodi pa elektronski tahimeter Leica TC09plus in dodatni pribor (stativi, reflektorji, žepni meter, trasirke).



Slika 3.5: Območje zajema, omejeno z rdečo linijo, in lokacije oslonilnih točk (Vir: ortofoto; GURS 2012)

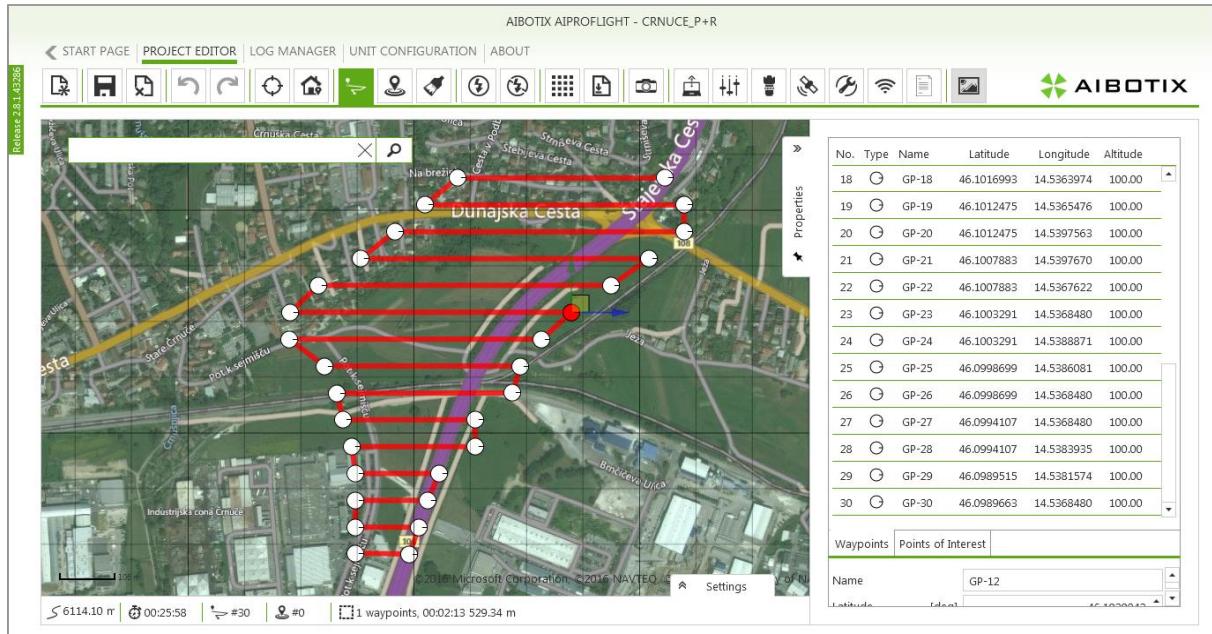
V Geodetski družbi d. o. o. so natančnost vseh treh koordinat oslonilnih točk ocenili na 2 cm. Koordinate oslonilnih točk ter njihova natančnost so poleg fotografij vhodni podatek za obdelavo v programu PhotoScan.

3.3.2 Snemanje površja z zrakoplovom

Za uporabo brezpilotnega zrakoplova je treba narediti načrt snemanja, pri katerem se upoštevajo zahteve naročnika in omejitve snemanja. Nex in Remondino (2014) pri tem razlikujeta štiri dejavnike, in sicer uporabljen fotoaparat, območje snemanja (lokacija in površina), prostorsko ločljivost in cilj projekta snemanja.

Pri Kontroli zračnega prometa Slovenije se za lokacijo, ki jo je navedel naročnik, preveri, ali obstajajo kakršnekoli omejitve snemanja, in zaprosi za dovoljenje snemanja. Od velikosti območja snemanja je odvisno število letov, ki so potrebni za prelet celotnega območja. Glede na uporabljeni fotoaparat je treba prilagoditi višino leta, da se doseže želena prostorsko ločljivost.

Za snemanje iz zraka smo uporabili brezpilotni letalnik Aibot X6, za načrt leta (slika 3.6) pa programsko orodje Aibotix AiProFlight. Ker je območje zajema veliko približno 19 ha in se baterije izpraznijo po dobrih desetih minutah letenja, je bilo treba opraviti šest letov. Parametri letov so zapisani v preglednici 3.5.



Slika 3.6: Načrt leta

Preglednica 3.5: Parametri snemanja študijskega območja z zrakoplovom

Parametri snemanja	Vrednosti
Datum snemanja	marec 2016
Letalnik	Aibotix X6
Fotoaparat	Nikon CoolPix A
Prostorska ločljivost	26 mm
Višina leta	100 m
Število letov	6
Prečni preklop	60 %
Vzdolžni preklop	80 %
Skupni čas letov	57 min
Število fotografij	1368
Koordinatni sistem	WGS-84

3.3.3 Terenska izmera detajla

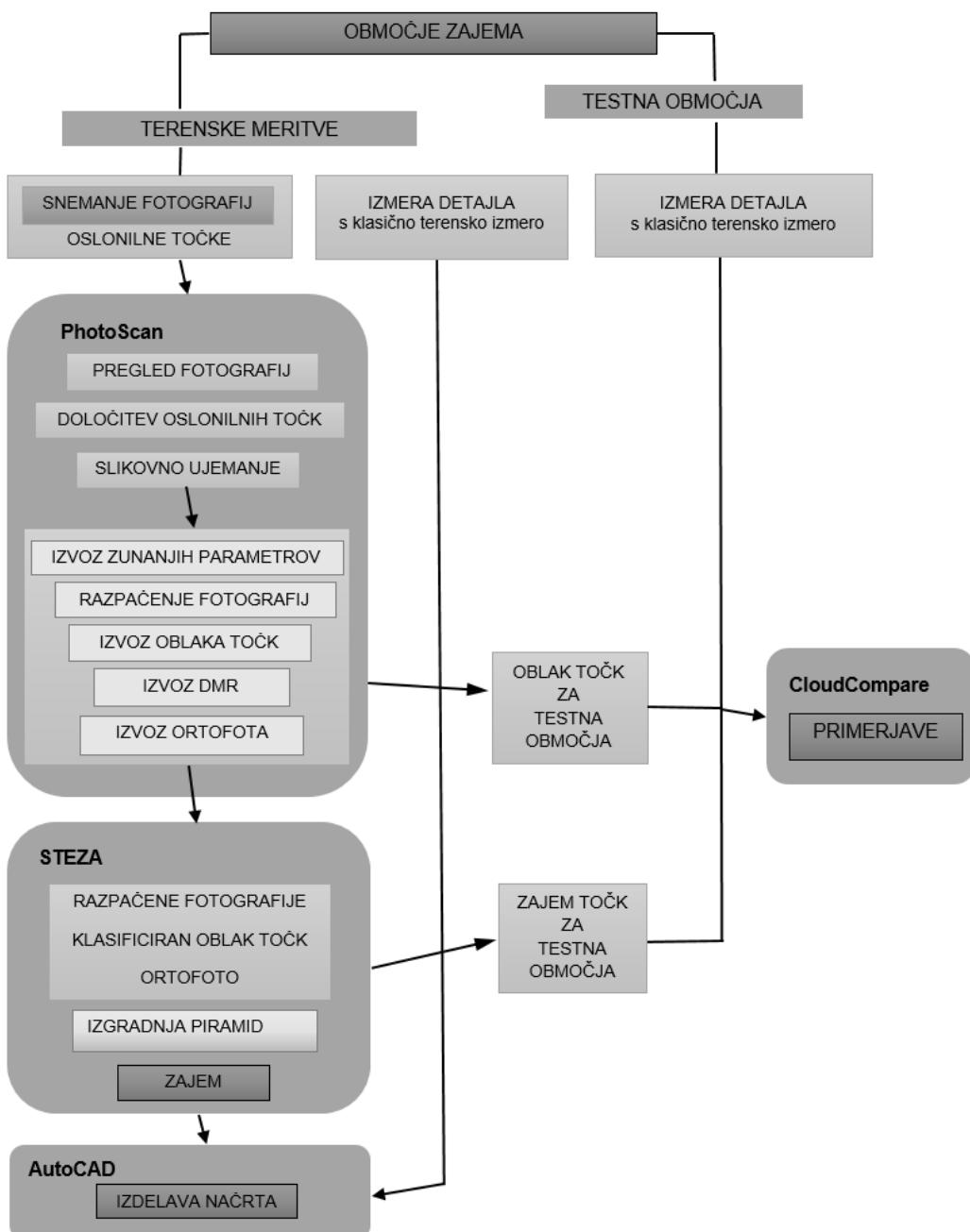
Detajl smo izmerili po zaključku fotogrametričnega zajema, to je bilo aprila 2016, in sicer po tem, ko smo ugotovili, kje zajem detajla iz stereoparov, predvsem zaradi zaraščenosti terena, ni mogoč. Hkrati z izmero detajla smo opravili še identifikacijo načrta, zajetega po stereoparih. Detajl je bil zajet s klasično terestrično metodo in istim inštrumentarijem, kot je bil uporabljen za izmero oslonilnih točk.

Zadnja faza terenskih meritev je bila spet klasična terestrična izmera detajla, opravljena julija 2016, po že izdelanem geodetskem načrtu. Izvedena je bila samo zaradi končne primerjave in analize razlik med terensko izmero in fotogrametričnim zajemom. Za izmero smo uporabili ista stojišča in isti inštrumentarij kot pri meritvi oslonilnih točk.

4 OBDELAVA PODATKOV

V tem poglavju so po korakih opisane faze obdelave podatkov. Na sliki 4.1 je ilustrativno prikazan celoten potek obdelave podatkov po posameznih fazah in glede na uporabljenia programska orodja.

Najprej smo opisali uporabljeno metodologijo, nato sledi opis obdelave fotografij v programskem orodju PhotoScan in poteka stereozajema v programskem paketu STEZA, opis izdelave in izrisa geodetskega načrta v programskem orodju AutoCAD ter izvedbe geometričnih primerjav na izbranih objektih (cesta in robniki, železniški tiri, teren in vegetacija, stavbe).



Slika 4.1: Shema poteka obdelave podatkov in uporabljenia programska orodja

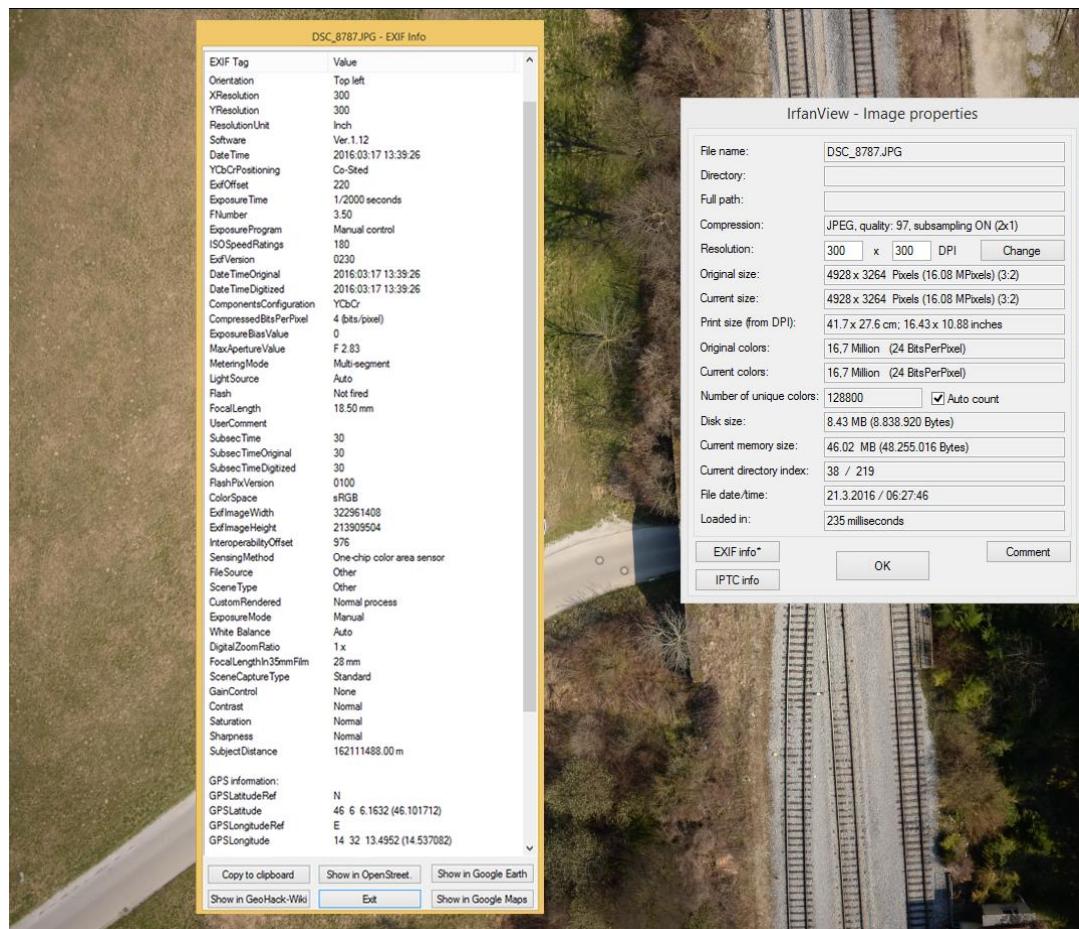
4.1 Obdelava podatkov v programskejem orodju PhotoScan

Obdelavo podatkov smo začeli z obdelavo fotografij, zato da smo pridobili stereopare, ki so bili naš poglavitni vir za fotogrametrični zajem topografskih podatkov. Pozneje smo vire podatkov dopolnili in izdelali ortofoto in fotogrametrični gost oblak točk.

V nadaljevanju predstavljamo postopke (slika 4.1), ki smo jim posvetili največ časa, saj so izredno pomembni za izdelavo stereoparov. Pri tem se omejujemo na pripravo in obdelavo fotografij, natančno določitev oslonilnih točk ter slikovno ujemanje. Uporabili smo komercialno programsko orodje PhotoScan ter si pomagali z navodili za uporabo programa. Program uporablja na Geodetski družbi d. o. o., kjer smo obdelavo podatkov tudi izvedli.

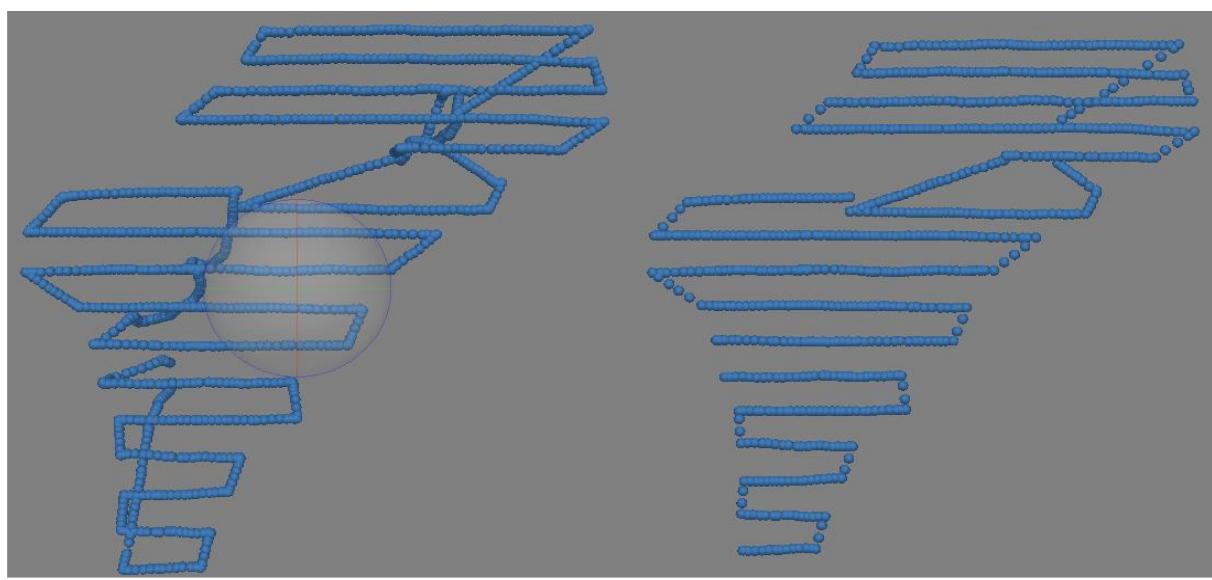
4.1.1 Pregled in priprava fotografij

Pri uvozu fotografij v program smo opazili, da so fotografije okvirno umeščene v prostor, saj že imajo približne koordinate v koordinatnem sistemu WGS-84. Program pri uvozu namreč prebere EXIF metapodatke vsake fotografije (slika 4.2) ter jih razporedi glede na tip fotoaparata, njegove goriščne razdalje in ločljivosti slike, kar je zelo dobrodošlo, če izvajamo snemanje z več različnimi fotoaparati.



Slika 4.2: Primer EXIF metapodatkov uporabljenih fotografij

Fotografije smo po uvozu v program temeljito pregledali ter izločili vse, ki niso bile dovolj ostre ali pravilno osvetljene, in vse, ki so bile posnete ob vzletu in pristanku zrakoplova. Odstranili smo tudi odvečne fotografije na zavojih leta, kjer je na zelo majhni oddaljenosti posnetih veliko fotografij, ki jih za analizo ne potrebujemo. Tako smo zmanjšali število fotografij s 1368 na 729 fotografij (slika 4.3). Manjše število fotografij olajša obdelavo, saj smo vedno omejeni z razpoložljivo računalniško strojno opremo.



Slika 4.3: Vse posnete fotografije (levo) in fotografije, ki smo jih vključili v analizo (desno)

4.1.2 Povezovanje fotografij prek homolognih točk

Navodila za uporabo programa opisujejo postopek poravnjanja fotografij (angl. *photo alignment*); to je termin, ki se uporablja na področju računalniškega vida. Z vidika fotogrametrije gre za povezovanje fotografij preko homolognih točk, ki se samodejno določijo s postopkom slikovnega ujemanja v fazi formiranja redkega oblaka točk. Postopek obsega več korakov.

4.1.2.1 Določitev objektnega koordinatnega sistema

Najprej definiramo objektni koordinatni sistem, ki je dejansko koordinatni sistem, v katerem opravimo stereozajem, torej koordinatni sistem, v katerem orientiramo aerofotografije. Program ponuja široko paletu koordinatnih sistemov; mi smo uporabili koordinatni sistem ETRS89.

4.1.2.2 Določitev parametrov notranje orientacije

Parametre notranje orientacije programu podamo s kalibracijskimi parametri uporabljenega fotoaparata (preglednica 4.1).

Preglednica 4.1: Kalibracijski parametri fotoaparata Nikon CoolPix A

Parameter	Opis	Vrednost
fx	goriščna razdalja x-koordinate v pikslih	3837,56
goriščna razdalja y koordinate v pikslih	3838,28	
cx	x-koordinata glavne točke	2457,57
cy	y-koordinata glavne točke	1637,51
skew	parameter poševnosti	0,2513356
k1	koeficient radialne distorzije	-0,0744771
k2	koeficient radialne distorzije	0,0881870
k3	koeficient radialne distorzije	-0,0390718
k4	koeficient radialne distorzije	0,0163310
p1	koeficient tangentne distorzije	0
p2	koeficient tangentne distorzije	0

4.1.2.3 Določitev približnih zunanjih parametrov orientacije

Na tej stopnji program zahteva več nastavitev, ki močno vplivajo na rezultat slikovnega ujemanja in s tem določitev parametrov zunanje orientacije, in sicer:

- natančnost določitve koordinat projekcijskega centra (angl. *camera position*): visoka ali nizka,
- zgornja meja števila ključnih točk (angl. *key points*): število značilnih točk (angl. *feature points*) na vsaki fotografiji, ki jih program vključi v izračun,
- zgornja meja števila veznih točk (angl. *tie points*): število ujemajočih se točk (angl. *matching points*) za vsako fotografijo.

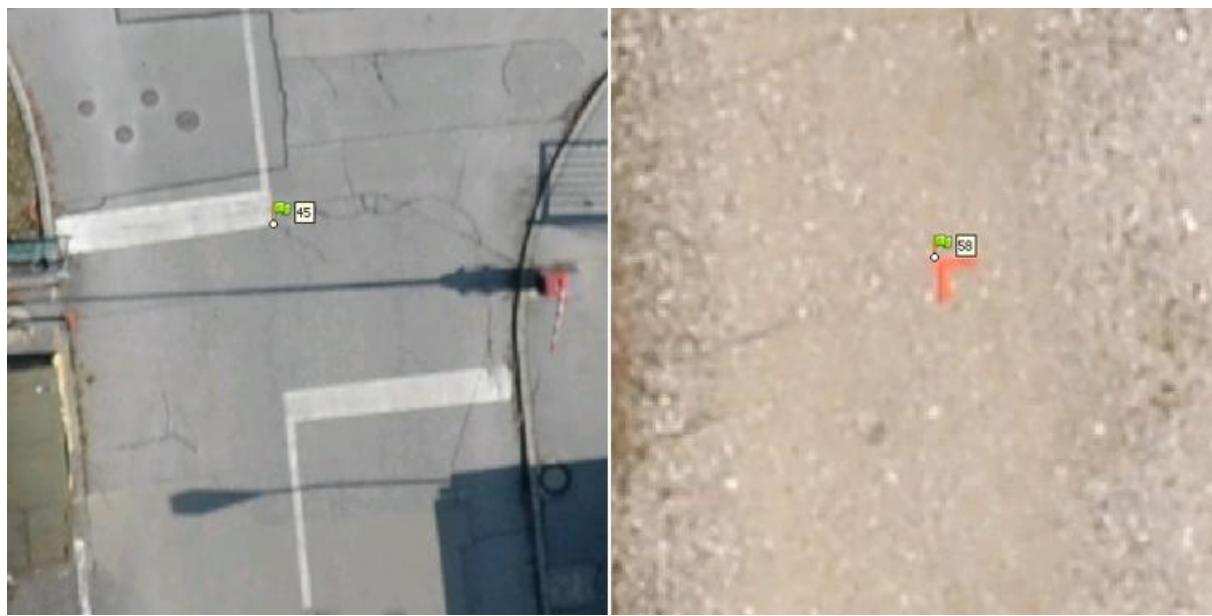
Po končanem postopku slikovnega ujemanja pridobimo približne koordinate projekcijskih centrov in orientacijo za vsako fotografijo ter redek oblak točk, ki je obsegal 58.178 veznih točk.

4.1.2.4 Določitev točnih zunanjih parametrov orientacije

Za končno določitev parametrov zunanje orientacije uvozimo oslonilne točke, ki jih v nadaljevanju skladno s programom obravnavamo kot markerje (angl. *markers*). Program definirana markerje z njihovo projekcijo na izvorni fotografiji. Več ko je fotografij s specifičnim markerjem, večja je natančnost lokacije markerja. Vsak marker mora biti na vsaj dveh fotografijah.

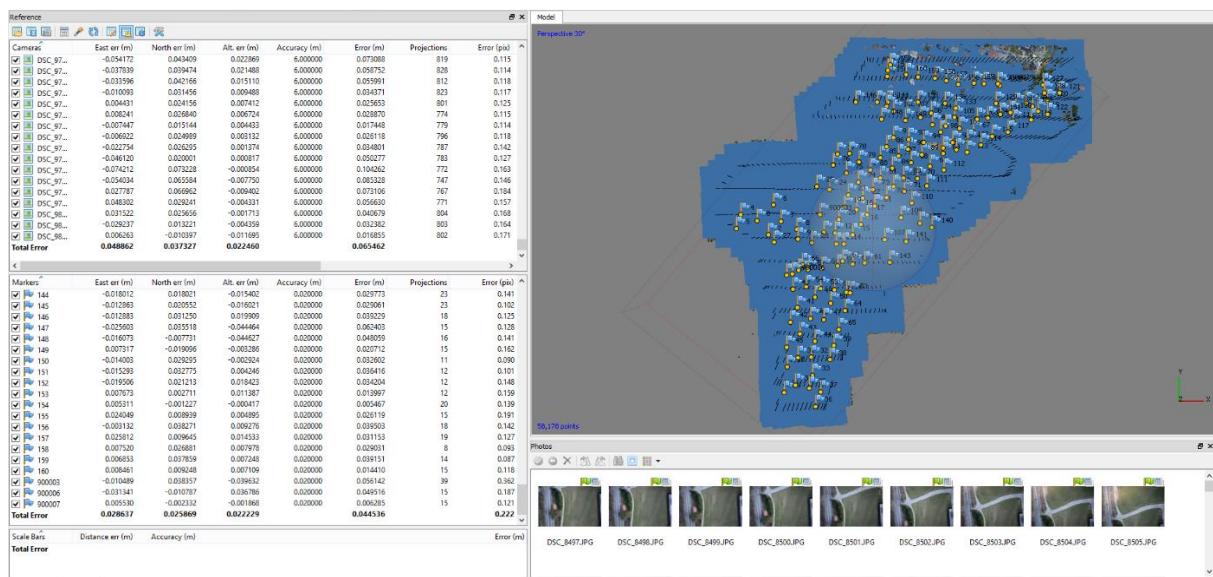
Program ponuja dva pristopa: ročno lociranje markerjev ali vodenlo lociranje markerjev, kjer ob določitvi markerja na eni fotografiji program avtomatsko najde isti marker tudi na ostalih fotografijah. Za ta pristop je nujen 3D-model terena, primeren pa je tudi takrat, ko nimamo oslonilnih točk, ampak delamo z modelom v lokalnem koordinatnem sistemu, ki je definiran glede na koordinate fotoaparata.

Pri našem delu smo izbrali ročno lociranje markerjev, saj so bile njihove koordinate že poznane. Ker imamo vsak marker na vsaj dveh fotografijah, je program avtomatsko našel vse markerje na vseh fotografijah. Vsak marker smo natančno locirali na fotografiji; izbrali smo prvega in program je pokazal lokacije istega markerja na drugih fotografijah, na katerih smo ga premaknili na točno lokacijo (slika 4.4). Program po nekaj premikih markerja na nekaj fotografijah tudi na preostalih fotografijah avtomatsko premika marker na točnejše lokacije, kar pomeni, da program sproti preračunava parametre georeferenciranja.



Slika 4.4: Primera točnega lociranja markerja

Program tudi sproti kaže natančnost določitve položaja fotoaparata in markerjev (slika 4.5), ki jih po končanem postopku pregledamo, da ugotovimo, ali smo storili kako grobo napako, in preverimo, ali smo kakšen marker izpustili.



Slika 4.5: Prikaz natančnosti položaja fotoaparata in markerjev po končanem slikovnem ujemanju

S končanim postopkom slikovnega ujemanja in izravnave bloka fotografij smo pridobili parametre zunanje orientacije (slika 4.6), ki smo jih poleg parametrov notranje orientacije, ki so v kalibracijskem poročilu fotoaparata, uporabili za izdelavo stereoparov. Dodatno smo potrebovali še fotografije, na katerih je odpravljena optična distorzija objektiva. Program omogoča izvoz teh fotografij, pri čemer

26

navaja, da upošteva Brownov model distorzije (PhotoScan, 2016); parametri za upoštevanje distorzije so zapisani v kalibracijskem poročilu fotoaparata (preglednica 4.1).

Slika 4.6: Parametri zunanje orientacije, potrebni za uvoz v program STEZA

4.1.3 Izdelava gostega oblaka točk

Za izdelavo gostega oblaka točk je potrebnih več nastavitev:

- kakovost: zelo visoka, visoka, srednja, nizka, zelo nizka,
 - globina filtriranja: onemogočena, blaga, zmerna, agresivna

Višja kakovost pomeni natančnejšo in točnejša geometrijo, vendar je čas procesiranja daljši. Najvišja kakovost pomeni, da bo program procesiral originalno fotografijo, medtem ko vsak naslednji korak pomeni predhodno zmanjšanje velikosti fotografije za faktor 4.

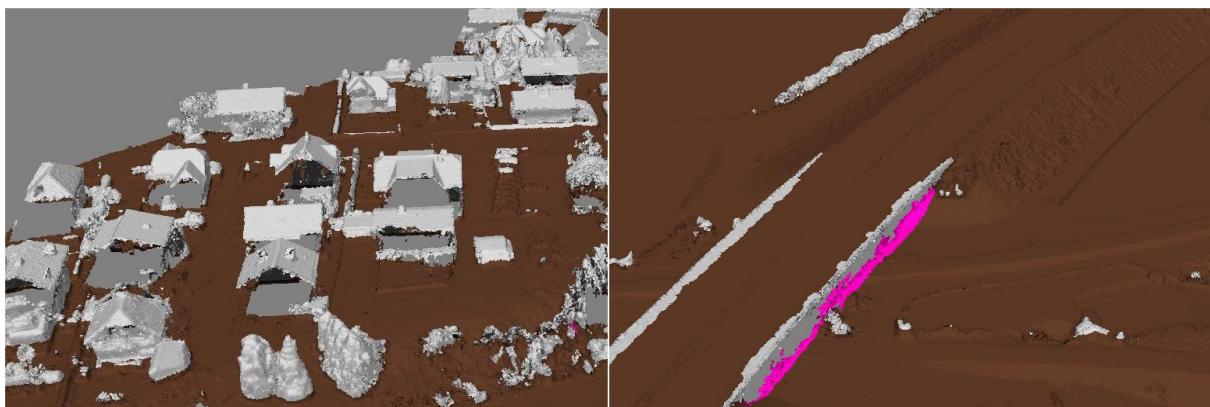
4.1.4 Izdelava digitalnega modela reliefa

DMR izdelamo iz gostega oblaka točk, ki ga najprej klasificiramo oziroma filtriramo, kar pomeni, da program avtomatsko odstrani vse, razen talnih točk (klasifikacija: teren, angl. *ground*). Avtomatska klasifikacija poteka v dveh korakih. V prvem koraku program razdeli oblak točk na celice določenih velikosti, ki jih sami določimo glede na to, ali imamo v oblaku območja dreves in hiš, ki nimajo talnih točk. V vsaki celici nato program določi najnižjo točko in s triangulacijo teh točk je nato določen prvi približek modela reliefa. V drugem koraku pa program dodaja točke v razred tla, če izpolnjujejo dva pogoja, in sicer:

- točka leži na določeni razdalji od modela terena in
 - kot med modelom terena in linijo, ki povezuje novo točko s točko v razredu tla, je manj kot vnaprej določena vrednost.

Oba pogoja mu določimo uporabniki glede na to razgibanost terena. Program omogoča tudi ročno klasifikacijo po klasifikacijskih razredih lidarskih podatkov, ki pa je lahko za tako velike oblake točk zelo zamudna.

Po končani klasifikaciji nam program prikaže problematična mesta. To so območja visoke vegetacije, stavb in mostov, kjer ni talnih točk (slika 4.7). Prikaže tudi mesta nizkih točk (angl. *low point*), ki so napačno klasificirana in ležijo pod površjem ali pa so to lokacije povečanega šuma (angl. *noise*), ki so na sliki označene z rožnato barvo. Vse te točke odstranimo.



Slika 4.7: Levo prikaz lukenj v klasificiranem oblaku točk in desno prikaz točk šuma (rožnate točke)

Po klasifikaciji program izdela DMR na podlagi več nastavitev:

- tip površja: raznoliko, ravninsko,
- vir podatkov: redek oblak, gost oblak,
- število poligonov: visoko, srednje, nizko,
- interpolacija: da, ne, ekstrapolacija (zapolni vse luknje v modelu).

Program omogoča tudi izdelavo DMP, kjer upošteva celoten oblak točk in filtriranje ni potrebno.

4.1.5 Izdelava ortofota

Izdelava ortofota temelji na posnetih fotografijah in izdelanem DMR. Program tudi omogoča, da namesto modela reliefa uporabimo DMV in s tem skrajšamo čas obdelave. Možne nastavitev so še podatek za prostorsko ločljivost na tleh (angl. *Ground Sampling Resolution, GSR*) in končna dimenzija rastra v pikslih.

Izdelali smo ortofoto s prostorsko ločljivostjo 5 cm in nato za primerjavo še popolni ortofoto (angl. *true orthophoto*) z ločljivostjo 2,2 cm. Opazna je razlika v prostorski ločljivosti obeh ortofotov (slika 4.8). Prostorska ločljivost je bistvena pri vektorizirjanju podatkov po ortofotu, saj podaja pozicijsko točnost vektoriziranja podatkov.



Slika 4.8: Jašek na ortofotu s prostorsko ločljivostjo 5 cm (levo) in 2,2 cm (desno)

Slika 4.9 prikazuje lepotne popravke podrobnosti, ki kvarijo končno podobo ortofota, s postopkom mozaičenja. S tem postopkom nam program po označitvi poligona (rdeča črta), ki ga želimo popraviti, prikaže vse fotografije, ki pokrivajo ta poligon.

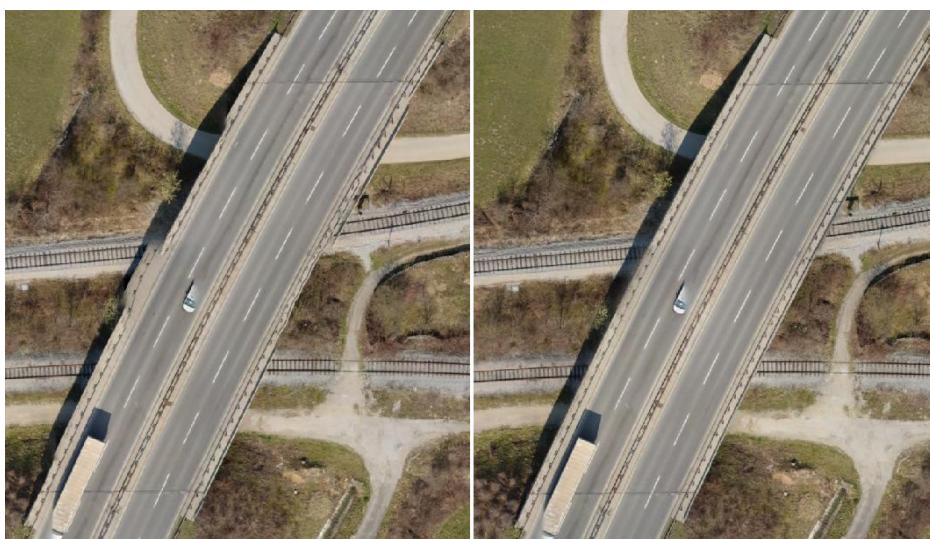


Slika 4.9: Po korakih prikazano popravljanje ortomozaika

Posebno pozornost pri popravkih posvetimo stavbam oziroma njihovim streham. Te se največkrat deformirajo, ker so na drugačni višini kot relief, zato je v urbanih okoljih primernejše uporabiti za izdelavo ortofota DMP, ki ohranja višino streh. Tako izdelan ortofoto se imenuje popolni ortofoto. Na slikah 4.10 in 4.11 so na primeru stavb in mostu prikazane razlike med ortofotom in popolnim ortofotom.



Slika 4.10: Ortofoto, izdelan na podlagi DMR (levo) in DMP (desno)



Slika 4.11: Most na ortofotu, izdelan na podlagi DMR (levo) in DMP (desno)

4.2 Stereozajem v programskem paketu STEZA

Zunanji parametri orientacije fotografij, fotografije in parametri kalibracije fotoaparata so vhodni podatki za izdelavo stereoparov, ki so temelj fotogrametričnega stereozajema. Tega smo v celoti izvedli v programu STEZA. Osrednja tema tega poglavja je stereozajem; posvetili smo se različnim vidikom zajema topografskih objektov ob upoštevanju, da je naš končni izdelek geodetski načrt v merilu 1 : 500. Opisujemo tudi začetne faze izdelave projekta v programu STEZA, kar pomeni izdelavo slikovnih piramid ter nastavitev slojev za stereozajem.

4.2.1 Metoda in viri za stereozajem

Kot metodo za zajem smo uporabili kombiniran fotogrametrični zajem na podlagi fotografij, ki smo jih posneli z brezpilotnim zrakoplovom, in LSS, medtem ko smo izdelani fotogrametrični oblak točk uporabili kot dodatni vir. Uporabili smo podatkovni sloj OTR, to je georeferenciran oblak točk reliefa, ki vsebuje le točke, klasificirane kot tla (eVode, 2016). Kombiniran zajem torej pomeni, da na odprtem terenu poteka zajem na podlagi stereoparov, na olistanem pa geometrijo pripenjamo ali interpoliramo med točkami izdelanega DMR in pridobljenega OTR (Navodila ..., 2015).

4.2.2 Izdelava piramid

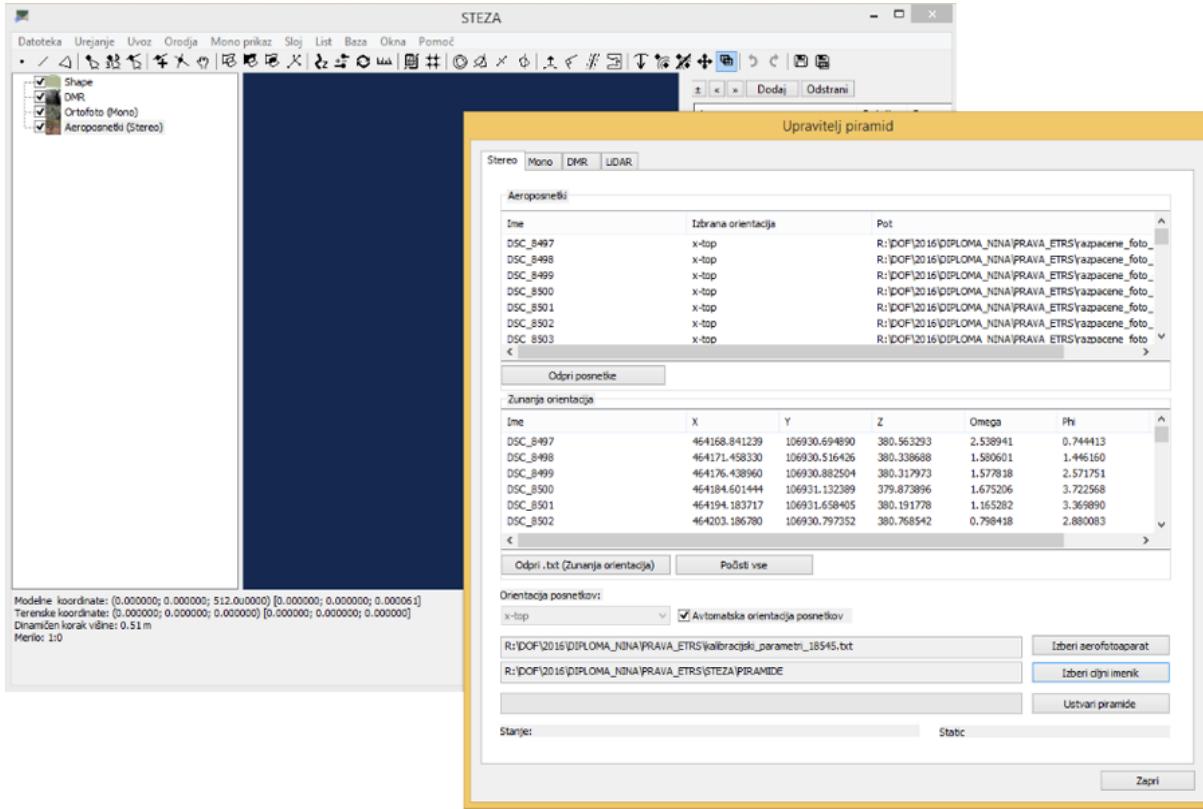
Programski paket STEZA za vizualizacijo več vrst podatkov, kot so vektorski in rastrski podatki formata LAS, TIF ali ASCII, uporablja piramidno strukturo (slika 3.4) (STEZA, 2014). Tako se skupna količina podatkov sicer poveča, ker se shranjujejo različne stopnje detajla, vendar se med interaktivnim prikazom količina računalniškega spomina zmanjša (Dorffner, 2000), kar omogoča, da se podatki hitro prikazujejo v različnih merilih.

4.2.2.1 Izdelava piramid aeroposnetkov

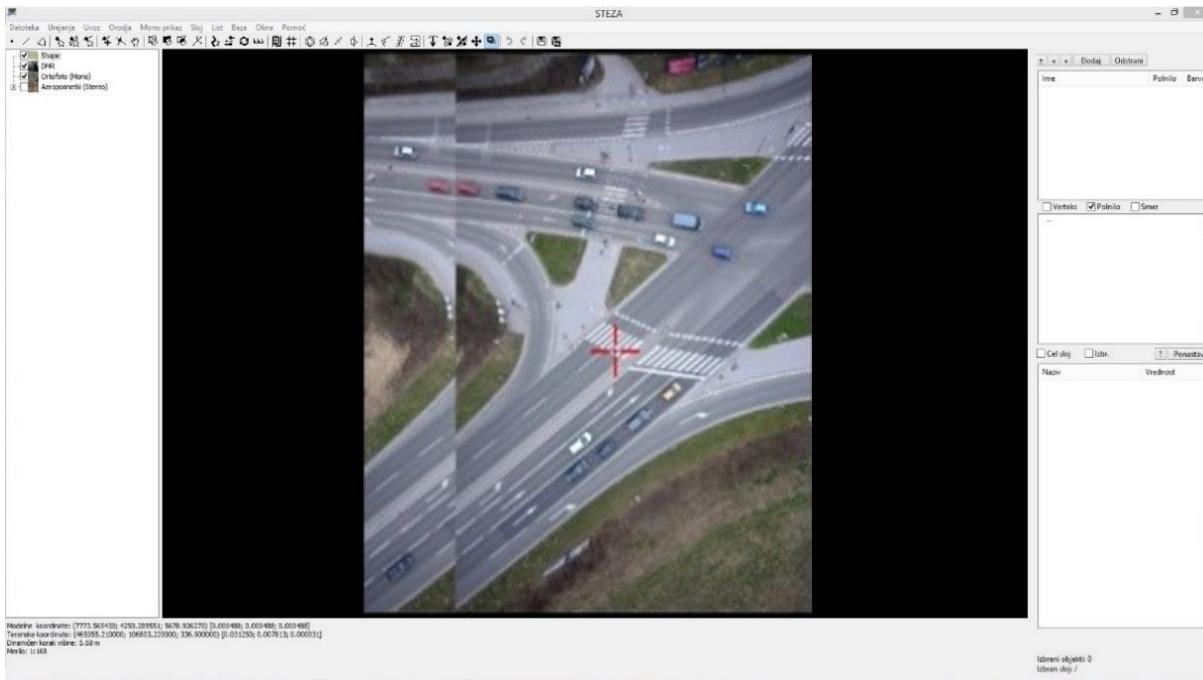
Vhodni podatki za izdelavo piramid (slika 4.12) so:

- fotografije z odpravljeno distorzijo,
- parametri zunanje orientacije fotografij,
- kalibracijski parametri fotoaparata.

Po končani izdelavi piramid smo podatke shranili v program in jih uporabili za stereoprikaz (slika 4.13) in stereozajem (STEZA, 2014).



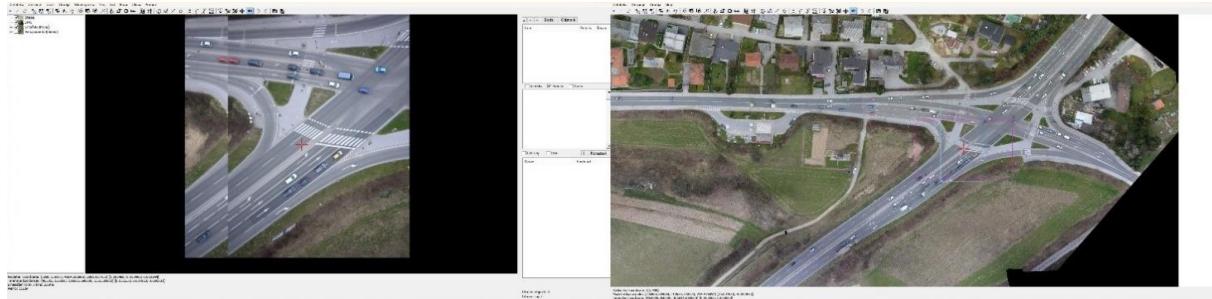
Slika 4.12: Izdelava piramid stereoposnetkov v programu STEZA



Slika 4.13: Prikaz stereopara v programu STEZA

4.2.2.2 Izdelava piramid rastrskih slojev

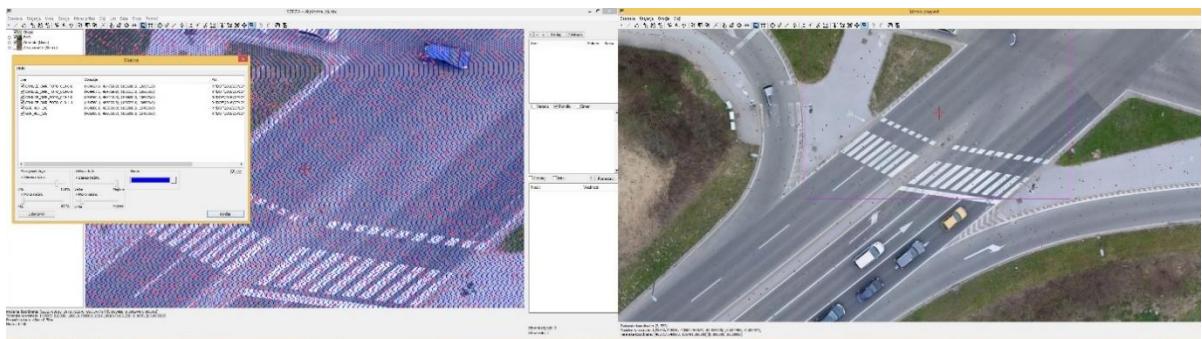
STEZA poleg piramid aeroposnetkov omogoča tudi izdelavo piramid raznih georeferenciranih rastrskih slojev (STEZA, 2014). V naši nalogi smo uporabili izdelan ortofoto s prostorsko ločljivostjo 5 cm kot rastrsko podlago za monopogled, ki ga poleg stereopogleda omogoča program STEZA. Zgradimo torej novo piramido na podlagi ortofota (TIF) in njegove geolokacije (TFW) (slika 4.14).



Slika 4.14: Prikaz stereopogleda (levo) in monopogleda (desno) v programu STEZA

4.2.2.3 Izdelava piramid točkovnih podatkov

Poleg rastrskih slojev so pri stereozajemu v pomoč tudi točkovni vektorski podatki. STEZA loči dve obliki slojev, in sicer ASCII (DMR), kjer morajo biti datoteke s točkami zapisane v formatu ASC ali XYZ, in LAS obliko (npr. GKOT, DMR1 ali OTR), kjer morajo biti datoteke v formatu LAS, poleg tega pa mora biti uporabljen oblak točk tudi klasificiran kot razred terenskih točk (STEZA, 2014). V našem primeru smo za izdelavo piramid uporabili izdelan DMR (XYZ format) in pridobljene lidarske podatke (slika 4.15).



Slika 4.15: Stereopogled (levo) in monopogled (desno) v programu STEZA po naloženih vseh piramidah, kjer stereopogled prikazuje še lidarske (rdeče) in DMR točke (modre)

4.2.3 Stereozajem podatkov

4.2.3.1 Pravila za zajem

Končni izdelek je geodetski načrt merila 1 : 500, zato morajo zajeti topografski podatki ustrezati postavljenim (kvantitativnim) merilom:

- vsi podatki morajo biti zajeti na ustrezni višini, saj izdelujemo 3D-geodetski načrt,
- položajna in višinska točnost morata biti primerni merilu načrta ($\pm 0,10$ cm).

4.2.3.2 Predmet zajema

Vsebina geodetskega načrta je določena s Pravilnikom o geodetskem načrtu, ki geodetski načrt opredeljuje kot prikaz fizičnih struktur in pojavov na zemeljskem površju in za prikaz vsebine zahteva uporabo topografskega ključa (Pravilnik, 2004). Predmet zajema pri stereozajemu je zajem detajla, natančno tak, kot bi ga posneli s klasičnimi terestričnimi meritvami ali GNSS izmero, torej vsa vsebina, ki jo lahko vizualno interpretiramo.

4.2.3.3 Potek dela

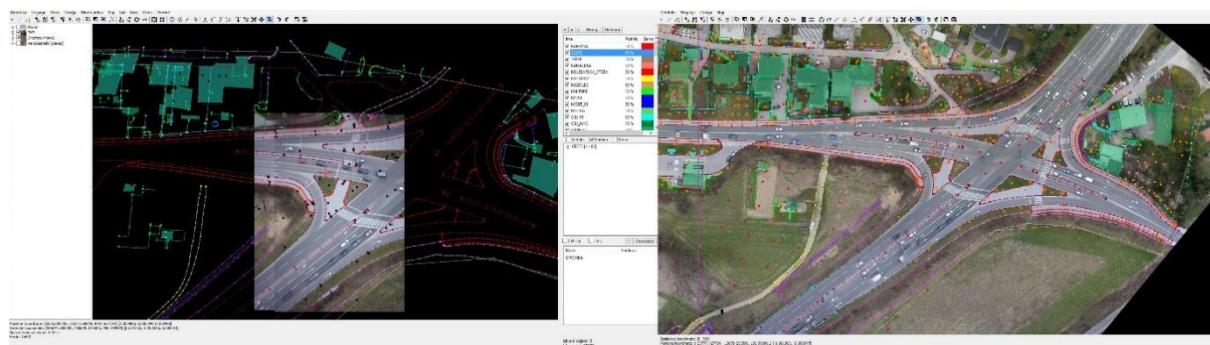
Program STEZA omogoča dva ločena pogleda, to sta stereopogled, ki je dejansko prikaz stereomodela in ga vidimo na 3D-monitorju, ter monopogled, ki je v pomoč in je lahko na istem ali na drugem monitorju (slika 3.3).

STEZA je obsežen program z veliko nastavtvami, ki so potrebne pred dejanskim začetkom zajema, zato predstavljamo le poglavitne alinee naših osnovnih nastavitev po vrstnem redu:

- v stereopogledu naložimo aeroposnetke, v monopogledu odpremo DOF piramide,
- naložimo vse sloje DMR ter si nastavimo ustrezno barvo, velikost in prosojnost točk,
- izdelamo SHP-datoteke ozioroma sloje, in sicer točkovne (za vse točkovne znake), linijske (ceste, pločniki, ograje, teren,...) in ploskovne (objekti),
- shranimo projekt in ustvarjene sloje.

Pomembno je, da pri zajemu vektorskih topografskih podatkov po stereoparih uporabimo le osrednji del stereopara, ki je manj obremenjen z napakami orientacije (Navodila ..., 2015). Ker imajo v našem primeru fotografije velik vzdolžni (80 %) in prečni (60 %) preklop, to pomeni, da je optimalni stereozajem skorajda čez celotni stereopar. Slaba stran tako velikega preklopa je zelo veliko število fotografij, kar pomeni veliko menjanja in iskanja pravih fotografij za stereopar, kar je zamudno.

Zajem je potekal tako, da smo s fotointerpretacijo in razlikami v višinah, ki smo jih interpretirali v stereopogledu, določili geometrijo in vrsto prostorskih objektov (Navodila ..., 2015) (slika 4.16). Odprli smo torej dve sosednji fotografiji, ki sta tvorili stereopar, izbrali sloj (SHP-datoteka), na katerem smo zajemali, ter ustrezni sloj (točkovni, linijski, ploskovni) glede namen zajema. S prostorskim križem (mersko markico) smo se postavili na želeno mesto zajema in ustrezno višino ter s klikanjem levega gumba miške narisali ozioroma zajeli želeni objekt.



Slika 4.16: Prikaz zajema, levo je trenutno območje v stereopogledu in desno v monopogledu

4.2.3.4 Problemi pri zajemu detajla

Zajemanje detajla s hkratnim določevanjem višin oziroma globin (ob pogledu navzdol) ni enostavno. Največji izziv je vsekakor določanje višin v senčnih in zaraščenih območjih, kjer smo si pomagali z lidarskimi podatki in izdelanimi DMR. Ugotovili smo tudi, da je nesmiselno zajemati stavbe po vogalih, ampak smo jih zajeli po obodu streh ter to zapisali v certifikat načrta. Tudi pri zajemu lomov terena je potrebna pazljivost, da se zajame lom na pravem mestu. Poseben izziv je tudi zajem podpornih in opornih zidov, kjer so opazni vertikalni padci, pri tem pa sta pomembni višina tal in višina zidu.

4.3 Izdelava in izris geodetskega načrta v programskega orodju AutoCAD

Fotogrametrično zajete vektorske podatke iz SHP-datotek preko programa GeoPro uvozimo v programsko orodje AutoCAD ter uredimo načrt, da je primeren za izris (slika 4.17). Opremimo ga še s koordinatnimi križi, s tekstovno vsebino in glavo načrta, vanj vklopimo GJI (gospodarsko javno infrastrukturo) in pripadajočo legendo ter podatke o zemljiških parcelah. Pripadajoči certifikat napiše odgovorni geodet.



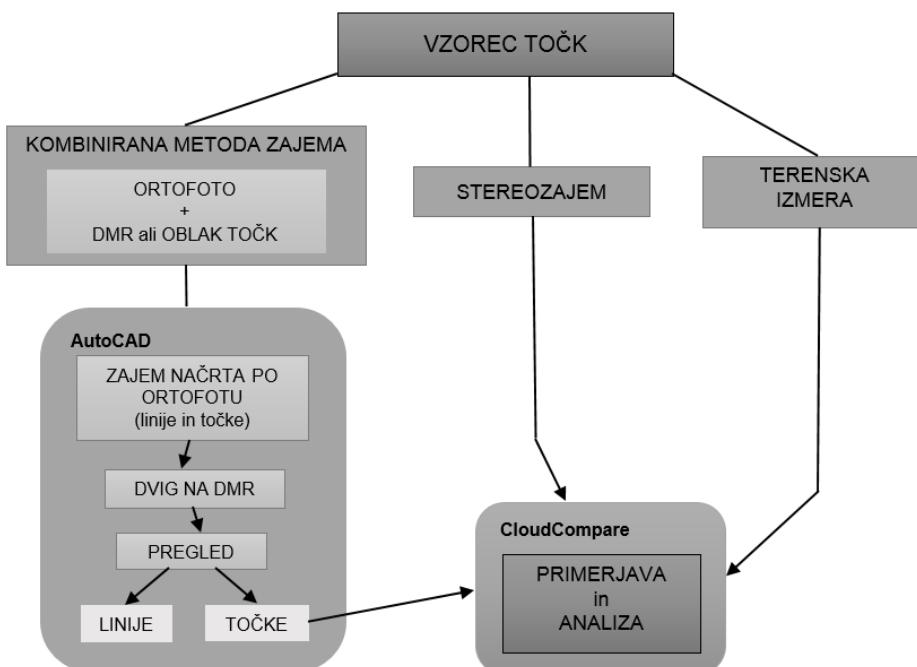
Slika 4.17: Delni izris načrta pred (levo) in po (desno) urejanju v AutoCADu

4.4 Geometrične primerjave

Glavni cilj geometričnih primerjav je analiza uporabnosti različnih fotogrametričnih metod zajema podatkov, katerih viri so fotogrametrični izdelki, narejeni na podlagi fotografij. Ker so naši fotogrametrični izdelki stereopari, fotogrametrični oblak točk, iz njega narejeni DMR ter nato še ortofoto, je pri izdelavi geodetskega načrta smiselno uporabiti te izdelke. Zanimalo nas je, katere vrste podatkov lahko z določeno metodo zajamemo ter kakšna so položajna in višinska odstopanja. Uporabili smo programski orodji AutoCAD in CloudCompare, ki je program, namenjen primerjavi oblakov točk.

Izbrali smo tri metode za medsebojno primerjavo (slika 4.18), in sicer metodo klasične terenske izmere, ki je bila naša referenčna metoda, nato stereozajem, ki je tema te diplomske naloge, ter tretjo metodo, ki je kombinacija uporabe ortofota in DMR. Zadnjo izmed metod smo izbrali zato, ker vsaj teoretično omogoča izredno hiter zajem prostorskih objektov in topografije ter se kot metoda, kjer se rastrske karte napnejo na DMR, dejansko že množično uporablja. Vendar gre v našem primeru za zajem in izdelavo

geodetskega načrta merila 1 : 500, kjer je zahtevana višinska in položajna natančnost ± 10 cm. Metode smo ovrednotili in ugotovili njihove prednosti in slabosti ter s tem določili njihovo uporabnost.



Slika 4.18: Shema geometričnih primerjav

4.4.1 Priprava podatkov za primerjavo

Znotraj območja izdelanega geodetskega načrta smo izbrali testna območja, kar pomeni, da smo v vsakem območju zajeli testni vzorec točk s tremi različnimi metodami zajema. Najprej je bila narejena terenska klasična izmera detajla, nato stereozajem ter na koncu še kombinirana metoda zajema podatkov iz ortofota in izdelanega DMR. Določene detajle smo skušali zajeti tudi direktno na oblaku točk, vendar le tam, kjer smo predvidevali, da je to smotrno. Tak način zajema podatkov je zelo zamuden in dolgorajen, za zahtevano natančnost zajema pa je potreben tudi izredno gost oblak točk.

Naša testna območja in s tem vzorce točk smo izbrali tako, da smo lahko primerjali različne detajle zajema oziroma različne objektne tipe, in sicer so bili izbrani:

- ceste in robniki,
- železnica,
- teren,
- vegetacija,
- stavbe,
- točkovni znaki.

4.4.2 Izvedba geometričnih primerjav

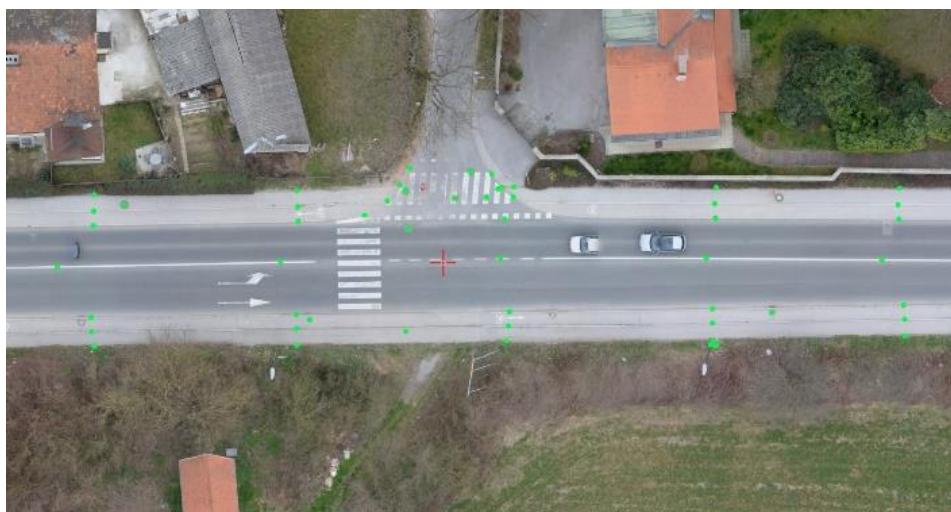
Pri vseh testnih območjih gre za enak postopek geometričnih primerjav (slika 4.18). Izmerjene terenske točke detajla smo uporabili kot referenčne točke. Te iste točke smo nato zajeli z metodo stereozajema ter obe vrsti točk uvozili v program CloudCompare za medsebojno primerjavo. S tem smo ugotovili višinske razlike oziroma pridobili višinsko primerjavo. Program CloudCompare ne omogoča le izračuna

odstopanja po z-koordinati, ampak tudi izračun odstopanj po koordinatah x in y, s čimer lahko ugotovimo položajna odstopanja med točkami.

Ta postopek smo ponovili za primerjavo med referenčno klasično terensko izmero in kombiniranim zajemom po ortofotu in DMR. Kombinirana metoda je bila izpeljana v programskem okolju AutoCAD Civil 3D. Po ortofotu smo zajeli vse fotointerpretirane prostorske objekte z linijami (morajo biti 3D-linije, čeprav so še brez višin) in s točkami ter s tem dobili 2D-načrt, ki smo ga nato dvignili na višine DMR. S tem smo pridobili 3D-načrt. Nato smo preverili višine prostorskih linij ter nato še višine točk, ki smo jih uvozili v program CloudCompare, in jih končno primerjali s točkami terenske izmere.

4.4.2.1 Cesta in robniki

Cesta je eden izmed osnovnih objektnih tipov, ki je prisoten skorajda na vsakem načrtu. Leži na odprttem terenu, zato z zajemom nismo imeli problemov ne glede na uporabljeno metodo. Cesta je ustrezan objekt za primerjavo tudi zato, ker jo omejujejo robniki, ki kažejo, ali je načrt, zajet po ortofotu ter dvignjen na DMR, primeren in dovolj točen.



Slika 4.19: Detajlne točke na območju ceste

Z vsako izmed treh metod smo zajeli 71 točk. To so točke cestišča, robnikov in pločnika, vmes pa je tudi 10 točk, ki predstavljajo jaške komunalnih vodov in eno luč (slika 4.19).

Za prvo primerjavo višinskih odstopanj, pri kateri so nas zanimala predvsem višinska odstopanja med ploskvami oziroma 3D-modeli, smo na podlagi terenskih točk, stereo zajetih točk in DMR izdelali tri modele ploskev ter jih med seboj primerjali na podlagi dveh prečnih profilov izdelanih v programu AutoCad Civil 3D.

Za končno višinsko primerjavo smo s programom CloudCompare primerjali razlike med višinami točk. Pri tem smo bili predvsem pozorni na vertikalna odstopanja pri robnikih ceste.

4.4.2.2 Železnica

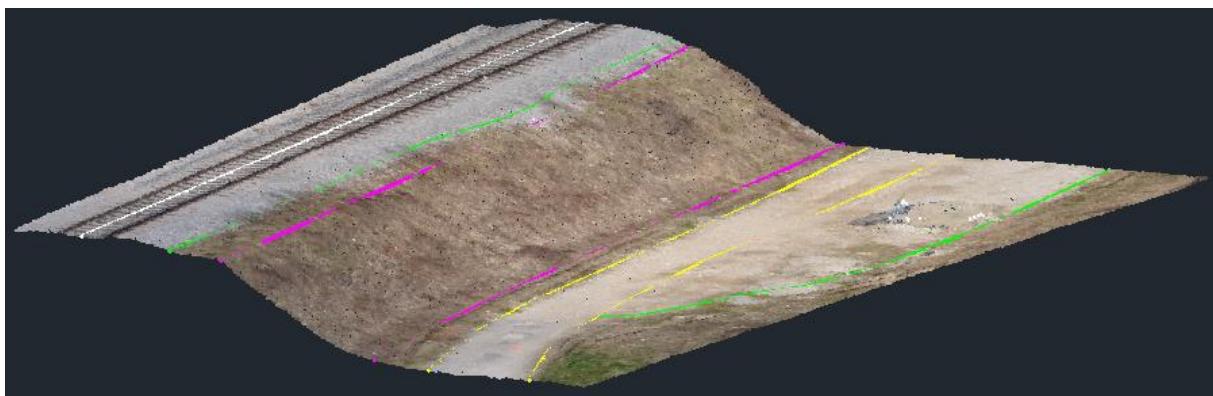
Železnico smo izbrali, ker je tako kot cesta pomemben del prometne infrastrukture. Čeprav leži na odprttem terenu, je njen relief zelo razgiban, kar je posledica njene zgradbe, spodnjega in zgornjega ustroja železnice. Del železnice leži na mostu, ki je tudi primeren za primerjavo.

Zajeli smo 73 detajlnih točk, od tega je bilo pet točk mostu (slika 4.20). Ker gre za odprto območje trase železnice, zajem točk ni povzročal težav. Vse točke smo zopet zajeli z vsemi tremi že opisanimi metodami zajema ter nato izpeljali položajno in vertikalno primerjavo med njimi. Tudi tu smo narisali tri različne načrte za vizualno primerjavo. Izrisali smo tudi dva prečna profila objekta železnice za višinsko primerjavo, ki smo jo nato lahko primerjali s tisto, ki smo jo naredili za objekt ceste, saj nas zanima tudi medsebojni položaj ploskev oziroma modelov.



Slika 4.20: Detajlne točke na območju železnice

Železnica večinoma leži na odprtem območju, zato smo jo skušali posebej zajeti samo po fotogrametričnem oblaku točk, ki ima prednost, da ima za vsako točko tudi podatek o barvi. Ker je železnica barvno in kontrastno raznolika, bi se ta metoda zajema morda pokazala za primerno.



Slika 4.21: Zajem železnice po fotogrametričnem oblaku točk

4.4.2.3 Teren in vegetacija

Zajem vegetacije je vedno izzik ne glede na metodo zajema. Iz terenskih meritev detajla smo izbrali 98 točk (slika 4.22), ki smo jih nato skušali zajeti z metodo stereozajema. Pri trečji metodi zajema, kjer uporabimo ortofoto, pa dejansko skorajda nismo imeli česa zajeti, saj naklonov terena ne vidimo. Lahko

bi uporabili DMR, kjer so nakloni terena vidni, vendar dvomimo o višinski točnosti; gre namreč za del močno zaraščenega območja, kar pomeni, da je bila tu v filtriranem oblaku lunkna, ki jo je program PhotoScan zapolnil z metodo interpolacije. To naše predvidevanje lahko potrdijo višinske razlike med točkami, ki smo jih zajeli na isti lokaciji kot terenske točke ter jih dvignili na višine DMR. Nato smo zajeli še meje med različnimi kulturnimi. Pričakovali smo, da bo razlika med metodami zajema še najbolj očitna prav pri zajemu visoke vegetacije.



Slika 4.22: Detajlne točke na območju zarasti oziroma visoke vegetacije

4.4.2.4 Stavbe

Z metodo stereozajema se stavbe le izjemoma lahko zajamejo po vogalih, saj ti v večini primerov niso vidni, ker so skriti pod streho stavbe. V redkih primerih, ko so stavbe visoke in strehe ne segajo daleč od objekta, lahko zajamemo tudi vogale stavb. Lahko pa stavbo zajamemo po strehi. Zajem stavb po ortofotu pa ni primeren, vogalov stavb ne moremo zajeti, strehe pa so položajno premaknjene. Bi pa jih lahko zajeli iz popolnega ortofota.

Stavbe je možno zajeti tudi po gostem oblaku točk, kjer se lepo vidijo točke strehe (slika 4.23). Vendar tudi tu naletimo na težavo, in sicer pri določitvi roba strehe (kapi). Ugotovimo, da bi za zelo natančen zajem strel potrebovali še gostejši oblak točk.



Slika 4.23: Zajete strehe stavb v stereopogledu (levo), na ortofotu (v sredini) in na oblaku točk (desno)

4.4.2.5 Točkovni znaki

Točkovne znaKE obravnavamo kot znaKE, ki so zajeti z eno samo točko in jih podrobno opredeljuje Topografski ključ za izdelavo in prikaz vsebine geodetskih načrtov (2006). Njihov zajem na odprtih območjih ni problematičen ne glede uporabljenega metoda; je pa vprašljiv njihov zajem z metodo stereozajema in metodo ortofota v primeru senc ter pod vegetacijo. Z obravnavanimi metodami smo zajeli različne točkovne znaKE. Na območju ceste smo zajeli jaške in luč, na območju železnice pa električno omarico, luč, kretnico. Zajeli smo jih tudi po ortofotu ter nato dvignili na višine DMR. Te primerjave so vključene v analize območij cest in železnice.

Slika 4.24 prikazuje problematiko zajema posameznih dreves, ki jih z metodo stereozajema v večini primerov lahko zajamemo, saj imamo na voljo veliko stereoparov, medtem ko pri kombinirani metodi zajema po ortofotu dreves ne moremo točno locirati, ker ne vidimo njihovih debel.



Slika 4.24: Drevo v stereopogledu (levo) in na ortofotu (desno)

5 REZULTATI OBDELAVE IN PRIMERJAVA METOD

To poglavje smo razdelili na dva dela. V poglavju 5.1 predstavljamo rezultate obdelave, narejene v programu PhotoScan, to so fotogrametrični izdelki, predstavljamo tudi analizo natančnosti obdelave. Naš glavni cilj naloge je bila izdelava geodetskega načrta; grafični prikaz načrta je v prilogi E.

V poglavju 5.2 predstavljamo rezultate geometričnih primerjav uporabljenih metod.

5.1 Rezultati obdelave

Rezultati obdelave v programu PhotoScan so prikazani v naslednjih podpoglavljih in v poročilu postopka obdelav, ki ga izdela program in vanj zapiše vse parametre obdelave in določene rezultate. Poročilo je priloženo v prilogah (priloga A).

5.1.1 Fotogrametrični oblak točk

Izdelava je potekala v programu PhotoScan. Uporabili smo srednjo kakovost in agresivno globino filtriranja ter s tem dobili 60.362.597 točk v oblaku, kar je približno 157 točk/m² (slika 5.1). Večjega števila točk z našo strojno opremo (preglednica 3.4) ne bi mogli obvladovati oziroma bi imeli velike težave.



Slika 5.1: Fotogrametrični oblak točk z izbrano srednjo kakovostjo in agresivno globino filtriranja

5.1.2 DMR in DMP

DMR smo izdelali iz gostega klasificiranega oblaka točk s programom PhotoScan, ki čez točke oblaka z metodo triangulacije napne mrežo neenakih trikotnikov ter zgradi 3D-model. Tvoril je 7.949.818 ploskev (angl. faces) ter 3.979.413 točk. Model smo nato izvozili v format oblike *.XYZ in dobili DMR s celično mrežo oziroma rastrom 0,1 m.



Slika 5.2: Izdelan 3D model reliefa, (a) v pravih barvah, (b) prikaz ploskve

Na sliki 5.2a, ki prikazuje 3D-model reliefa v pravih barvah, opazimo tudi zabrisane površine. To so območja stavb in visoke vegetacije, kjer je prišlo do tako imenovanih lukenj v klasificiranem oblaku točk, kar pomeni, da tu nimamo talnih točk. Ta območja zapolnimo z metodo interpolacije, kar je opazno tudi na barvni vrednosti točk.

Program omogoča tudi izdelavo DMP, kjer upošteva celoten fotogrametrični oblak točk (slika 5.3).



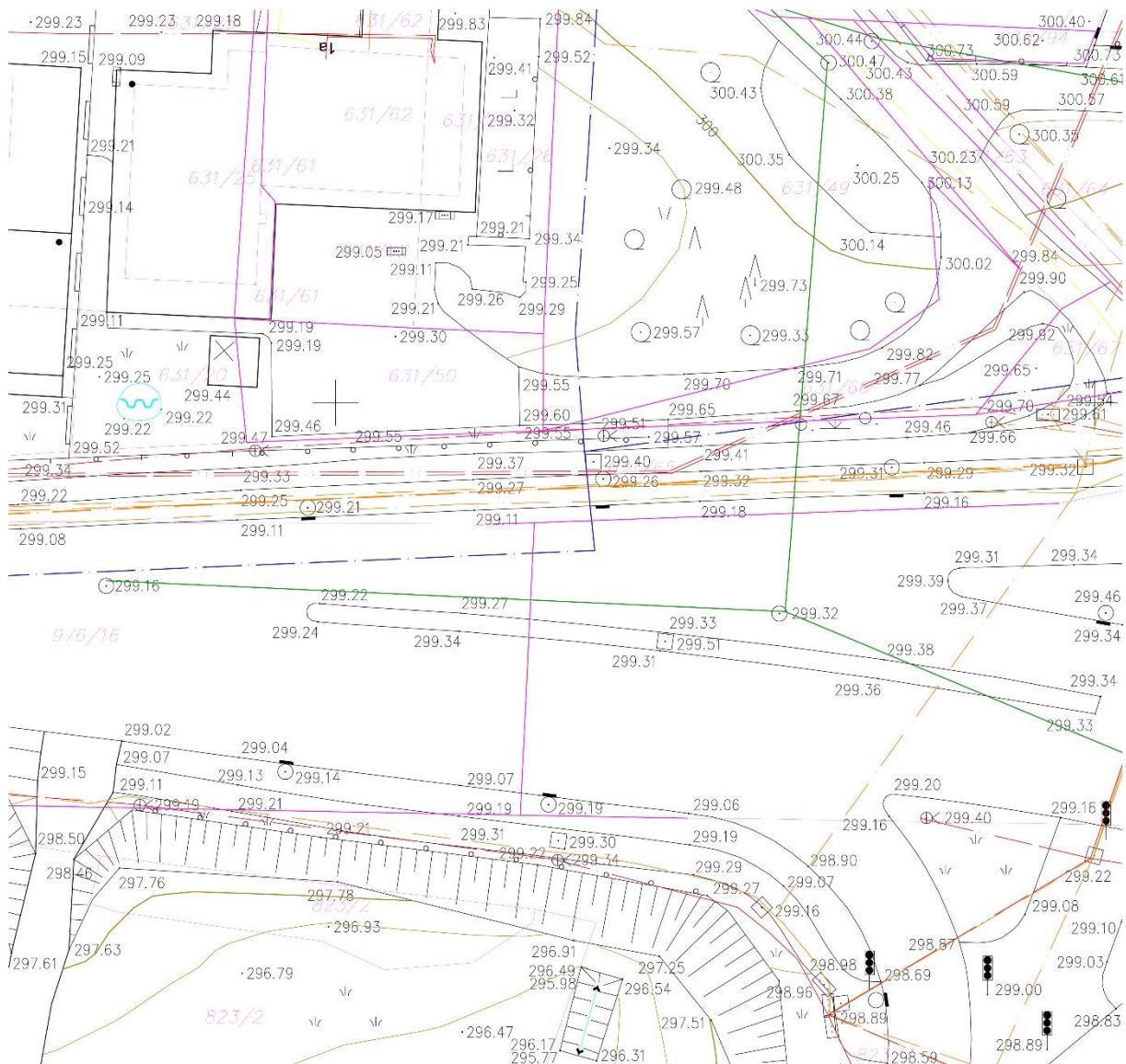
Slika 5.3: Izdelan DMP

5.1.3 Ortofoto

Izdelali smo ortofoto s prostorsko ločljivostjo 5 cm in nato za primerjavo visokih objektov še popolni ortofoto z ločljivostjo 2,2 cm. Prikaz ortofota z ločljivostjo 5 cm je prikazan v poročilu, ki ga izdela program PhotoScan (priloga A1 – naslovnica poročila).

5.1.4 Geodetski načrt, izdelan z zajemom iz stereoparov

Slika 5.4 prikazuje izrez geodetskega načrta, ki je bil izdelan s fotogrametričnim zajemom iz stereoparov, razen območja pod visoko vegetacijo, ki je bilo zajeto s terenskimi meritvami. Grafični prikaz je priložen v prilogi E, pripadajoči certifikat pa je priložen v prilogi D.



Slika 5.4: Izrez geodetskega načrta

5.2 Ocena kakovosti in natančnosti obdelave v programu PhotoScan

Analizo kakovosti določitve oslonilnih točk pripravi že sam program PhotoScan, s katerim smo obdelavo tudi izvedli. To je prva in najpomembnejša analiza v postopku obdelave, saj ocenjena natančnost oslonilnih točk po izravnavi bloka fotografij podaja natančnost vseh naslednjih postopkov obdelave in pridobivanja fotogrametričnih izdelkov. Program PhotoScan za mero pozicijske in višinske natančnosti uporablja koren srednjega kvadratnega pogreška (RMSE), ki je najbolj pogosto uporabljana mera za oceno točnosti oziroma natančnosti v mednarodnih standardih (Kosmatin Fras, 2006).

Preglednica 5.1: Natančnost določitve položaja fotoaparata in oslonilnih točk po izravnavi bloka fotografij

	RMSE _x (m)	RMSE _y (m)	RMSE _z (m)	RMSE _r (m)
Projekcijski centri	0,048862	0,037327	0,022460	0,065462
Oslonilne točke	0,028637	0,025869	0,022229	0,044536

Ker je ta ocena dobljena iz stohastičnega modela in rezultatov izravnave (ocena *a posteriori*), se nam zdi primernejša uporaba termina natančnost. Ko pa za oceno uporabimo neodvisne kontrolne točke, ocenjujemo točnost (pravilen položaj v okviru ocenjene razpršenosti).

V preglednici 5.1 je najprej prikazana natančnost določitve položaja fotoaparata, to je projekcijskega centra fotografije, ki je izredno dobra, saj skupna natančnost ne presega 7 cm, pozicijska natančnost ne presega 5 cm, vertikalna natančnost pa je manjša od 3 cm. Glede na zahteve standarda ASPRS (preglednica 2.4) natančnost določitve položaja projekcijskih centrov ne presega dovoljenega RMSE (5 cm). Natančna določitev projekcijskih centrov vpliva na izdelavo stereoparov, ki so osnovni vir za izdelavo geodetskega načrta. Druga prikazana natančnost je natančnost oslonilnih točk (markerjev), kjer vidimo, da je horizontalna natančnost boljša od 3 cm, vertikalna pa od 2,2 cm. Dobili smo celo podpikselsko skupno natančnost določitve oslonilnih točk, ki znaša 0,222 piksla (priloga A).

V literaturi je navedeno, da je treba za natančno georeferenciranje in določitev njegove kakovosti določiti kontrolne točke, s katerimi preverimo rezultate, dobljene po slikovnem ujemanju. Takšen je tudi postopek aerotriangulacije in blokovne izravnave, kjer se po končanih postopkih opravi kontrola točnosti s primerjavo položaja na kontrolnih točkah (ASPRS, 2014).

Dodatnih kontrolnih točk, kot je to v navadi, nismo posneli na terenu, kar bi bilo priporočljivo oziroma nujno. Ker smo imeli veliko število dobro razporejenih in natančno določenih oslonilnih točk, bi lahko nekaj oslonilnih točk v postopku georeferenciranja in slikovnega ujemanja izpustili in jih kasneje uporabili kot kontrolne točke.

Ker poznamo končno zahtevano pozicijsko in vertikalno točnost izdelave geodetskega načrta, lahko izračunamo, ali je dobljena natančnost oslonilnih točk, ki nam jo poda program PhotoScan, ustrezna. S tem lahko preverimo kakovost slikovnega ujemanja in izravnave bloka fotografij. Uporabili smo enačbe za ocenjevanje (poglavlje 2.4.1); opazno je, da naši rezultati, razen določitve vertikalne točnosti oslonilnih točk, ki je 2,2 cm, ne ustrezajo zahtevanim natančnostim za oslonilne točke. Zahtevano natančnost presežejo za 4 mm po x-koordinati in 1 mm po y-koordinati. Kljub majhnim odstopanjem nam rezultat pove, da je bilo slikovno ujemanje dobro narejeno ter sta bila razporeditev in število oslonilnih točk dobro načrtovana.

5.3 Ocena kakovosti in položajne točnosti fotogrametričnih izdelkov

Naš končni izdelek, ki je bil narejen pri Geodetski družbi d. o. o., je geodetski načrt merila 1 : 500. V večini je izdelan z metodo stereozajema, zato je primerno, da skušamo oceniti njegovo kakovost in položajno točnost. Za določitev njegove točnosti smo zopet izhajali iz standardov za prostorske podatke ameriškega združenja ASPRS, ki za mero horizontalne in vertikalne točnosti navaja RMSE.

Standard ASPRS (2014) med drugim navaja, da lahko za testiranje točnosti primerjamo vrednosti koordinat kontrolnih točk, prebranih s podob (izdelkov), pri čemer lahko uporabimo metodo stereozajema ali kombinirano metodo (ortofoto in DMR); to primerjamo z metodo, ki omogoča določitev vrednosti koordinat kontrolnih točk z višjo natančnostjo, kar so večinoma terenske meritve.

Opravljena je bila klasična terenska izmera detajla (poglavje 3.3.3); določene detajlne točke terenske izmere smo uporabili kot kontrolne točke, ki smo jih nato izmerili še z metodo stereozajema ter s tem pridobili točnost geodetskega načrta; z metodo kombiniranega zajema pa smo pridobili točnost ortofota in DMR. Tudi v tem primeru se naslanjam na predpostavko, da so bile točke detajla posnete z višjo natančnostjo, kot jo omogočata obe testirani metodi.

Kot kontrolne točke smo uporabili karakteristične točke; te točke so večinoma jaški, značilne točke na cestišču, dve točki na mostu; skupaj je bilo točk 24. Za izračun RMSE smo uporabili enačbe po NSSDA (poglavje 2.4.2).

5.3.1 Položajna točnost geodetskega načrta

Rezultate testiranja kontrolnih točk, zajetih z metodo stereozajema, ki morajo ustreznati horizontalni in vertikalni točnosti ± 10 cm, prikazuje preglednica 5.2, medtem ko je celotna preglednica opazovanih točk in izračun statističnih mer priložena v prilogi B.

Preglednica 5.2: Ocena položajne točnosti na kontrolnih točkah, zajetih z metodo stereozajema

Statistične mere	X (m)	Y (m)	Z (m)
Srednja vrednost opazovanj (m)	0,002	-0,009	0,018
Standardni odklon (m)	0,033	0,032	0,024
RMSE (m)	0,032	0,031	0,025
Število točk	24		
RMSEr (m)	0,044		
Horizontalna natančnost pri 95-odstotni stopnji zaupanja	0,077		
Vertikalna natančnost pri 95-odstotni stopnji zaupanja	0,049		

Rezultati kažejo (preglednica 5.2), da so vrednosti RMSE po vseh koordinatah okoli 3 cm, kar so zelo dobitni rezultati. Tudi horizontalna natančnost pri 95-odstotni stopnji zaupanja ne presega 8 cm, medtem ko je vertikalna natančnost pri 95-odstotni stopnji zaupanja še boljša in znaša 5 cm.

Rezultati potrjujejo naša predvidevanja, da stereozajem omogoča zajem prostorskih podatkov visoke točnosti, hkrati pa potrjujejo dejstvo, da je z brezpilotnimi zrakoplovi, ustrezeno kalibriranim nemerskim fotoaparatom ter ustreznim številom natančno določenih oslonilnih točk mogoče pridobiti visoko natančnost, ki je potrebna za visoko natančne fotogrametrične izdelke.

5.3.2 Položajna točnost ortofota in DMR

Statistične mere, ki smo jih uporabili za testiranje metode stereozajema, lahko uporabimo tudi za testiranje izdelanega ortofota, le da tokrat kontrolne točke zajamemo po ortofotu ter testiramo le položajno točnost. V diplomski nalogi smo izdelali in uporabljali ortofoto ločljivosti 5 cm, zato bomo tudi testirali njegovo položajno točnost. Standard ASPRS podaja za ortofoto ločljivosti 5 cm priporočljive natančnosti $RMSE_x$ in $RMSE_y$ glede na priporočeno uporabo. Če gre za standardno kartiranje, je priporočen $RMSE_x$ in $RMSE_y$ 10 cm, če pa gre za zelo natančno uporabo, potem je priporočena vrednost $RMSE_x$ in $RMSE_y \leq 5$ cm.

Točnost DMR testiramo le za višinsko točnost, pri čemer uporabimo točke, zajete po ortofotu, ter jih dvignemo na ploskev DMR.

Preglednica 5.3: Ocena položajne točnosti na kontrolnih točkah, zajetih s kombinirano metodo

Statistične mere	X (m)	Y (m)	Z (m)
Srednja vrednost opazovanj (m)	-0,011	0,032	-0,028
Standardni odklon (m)	0,036	0,059	0,089
RMSE (m)	0,037	0,051	0,090
Število točk		24	
RMSE _r (m)		0,062	
Horizontalna natančnost pri 95-odstotni stopnji zaupanja		0,108	
Vertikalna natančnost pri 95-odstotni stopnji zaupanja		0,176	

Menim, da so rezultati (preglednica 5.3) dobri, saj ortofoto glede na standarde spada v razred visoke natančnosti. Tudi točnost DMR glede na izračunani $RMSE_z$ je dobra, saj je $RMSE_z$ manjši od 10 cm. Če v izračun RMSE ne bi vzeli točk na mostu, kjer so višinska odstopanja največja (tudi do 0,5 m), bi bila vrednost $RMSE_z$ manjša in bi znašala okoli 5cm. To je vrednost, ki smo jo tudi pričakovali.

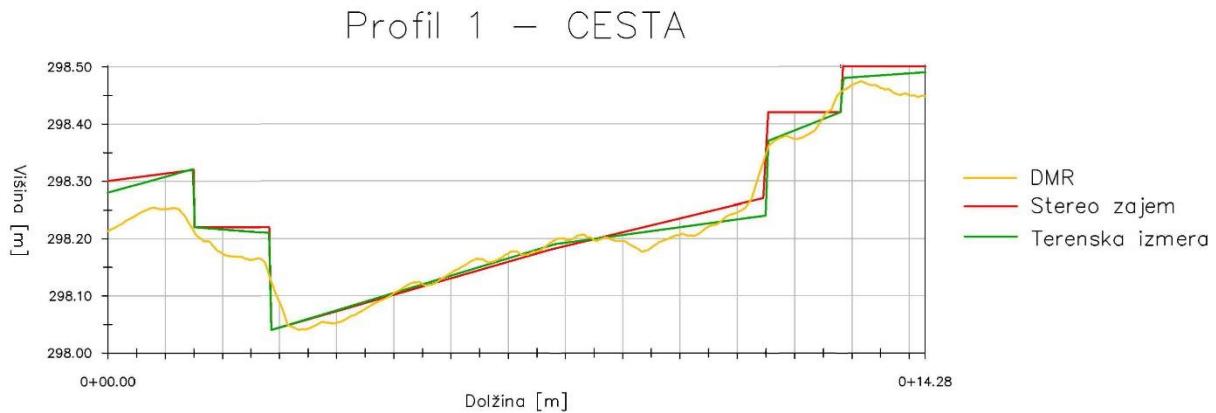
5.4 Rezultati geometričnih primerjav

V tem poglavju pa izpostavljamo medsebojno primerjavo položajnih in višinskih razlik izbranih vsebin (cesta, železnica, itn.) treh testnih območij. S tem smo skušali določiti uporabnost treh metod zajema:

- stereozajema,
- kombinacije zajema iz ortofota in DMR,
- klasične terenske izmere (referenčna izmera).

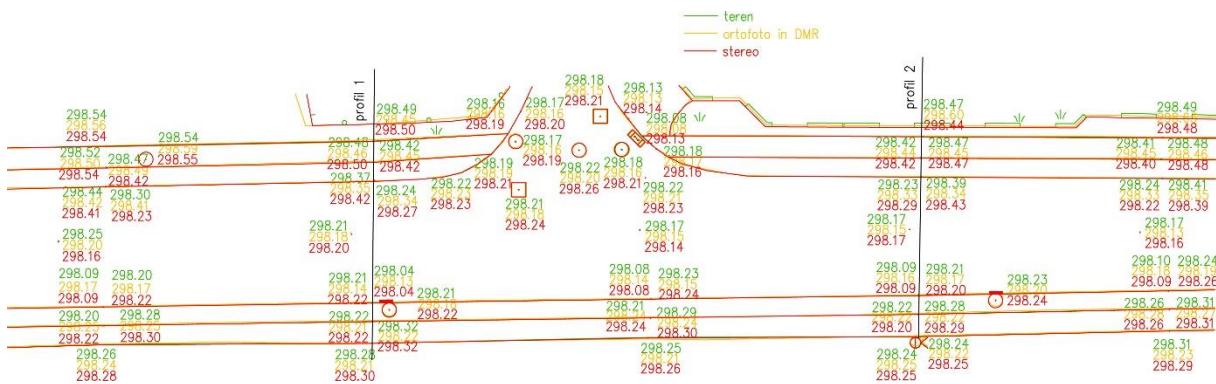
5.4.1 Cesta

Prikaz profila na sliki 5.5 pokaže pričakovani rezultat, DMR, izdelan iz oblaka točk, in tudi sam oblak točk ne moreta prikazovati hitrih višinskih skokov, kar je pri izdelavi geodetskega načrta velika slabost. Opazimo tudi, da je ploskev DMR skoraj povsod najnižja, po cestišču poteka zelo neenakomerno, čeprav je cesta ravna. Prečni profil pokaže, da so višinske razlike zelo majhne, vendar bi bila metoda zajema po ortofotu in oblaku točk neprimerna zaradi nezmožnosti zajema točk pod robniki. To kaže tudi slika 5.6, ki prikazuje razlike med metodami; opazno je, da so položajna odstopanja majhna; to potrjuje tudi histogram na sliki 5.7.



Slika 5.5: Prvi prečni profil

Za cesto smo izdelali dva profila, da smo ugotovili medsebojni odnos ploskev, saj nas je zanimalo, ali bo DMR vedno najnižja ploskev glede na drugi dve. Drugi profil je priložen v prilogi C.

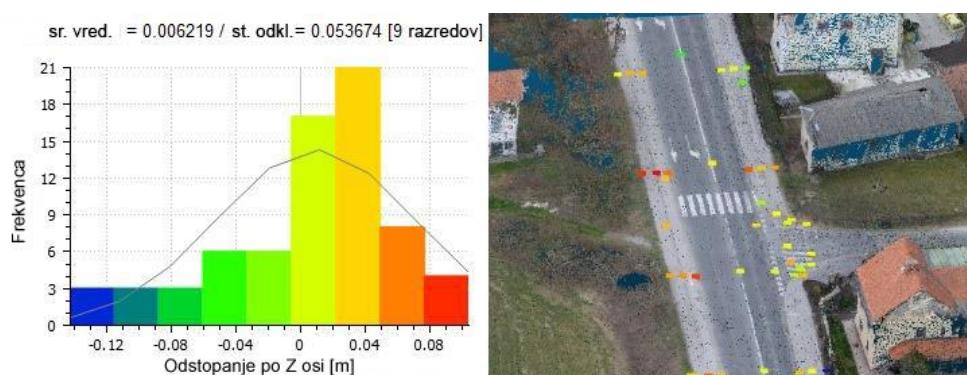


Slika 5.6: Grafični prikaz primerjave treh metod na primeru ceste

S programom CloudCompare smo medsebojno primerjali vse tri vzorce točk, zajete z različnimi metodami. Rezultate primerjav prikazujeta slike 5.7 in 5.8. Prva slika prikazuje histogram odstopanja višinskih razlik med referenčnimi točkami terena in stereozajemom (levo) ter lokacije točk (desno). Opazimo, da so odstopanja zelo majhna. Več kot 36 točk ima enako višino kot stereozajem, največje odstopanje točk pa znaša 4,5 cm. Na podobnost rezultatov, pridobljenih s tremi metodami, kaže tudi izračunana srednja vrednost, ki naj bi bila čim bližje ničli.



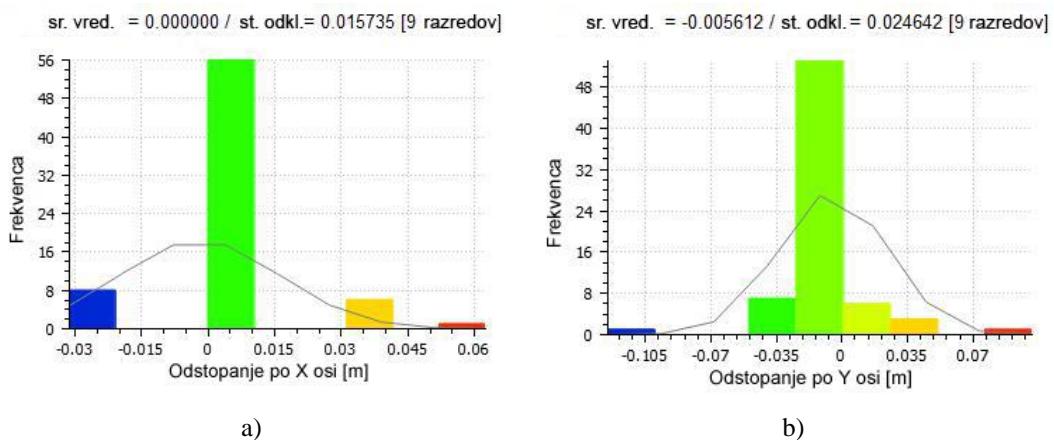
Slika 5.7: Histogram višinskih razlik med terenskimi točkami in stereozajemom (levo) in lokacije točk (desno)



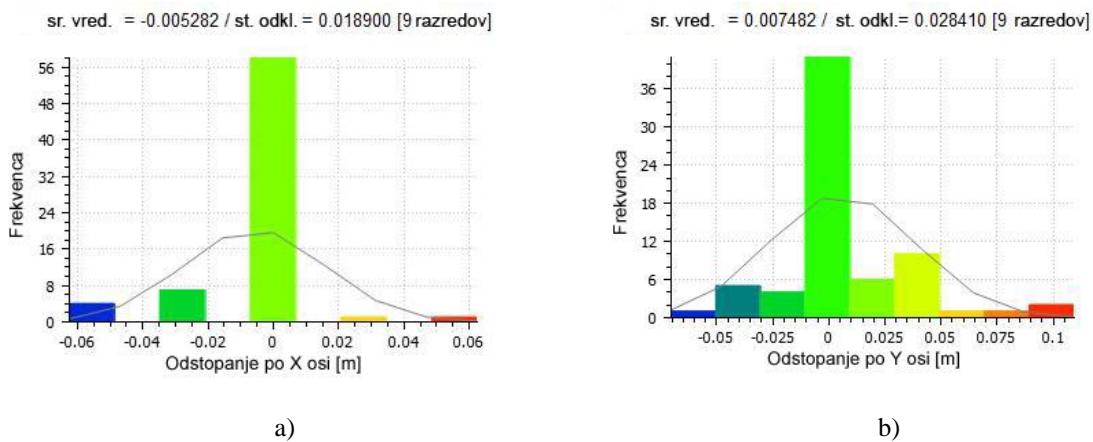
Slika 5.8: Histogram višinskih razlik med terenskimi točkami in DMR (levo) in lokacije točk (desno)

Slika 5.8 prikazuje višinske razlike med referenčnimi terenskimi točkami in točkami, ki so bile dvignjene na DMR. Vidimo, da so v tem primeru višinska odstopanja večja kot pri metodi stereozajema. Največje odstopanje je kar 13 cm in se pojavi pri treh točkah. To so točke na robu pločnika, kjer je bila nizka vegetacija (bršljan), ki je v postopku klasifikacije točk nismo odstranili; to bi bilo težavno tudi, če bi oblak ročno klasificirali, saj so te točke skorajda na višini terena. Velika višinska odstopanja se pojavijo tudi pri vseh robnikih, kar nazorno prikazujejo rdeče in oranžno obarvane točke, ki znašajo do 9 cm.

Horizontalna odstopanja so poleg vizualne primerjave na načrtu (slika 5.6) prikazana na histogramih na slikah 5.9 in 5.10, in sicer ločeno po koordinatah x in y. Pri histogramu b) na sliki 5.9 imamo večje odstopanje. Pri pregledu smo ugotovili, da je to odstopanje točk, posnetih na sredini cestišča. Ker je promet potekal nemoteno, pripisujemo to napako slabemu pozicioniranju trasirke na terenu, kar pomeni grobi pogrešek. Pri pregledu histogramov na sliki 5.10 tudi najdemo večja odstopanja po koordinati y. Rdeči točki predstavljata slabo locirano luč in jašek.



Slika 5.9: Histograma horizontalnih odstopanj med terensko izmero in stereozajemom na območju ceste



Slika 5.10: Histograma horizontalnih odstopanj med terensko izmero in ortofotom na območju ceste

Glede na rezultate lahko za ceste zaključimo, da stereozajem daje podobne rezultate kot terenska izmera. Kombinirana metoda zajema ne dosega zadostne višinske točnosti, ima pa zelo majhna horizontalna odstopanja, kar pomeni, da smo ortofoto dobro georeferencirali.

5.4.2 Železnica

Slika 5.11 prikazuje prvi prečni profil železnice (drugi je priložen v prilogi C). Pri začetni stacionaži opazimo, da je DMR veliko nižji od ostalih dveh ploskev. Prvi profil je namreč profil na mostu, most pa v stereo pogledu lahko zajamemo po robnih točkah, tako so odstopanja v primerjavi s terensko izmero majhna (slika 5.12), medtem ko DMR ni tako natančen, saj so robne točke mostu veliko nižje, kar prikazuje tudi histogram na sliki 5.14. Na tej sliki opazimo, da se terenske točke in točke kombinirane metode zelo lepo ujemajo z minimalnimi višinskimi odstopanjimi po celotni trasi železnice razen pri točkah na mostu.



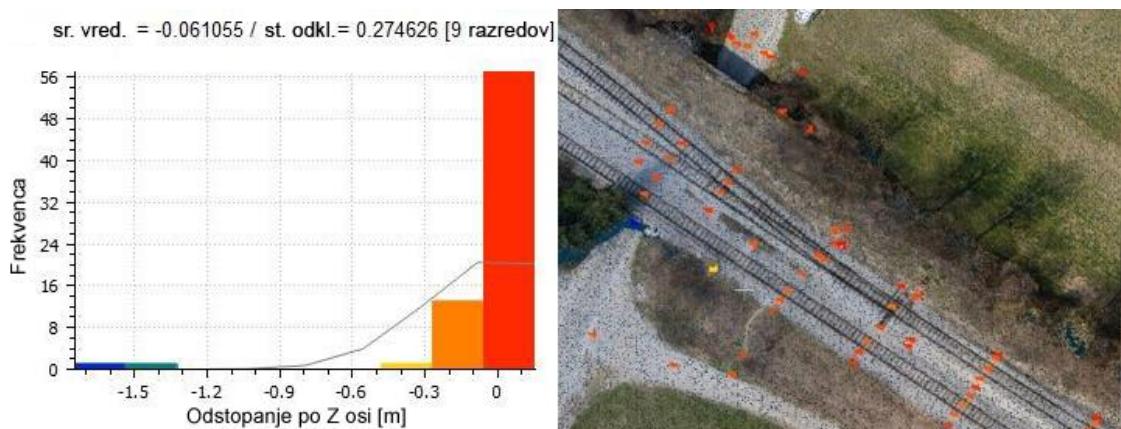
Slika 5.11: Prvi prečni profil železnice



Slika 5.12: Grafični prikaz odstopanj med metodami na primeru železnice



Slika 5.13: Histogram odstopanj med terenskimi točkami in stereozajemom (levo) in lokacije točk (desno) na območju železnice

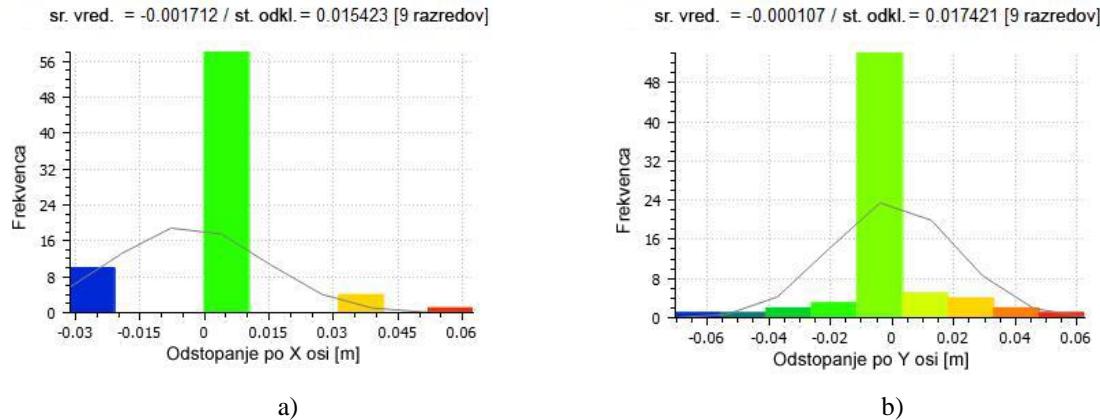


Slika 5.14: Histogram odstopanj med terenskimi točkami in DMR (levo) in lokacije točk (desno) na območju železnice

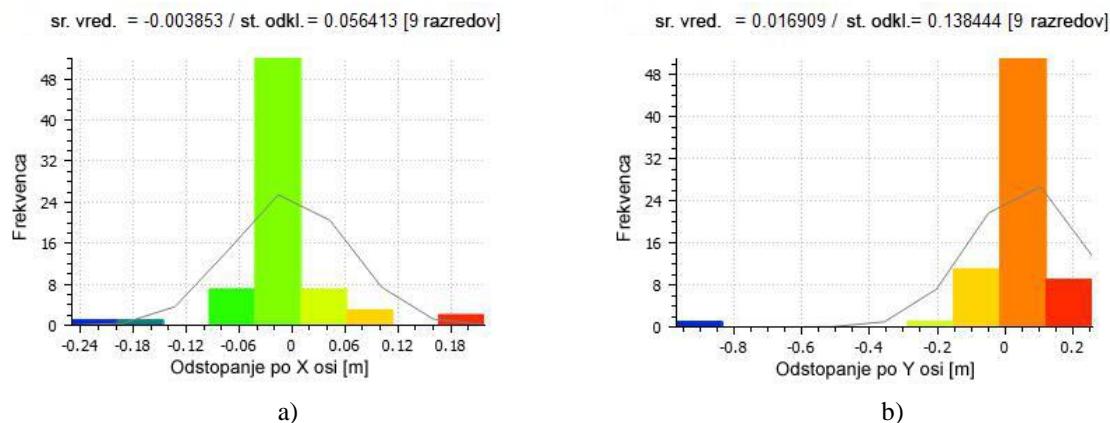
Presenetilo nas je, da skorajda ni višinskih razlik med terensko izmero in DMR, kar pomeni, da bi bil zajem železnice lahko zajet s kombinirano metodo, pazljivi bi morali biti le pri objektih železnice, ki potekajo pod železnico ali nad njo.

V primerjavi poteka ploskve DMR med cesto in železnico opazimo velik vpliv tekture terena na odboj svetlobnih žarkov. Značilno je, da so odboji slabi na homogenih površinah, kot je asfalt, in veliko boljši na pesku, kar kažejo tudi rezultati primerjav.

Položajna odstopanja smo prikazali na skupnem načrtu vseh metod (slika 5.12) in histogramih za koordinati x in y (slika 5.15), ki prikazuje odstopanja med terensko izmero in stereozajemom, in sliki 5.16, ki prikazuje odstopanja med terensko izmero in ortofotom. Odstopanja so pričakovano zelo majhna. Večja odstopanja so opazna pri metodi zajema po ortofotu po x-osi, vendar smo ugotovili, da so to točke terena, ki veliko odstopajo zaradi fotointerpretacije in ne zaradi napake ortofota.



Slika 5.15: Histograma odstopanj med terensko izmero in stereozajemom na območju železnice

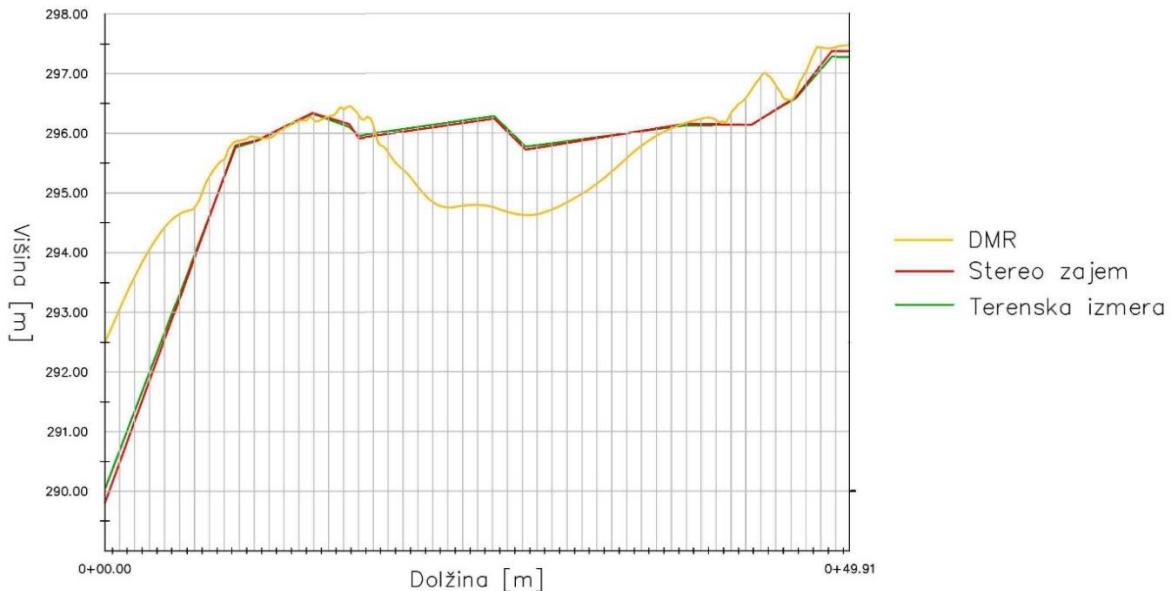


Slika 5.16: Histograma odstopanj med terensko izmero in ortofotom na območju železnice

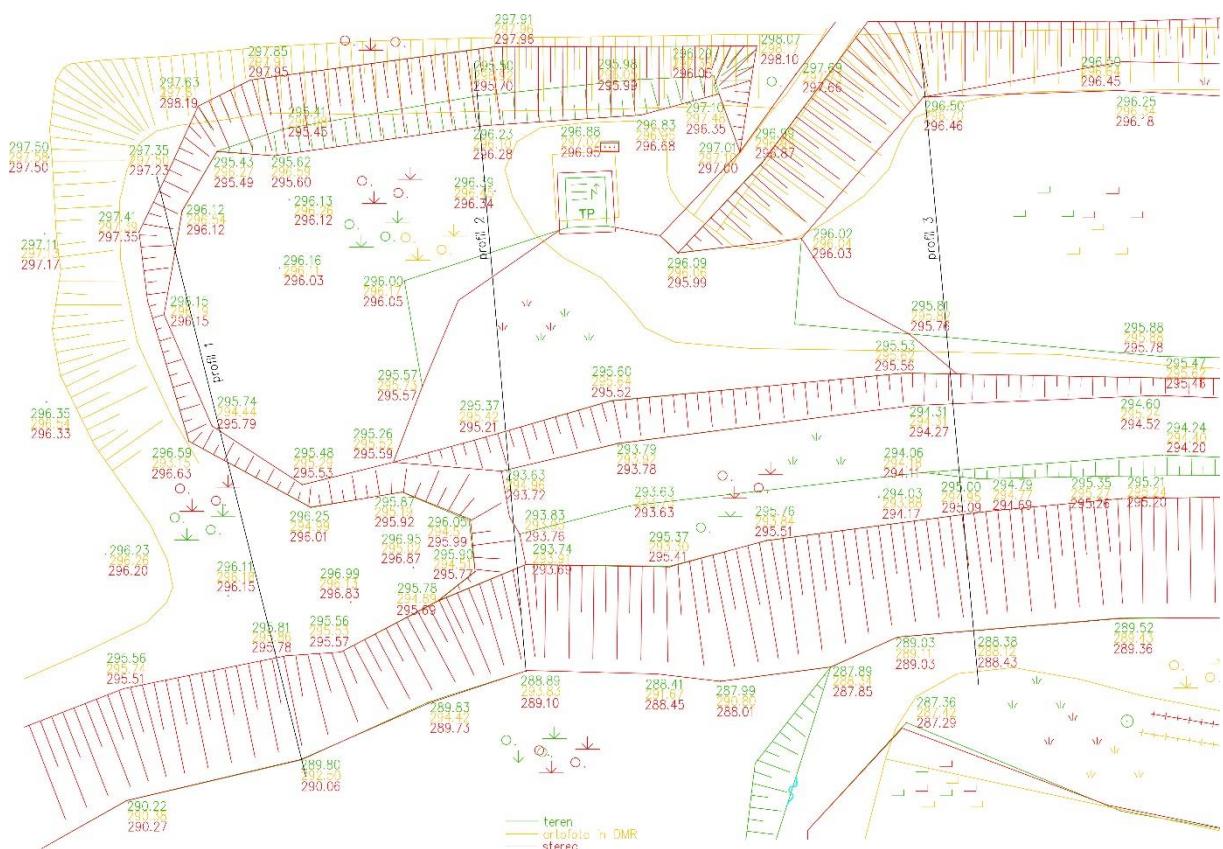
5.4.3 Vegetacija

Na območju visoke vegetacije je vzorec obsegal 98 točk. Slika 5.18 prikazuje razlike med zajemom treh metod. Metoda zajema vegetacije po ortofotu ni uporabna (rumena barva), saj so vse, kar lahko zajamemo, le meje med kulturami, ki jih težko določimo zaradi krošenj dreves. Zajeta je stavba, ki je napačno pozicionirana, ter teren, ki smo ga interpretirali glede na barvo trave in senc, pa je očitno tudi ta napačno pozicioniran.

Profil 1 – Zarast

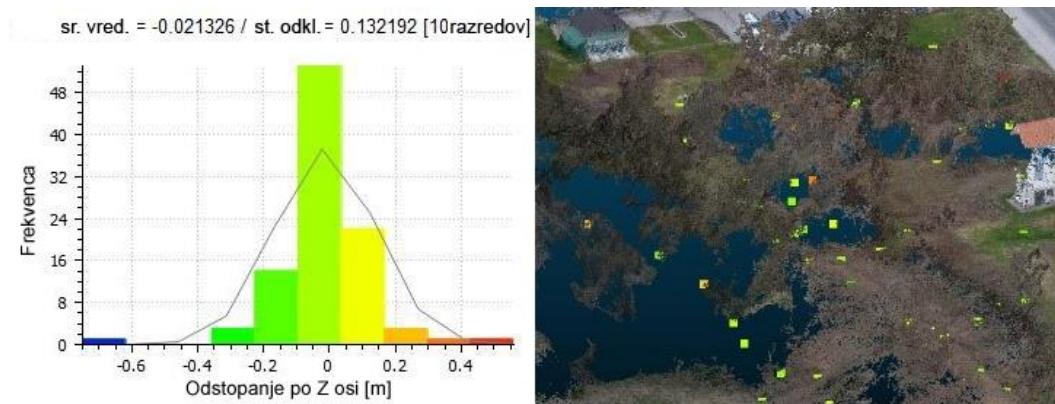


Slika 5.17: Prvi prečni profil na zaraščenem območju

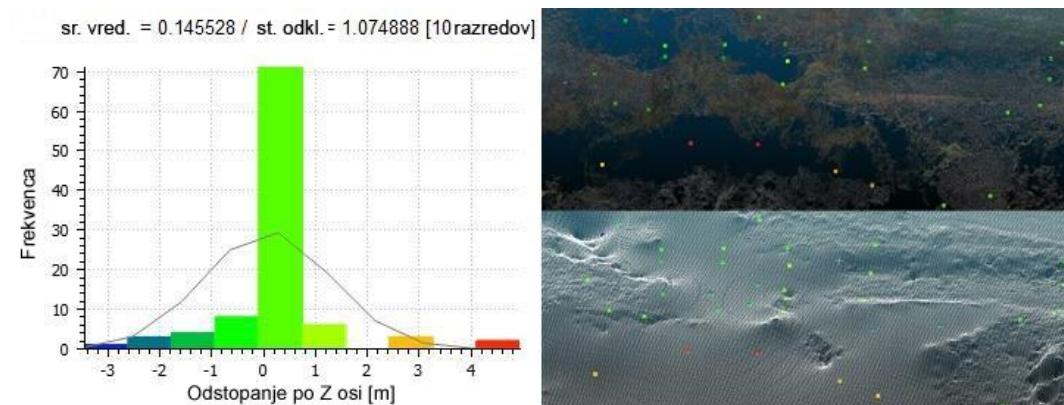


Slika 5.18: Grafični prikaz odstopanj med metodami na primeru goste in visoke vegetacije

Že slika 5.17 prvega prečnega profila nakazuje na velika višinska odstopanja med terensko izmero in DMR. To potrjuje tudi histogram (slika 5.20), kjer so višinska odstopanja velika po več metrov. Lokacijo točk z velikimi odstopanjami prikazuje slika 5.20 (desno), kjer vidimo, da v oblaku točk nismo imeli talnih točk. DMR je izdelan z interpolacijo, ki pa ni najboljša, ker gre za zelo razgiban teren ter relativno veliko luknjo v oblaku točk. Tudi stereozajem na območju visoke vegetacije ne ustreza zahtevani natančnosti kar prikazujeta tudi histogram ter izračunan standardni odklon (slika 5.19). Pri izdelavi geodetskega načrta smo se odločili, da to območje posnamemo s terensko izmero, kar je bila glede na prikazane rezultate dobra odločitev.



Slika 5.19: Histogram odstopanj med terenskimi točkami in stereozajemom (levo) in lokacije točk (desno) na območju visoke vegetacije



Slika 5.20: Histogram odstopanj med terenskimi točkami in DMR (levo) in lokacije točk (desno) na območju visoke vegetacije

5.5 Analiza uporabnosti testiranih metod

Za določitev uporabnosti metod naredimo poleg že ocenjenih natančnosti metod ter geometričnih primerjav še časovno oceno med metodama stereozajema in terenske izmere. Kombinirano metodo ortofota in DMR tu izpustimo, ker menimo, da kot samostojna metoda ni dovolj natančna za izdelavo geodetskega načrta velikih meril. Časovno oceno, to je čas izdelave geodetskega načrta od načrtovanja do končne oddaje, prikazuje preglednica 5.4. Končni izračun ur potrebnega dela je v prid stereozajemu, ki se je izkazal kot bistveno hitrejši.

Preglednica 5.4: Časovna ocena izdelave geodetskega načrta (19 ha)

Metoda	Stereozajem		Terenska izmera	
	število oseb	ure	število oseb	ure
Načrtovanje	1	2	1	1
Terensko delo:				
- snemanje oslonilnih točk in snemanje z zrakoplovom	2	16	/	/
- celotna terenska izmera	/	/	3	72
- domeritve in pregled na terenu že zajetega načrta	3	16	/	/
Obdelava podatkov	1	12	1	1
Stereozajem	1	56	/	/
Izdelava načrta	1	10	1	40
Število skupnih ur (zmnožek oseb in ur)	160		258	

Ugotovili smo, da je stereozajem dovolj natančna, točna ter tudi hitra metoda zajema prostorskih podatkov visoke natančnosti, kar jo uvršča na vrh lestvice uporabnosti. Njena slabost so zaraščena območja, kjer pa si lahko pomagamo z lidarskimi podatki ali izdelanimi klasificiranimi oblakom točk ali DMR – ob predpogoju, da zaraščena območja niso velika in posledično luknje v oblaku tudi niso velike, kar pomeni, da je v takšnih primerih tudi izdelava DMR na teh območjih bolj natančna.

Kombinirana metoda ortofota in DMR ima omejeno uporabnost, ker je uporabna le na odprtih območjih, kjer lahko prostorske objekte identificiramo z ortofota. Kot 2D-metoda tudi zagotavlja ustrezne natančnosti, ki pa so v prvi vrsti ovisne od prostorske ločljivosti ortofota. Kot 3D-metoda, kjer za pridobitev višin uporabimo DMR ali klasificiran oblak točk, pa je treba predvsem upoštevati razgibanost, poraščenost in poseljenost terena.

Na koncu smo izdelali še SWOT analizo, ki prikazuje prednosti, slabosti, priložnosti in nevarnosti vsake izmed metod (preglednica 5.5).

Preglednica 5.5: SWOT analiza testiranih metod za zajem podatkov visoke natančnosti

Uporabnost metod	Stereozajem	Zajem na podlagi ortofota in DMR	Terenska izmera
Prednosti	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hitra metoda zajema, omogoča zajem vektorskih podatkov v relativno kratkem času ▪ omogoča natančnosti ± 10 cm po vseh treh koordinatnih oseh ▪ delo v pisarni, neodvisnost od vremena 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ na odprtih območjih lahko zelo učinkovita metoda 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ znani ustaljeni postopki izmere in obdelave podatkov
Slabosti	<ul style="list-style-type: none"> ▪ velik vpliv operaterja (učinkovitost, znanje, hitrost) ▪ velika množica stereoparov, pogosto menjanje in izbira pravega stereopara 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ v zaraščenih delih neuporaben 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ izmera večjih območij je dolgotrajna in počasna ▪ meritve odvisne od vremenskih razmer
Priložnosti	<ul style="list-style-type: none"> ▪ v kombinaciji z lidarskimi podatki je najhitrejša in najučinkovitejša metoda zajema podatkov 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ komplementarna metoda drugim osnovnim metodam zajema ▪ izdelava popolnega ortofota omogoča zajem stavb po strehah 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ GNSS metode zagotavljajo vedno višje natančnosti in so hitre metode zajema na odpretem terenu
Nevarnosti	<ul style="list-style-type: none"> ▪ avtomatika obdelave fotografij sproža vprašanja o kakovosti obdelav, če ne poznamo ozadja postopkov obdelave 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ neupoštevanje, da je ortofoto sekundarni vir podatkov ter njegove časovne izdelave 	

6 RAZPRAVA

V diplomski nalogi smo z različnimi analizami preverili, ali so stereopari bližnjeslikovnih aerofotografij, posnetih z brezpilotnim zrakoplovom, primerni za zajem prostorskih objektov, ki tvorijo vsebino geodetskih načrtov velikih meril 1 : 500. Primerjali smo tri različne metode zajema podatkov, pri čemer smo se osredotočili na testirano metodo, in sicer stereozajem, saj ta kot vir zajema podatkov uporablja primarni vir, to je aerofotografija. Druga metoda kot vir zajema uporablja sekundarne vire, ki smo jih izdelali na podlagi primarnega vira, to sta DMR in ortofoto. Tretja metoda, uporabljena za primerjavo in oceno natančnosti zgornjih dveh, ki je hkrati tudi referenčna, pa je klasična terenska izmera.

Pričakovali smo, da se bo metoda stereozajema izkazala za najboljšo glede na velikost obravnavanega območja (19 ha), kar se je tudi uresničilo. V primerjavi s klasično terensko izmero so bile razlike v višinskem in položajnem smislu izredno majhne, višinske razlike do 5 cm ter položajne do 5 cm. Analiza natančnosti je pokazala, da metoda ustrezza potrebnim standardom za zajem visoko natančnih prostorskih podatkov. Tehnico na stran stereozajema je prevesil tudi izračun ur dela, potrebnega za prvo in drugo metodo, kjer se je izkazalo, da je metoda stereozajema občutno hitrejša ter tudi cenejša. Rezultati analize točnosti izdelanega geodetskega načrta po ameriškem standardu ASPRS, kjer se kot statistična mera uporablja RMSE, so izredno dobri, saj RMSE v horizontalni smeri x in y ne preseže 3,2 cm, v vertikalni smeri pa je njegova vrednost pod 3 cm, kar kaže na kvalitetno izdelan geodetski načrt.

Bili pa smo presenečeni nad kakovostjo kombinirane metode, kjer zajamemo (prostorske) objekte po ortofotu ter nato vse zajete vektorske podatke dvignemo na višino izdelanega DMR ali klasificiranega oblaka točk. Poudariti je treba, da je ta metoda povsem odvisna od izdelanega ortofota, njegove prostorske ločljivosti ter gostote izdelanega oblaka točk, ki je vhodni podatek za izdelavo 3D-modela. Predvsem se je pokazala za uporabno na odprtih območjih brez bujne vegetacije, kot so železnica in travniki, medtem ko za zaraščena območja (nizka ali visoka vegetacija) ni primerna. Vprašljiva je tudi primernost na gosto poseljenih območjih, kjer stavb ni možno zajemati ne po vogalih in ne po strehah, razen če izdelamo popolni ortofoto. Vsekakor je vektorski zajem podatkov najhitrejši po ortofotu, vendar je vsebino veliko bolje zajemati iz stereoparov, ki omogočajo boljšo interpretabilnost vsebine. Dosežemo pa tudi boljšo geometrično natančnost ter hkrati zajem treh koordinat.

Možna metoda zajema prostorskih podatkov je tudi zajem po gosteni oblaku točk. Preizkusili smo jo pri zajemu streh in zajemu železnice, vendar kot samostojna metoda zajema vektorskih podatkov ni primerna. Prvi problem je ogromno število točk, katerih obdelava in prikaz je procesno zelo zahtevna, drugi problem pa se pojavlja pri zajemu detajlov, ki barvno niso dovolj različni od okolice (npr. jaški), zajem dreves ni mogoč, ker se ne vidi debel (podobno kot pri ortofotu), pri zajemu streh se pojavljajo problemi pri zajemu kapi. Bi bila pa ta metoda zajema primerna kot komplementarna metoda kaki drugi metodi ali kot metoda zajema samo določenih prostorskih podatkov.

Naše ugotovitve se skladajo s pričakovanji, in sicer, da je terenska izmera še vedno nenadomestljiva. Potrebujemo jo za določitev oslonilnih in kontrolnih točk ter tudi kasneje za izmero določenih detajlov, ki se jih ne da fotointerpretirati. Vendar pa je na velikih območjih, kakršno je bilo predstavljeno, zamudna in nepraktična. Tu pride do izraza stereozajem, ki je v kombinaciji s klasificiranim oblakom točk (tla) ali DMR izredno učinkovit in je njegova uporabnost velika.

Poudariti pa je treba, da predvsem programska oprema, s katero smo obdelali aerofotografije ter izdelali fotogrametrični oblak točk, ga klasificirali ter izdelali ortofoto, ne podaja nikakršnih informacij o uporabljenih algoritmih, kar pomeni, da lahko o njih le sklepamo. To je tudi največja slabost te metode.

Stereozajem je metoda, ki močno sloni na fotointerpretaciji operaterja. Zato so izkušnje operaterja izjemno pomembne, posebno pri načrtih velikih meril, kjer sta zahtevani visoka natančnost in točnost zajema podatkov. Izkušnje operaterja pomenijo tudi hitrejši in učinkovitejši zajem.

Zaključimo lahko, da je stereozajem hitra in cenejša metoda od klasične terenske izmere. Posnete bližnjeslikovne aerofotografije poleg stereoparov omogočajo izdelavo še veliko drugih fotogrametričnih izdelkov (oblak točk, DMR/DMP, ortofoto), ki so narejeni hitro in učinkovito, kar nam omogoča današnja avtomatizacija postopkov obdelave aerofotografij. Ti izdelki, ki nastanejo v postopku obdelave, imajo tako dodano uporabno vrednost, ki je klasična geodetska izmera ne prinaša.

Stereozajem smo opravili v programu STEZA, ki je fotogrametrični program slovenske izdelave, je enostaven za uporabo in ima vgrajene vse potrebne funkcije za hiter zajem vektorskih podatkov. Poleg tega pa omogoča kombiniran zajem podatkov iz stereoparov in laserskih podatkov. Zadnje lahko nadomestimo z oblakom točk ali digitalnim modelom reliefa. Tak kombiniran zajem podatkov je še hitrejši in posledično tudi cenejši od stereozajema ter je trenutno najboljša metoda zajema prostorskih podatkov, vsaj dokler tudi zajem visoko natančnih vektorskih podatkov ne bo postal popolnoma avtomatiziran in operaterji na digitalnih fotogrametričnih postajah ne bodo več potrebni.

VIRI

Agisoft. 2016

<http://www.agisoft.com> (Pridobljeno 6. 7. 2016.)

Aibotix. 2016.

<https://www.aibotix.com/en/technical-data-aibot-x6.html> (Pridobljeno 6. 7. 2016.)

ASPRS. 2014. ASPRS Positional accuracy standards for digital geospatial data. Edition 1, Version 1.0.
http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/Positional_Accuracy_Standards.pdf (Pridobljeno 25. 7. 2016.)

Barry, P., Coakley, R. 2014. Accuracy of UAV photogrammetry compared with network RTK GPS.
Ireland. Baseline Surveys Ltd.

http://www.c-astral.com/media/uploads/file/Bramor%20Accuracy%20compare_RTK_GPS.pdf
(Pridobljeno 10. 7. 2016.)

Bay, H., Tuyuelaars, T., Van Gool., L. 2006. SURF: Speeded Up Robust Features. European Conference on Computer Vision, Austria 2006.

<http://www.vision.ee.ethz.ch/~surf/eccv06.pdf> (Pridobljeno 12. 7. 2016.)

Bhandari, B. 2015. Generation of High Resolution DSM Using UAV Images. FIG Working Week 2015: From the wisdom of the ages to the challenges of the modern world, Sofia, Bulgaria, May 17-22.

http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2015/papers/ts08c/TS08C_bhandari_oli_et_al_7439.pdf (Pridobljeno 22. 7. 2016.)

CloudCompare. 2015. CloudCompare User Manual (Version 2.6.1).

<http://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>
(Pridobljeno 7. 6. 2016.)

Colomina, I., Molina, P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92: 79–97.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271614000501> (Pridobljeno 6. 7. 2016.)

Dall'Asta, E., Roncella, R. 2014. A comparison of semiglobal and local dense matching algorithms for surface reconstruction. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5: 187-194.

<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5/187/2014/isprarchives-XL-5-187-2014.pdf> (Pridobljeno 20. 7. 2016.)

Devriendt, L., Bonne, J. 2014. UAS mapping as an alternative for land surveying techniques ?. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-3/W1: 39-45.

<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-3-W1/39/2014/isprarchives-XL-3-W1-39-2014.pdf> (Pridobljeno 10. 7. 2016.)

Dorffner, L. 2000. Interaktivna vizualizacija modelov reliefa in ortofota. Geodetski vestnik. 44, 3: 196-204.

<http://www.geodetski-vestnik.com/44/gv44-3.pdf> (Pridobljeno 10. 7. 2016.)

eVode, 2016. Navodila za prenos podatkov LIDAR, 2016.

<http://evode.arsos.si/indexd697.html?q=node/32> (Pridobljeno 7. 6. 2016.)

Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS). 2012. Državni ortofoto, list E2425, časovna serija 2012.

Geodetska uprava Republike Slovenije. 2006. Topografski ključ za izdelavo in prikaz vsebine geodetskih načrtov.

http://www.gu.gov.si/fileadmin/gu.gov.si/pageuploads/Veljavni_predpisi/geodetski_nacrt/topo_kljucn.pdf (Pridobljeno 5. 5. 2016.)

Geoservis: Aibotix Aibot X6 v2. 2016.

<http://www.geoservis.si/produkti/89-zajem-iz-zraka/282-aibotix-aibot-x6-v2> (Pridobljeno 6. 7. 2016.)

Haala, N., Rothermel, M. 2012. Dense multiple stereo matching of highly overlapping UAV imagery. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIX-B1: 387-392.

<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIX-B1/387/2012/isprsarchives-XXXIX-B1-387-2012.pdf> (Pridobljeno 20. 7. 2016.)

Kosmatin Fras, M. 2004. Vpliv kakovosti vhodih podatkov na kakovost ortofota. Geodetski vestnik. 48, 2: 167-178.

http://www.geodetski-vestnik.com/48/2/gv48-2_168-178.pdf (Pridobljeno 7. 7. 2016.)

Kosmatin Fras, M. 2006. Kakovost prostorskih podatkov v fotogrametričnih procesih. Ljubljana. Zbrana gradiva. 21 f., 28 f.

Kraus, K. 2007. Photogrammetry. Geometry from images and laser scans. Second Edition. Berlin, New York, Walter de Gruyter GmbH & Co.: 132, 133 str.

Kurczynski, Z., Bakula, K., Karabin, M., Kowalczyk, M., Markiewicz, J. S., Ostrowski, W., Podlasiak, P., Zawieska, D. 2016. The possibility of using images from UAS in cadastral works. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B1: 909-915.

<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B1/909/2016/isprs-archives-XLI-B1-909-2016.pdf> (Pridobljeno 6. 7. 2016.)

Lazar, A., Kregar, K. 2014. Geo & IT novice. Geodetski vestnik. 58, 1: 190 str.

http://geodetski-vestnik.com/cms/images/58/1/gv58-1_novice4.pdf (Pridobljeno 6. 7. 2016.)

Lowe, D.G. 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision 60,2: 91-110.

<https://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/ijcv04.pdf> (Pridobljeno 10. 7. 2016.)

Mancini, F., Dubbini, M., Stecchi, F., Fabbri, S., Gabbianelli, G. 2013. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. *Remote Sensing* 5: 6880-6898.
doi:10.3390/rs5126880.

Navodila za izvedbo kontrol masovnega zajema podatkov hidrografije in dejanske rabe - vodno zemljišče (Verzija 1.1). 2015. Geodetski inštitut Slovenije.

http://www.gis.si/media/javna_narocila/20150715_kontrola_zajema_hidro/Tehnicna_dokumentacija.pdf (Pridobljeno 5. 5. 2016.)

Nex, F., Remondino, F. 2014. UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*. 6, 1: 1-15.
doi:10.1007/s12518-013-0120-x.

Nikon. 2016.

<http://www.dpreview.com/reviews/nikon-coolpix-a> (Pridobljeno 6. 7. 2016.)

PhotoScan. 2016. Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition (Version 1.2). Agisoft LLC.
http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf

Pravilnik. 2007. Pravilnik o vsebini, obliki in načinu priprave občinskega podrobnega prostorskega načrta. Uradni list RS, št. 99/2007.

<https://www.uradni-list.si/1/content?id=82907> (Pridobljeno 7. 6. 2016.)

Pravilnik o geodetskem načrtu. 2004. Uradni list RS št. 40/2004. Ljubljana.

<http://www.uradni-list.si/1/content?id=48386#/Pravilnik-o-geodetskem-nacrtu> (Pridobljeno 6. 7. 2016.)

Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T., Troisi, S. 2012. Low-cost and open-source solutions for automated image orientation – a critical overview. *Progress in Cultural Heritage Preservation: proceedings of the 4th international conference, EuroMed 2012 in Limassol, Cyprus, October 29 – November 3, 2012*. Germany, Berlin-Heidelberg: p. 40-54.

Remondino, F., Spera, M.G., Nocerino, E., Menna, F., Nex., F. 2013. Dense image matching: comparisons and analyses. *Digital Heritage International Congress*, October 28 – November 1, 2013.
doi: 10.1109/DigitalHeritage.2013.6743712.

Remondino, F., Spera, M.G., Nocerino, E., Menna, F., Nex., F. 2014. State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record* 29: 144-166.
doi: 10.1111/phor.12063.

Rhee, S., Kim, T. 2015. Automated DSM extraction from UAV images and Performance Analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W4*: 351-354.

<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W4/351/2015/isprsarchives-XL-1-W4-351-2015.pdf> (Pridobljeno 6. 7. 2016.)

STEZA. 2014. Navodila za uporabo fotogrametričnega programskega paketa STEreo Zajem - STEZA (Verzija 1.0). Geodetski inštitut Slovenije, Laboratorij za geometrijsko modeliranje in algoritme multimedijev. (Pridobljeno 5. 5. 2016.)

Triglav Čekada, M., Tršan, S., Žvokelj, B. P., Lukač, N., Bizjak, M., Brumen, M., Žalik, B. 2016. STEZA – Sterozajem iz aerofotografij in podatkov Lidar. Geodetski vestnik. 60, 2: 285-288.
http://www.geodetski-vestnik.com/60/2/gv60-2_cekada.pdf (Pridobljeno 20. 7. 2016.)

Vidmar, B. 2014. Analiza uporabnosti fotogrametrično določenega oblaka točk za izdelavo 3D modela objekta kulturne dediščine. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B. Vidmar): 9 f.

KAZALO PRILOG

PRILOGA A: Poročilo obdelave programskega orodja PHOTOSCAN

PRILOGA B: Izračun statističnih mer za ocenjevanje kakovosti
fotogrametričnih izdelkov

PRILOGA C: Prečni profili testnih območij

PRILOGA D: Certifikat geodetskega načrta

PRILOGA E: Grafični izris geodetskega načrta

PRILOGA A: PEROČILO OBDELAVE PROGRAMSKEGA ORODJA PHOTOSCAN

Agisoft PhotoScan

Processing Report

28 July 2016



Survey Data

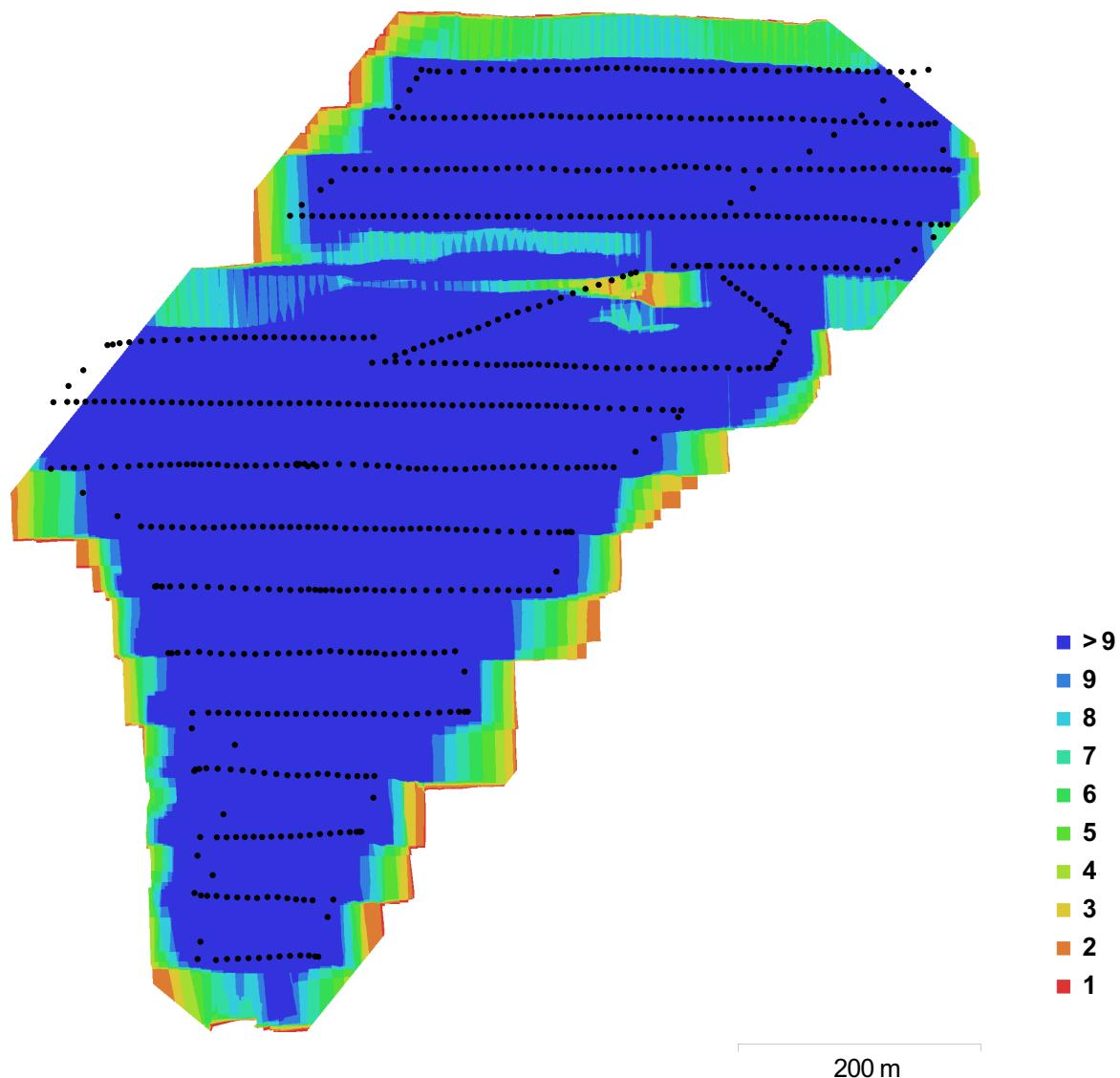


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	729	Camera stations:	729
Flying altitude:	89.6 m	Tie points:	58,178
Ground resolution:	2.15 cm/pix	Projections:	576,529
Coverage area:	3.48e+05 sq m	Reprojection error:	0.421 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
COOLPIX A (18.5 mm)	4928 x 3264	18.5 mm	4.84 x 4.84 um	Yes
COOLPIX A (18.5 mm)	4928 x 3264	18.5 mm	4.84 x 4.84 um	Yes

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

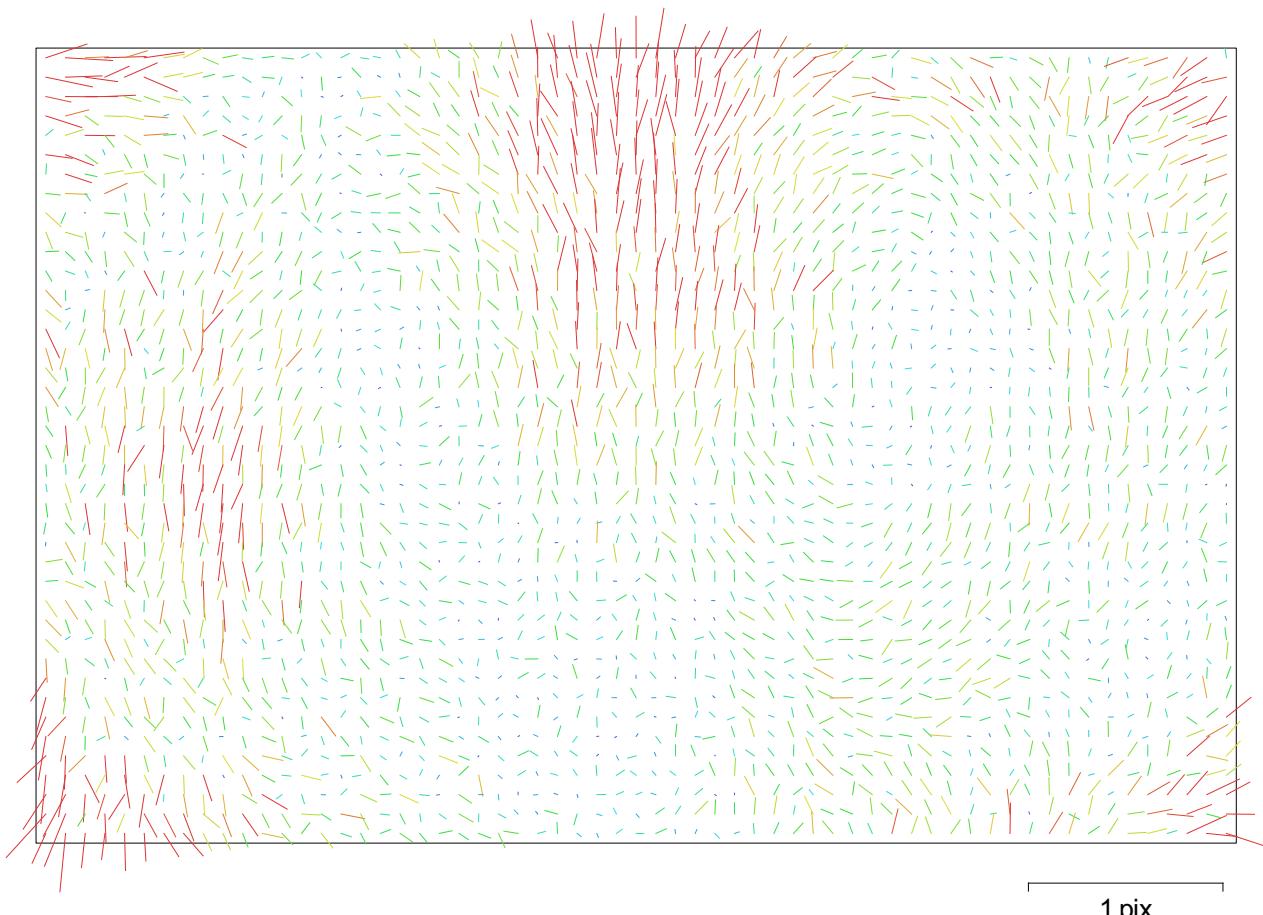


Fig. 2. Image residuals for COOLPIX A (18.5 mm).

COOLPIX A (18.5 mm)

385 images

Resolution 4928 x 3264	Focal Length 18.5 mm	Pixel Size 4.84 x 4.84 um	Precalibrated Yes
Type:	Frame	Skew:	0.251336
Fx:	3837.56	Cx:	2457.57
Fy:	3838.28	Cy:	1637.51
K1:	-0.0744771	P1:	-0.000419301
K2:	0.088187	P2:	0.000174416
K3:	-0.0390718	P3:	0
K4:	0.016331	P4:	0

Camera Calibration

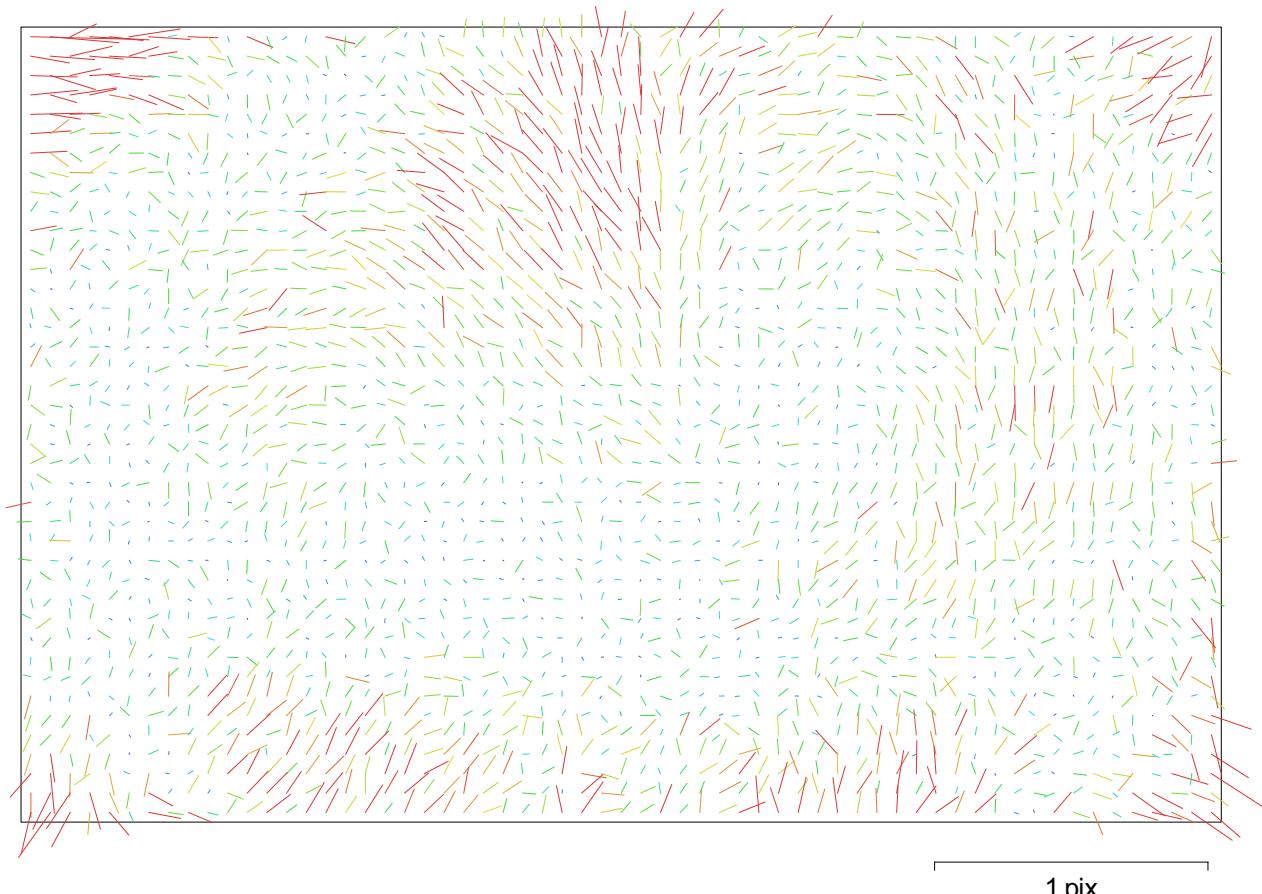


Fig. 3. Image residuals for COOLPIX A (18.5 mm).

COOLPIX A (18.5 mm)

344 images

Resolution 4928 x 3264	Focal Length 18.5 mm	Pixel Size 4.84 x 4.84 um	Precalibrated Yes
Type:	Frame	Skew:	0.251336
Fx:	3837.56	Cx:	2457.57
Fy:	3838.28	Cy:	1637.51
K1:	-0.0744771	P1:	-0.000419301
K2:	0.088187	P2:	0.000174416
K3:	-0.0390718	P3:	0
K4:	0.016331	P4:	0

Camera Locations

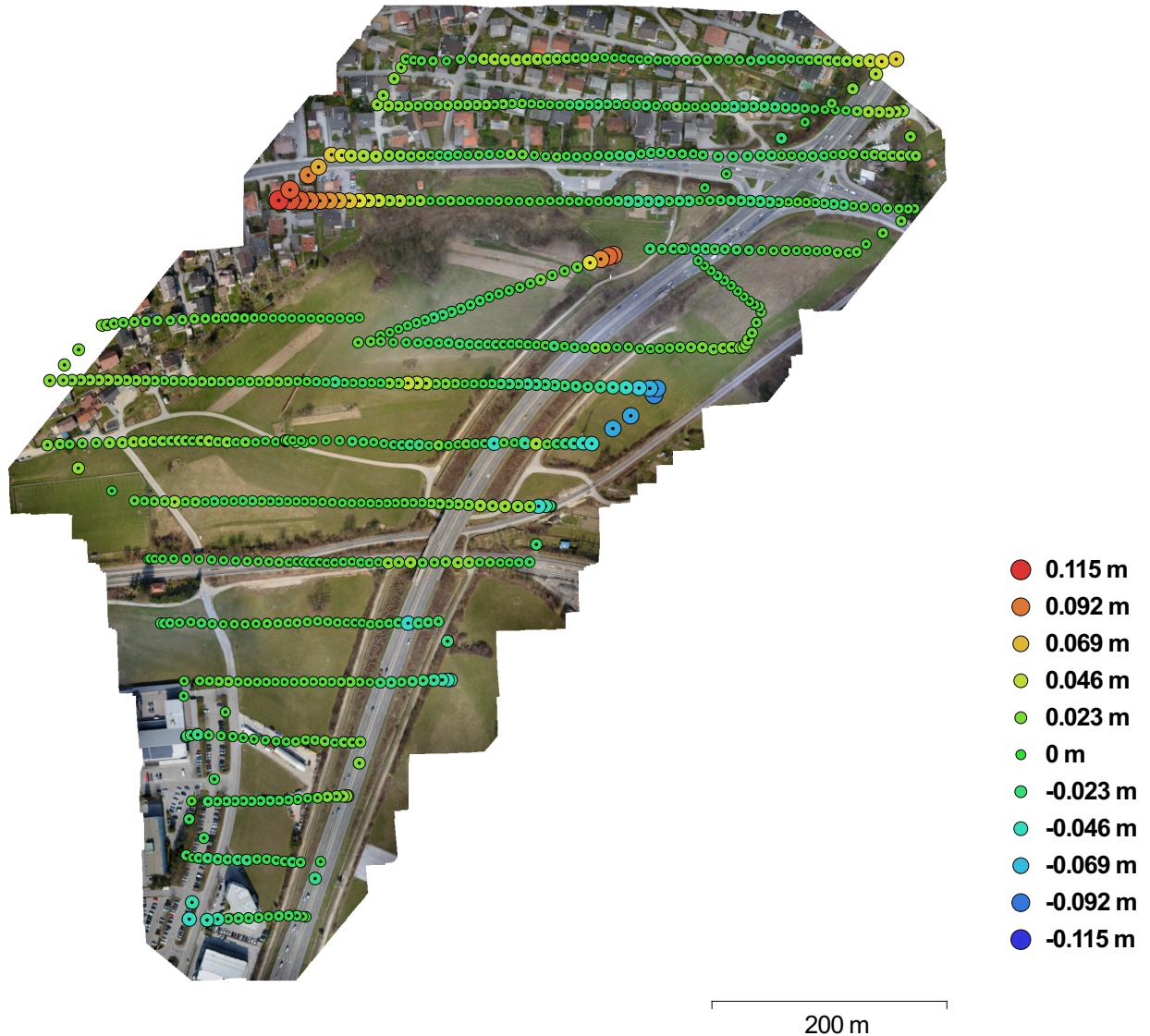


Fig. 4. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	XY error (m)	Z error (m)	Total error (m)
0.048862	0.0373269	0.0614881	0.0224601	0.0654618

Table 2. Average camera location error.

Ground Control Points



Fig. 5. GCP locations.

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
2	0.045472	0.00936091	0.0464256	27	0.164
3	0.0563686	-0.00157853	0.0563907	14	0.114
4	0.0322322	-0.0146913	0.0354224	21	0.120
5	0.00508397	0.0270646	0.027538	9	0.118
6	0.0600375	0.0120335	0.0612316	22	0.134
7	0.0600367	0.0326708	0.0683505	22	0.141
8	0.0228141	0.00259233	0.0229609	23	0.170
9	0.0443149	0.0275396	0.0521751	30	0.311
11	0.0385964	0.0142594	0.0411463	41	0.277

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
12	0.0529249	0.00018938	0.0529252	41	0.379
13	0.029998	0.00147529	0.0300343	23	0.207
14	0.0263784	-0.0146993	0.0301975	24	0.295
15	0.0513582	-0.0190933	0.0547925	28	0.302
16	0.0379517	-0.0353514	0.0518657	21	0.297
17	0.0424603	0.0584106	0.0722127	32	0.275
18	0.0545943	0.00434127	0.0547666	31	0.394
19	0.0470646	-0.021123	0.0515874	29	0.346
20	0.0160206	-0.0227482	0.0278234	21	0.412
21	0.0189472	0.0257806	0.0319943	21	0.180
22	0.0344984	0.0354267	0.0494488	24	0.305
23	0.0243646	-0.00263524	0.0245067	26	0.295
24	0.0356018	0.0302642	0.046727	36	0.322
25	0.0336512	-0.0179421	0.0381356	37	0.269
27	0.0272758	-0.0195496	0.0335582	19	0.135
28	0.00915872	-0.00630087	0.0111168	23	0.179
29	0.0960382	0.0238303	0.0989506	15	0.189
30	0.0402672	0.0336655	0.0524863	19	0.239
31	0.0270326	-0.00711569	0.0279535	31	0.185
32	0.0287686	0.015447	0.0326534	25	0.212
33	0.0623786	0.0131226	0.0637439	29	0.218
34	0.0550497	-0.0133125	0.0566365	15	0.231
35	0.0439179	0.0108472	0.0452377	20	0.131
36	0.0789617	0.0174562	0.0808683	10	0.175
37	0.0659587	0.0114468	0.0669446	16	0.121
38	0.0177954	0.0173024	0.0248203	17	0.196
39	0.00356783	-0.00573499	0.00675422	20	0.234
40	0.0436491	-0.0172067	0.0469182	18	0.148
41	0.0334226	0.00890294	0.034588	28	0.087
42	0.0399622	-0.0298734	0.0498939	20	0.131
43	0.0248693	-0.0335875	0.0417923	20	0.154
44	0.00077002	-0.0137298	0.0137514	19	0.179
45	0.00800602	-0.0454885	0.0461877	23	0.180

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
46	0.0350231	-0.010489	0.0365601	20	0.186
47	0.0439025	0.0170922	0.0471123	20	0.239
49	0.0214945	-0.00705299	0.0226221	20	0.195
50	0.0404365	0.0307289	0.0507875	30	0.227
51	0.0276518	0.00393976	0.0279311	22	0.197
52	0.0322906	0.0162308	0.0361403	20	0.241
53	0.0266971	-0.014819	0.0305342	23	0.294
54	0.0188824	0.0422803	0.0463051	26	0.165
55	0.0388626	0.0128646	0.0409366	18	0.136
56	0.0486901	-0.00396197	0.048851	16	0.137
57	0.047355	-0.0192738	0.051127	17	0.212
58	0.0172941	-0.0279273	0.0328485	21	0.238
59	0.00639428	-0.0152766	0.0165608	24	0.208
60	0.0257746	-0.00997411	0.0276372	26	0.168
61	0.0794156	-0.00527124	0.0795903	30	0.167
62	0.042732	-0.0102622	0.043947	31	0.172
63	0.0312092	-0.00523913	0.0316459	19	0.175
64	0.0479829	-0.00703536	0.0484959	27	0.206
65	0.0724194	-0.0225714	0.0758554	21	0.251
66	0.0434819	-0.0177752	0.0469748	16	0.124
67	0.0139374	0.0131226	0.019143	16	0.256
68	0.00798732	0.0281935	0.0293031	9	0.135
69	0.046062	-0.0343802	0.0574779	8	0.296
70	0.019762	0.00654574	0.0208178	9	0.153
71	0.0336489	-0.0238521	0.0412452	9	0.190
72	0.0472669	-0.0402883	0.0621072	7	0.163
73	0.0412009	0.00318002	0.0413234	13	0.152
74	0.034813	0.0255356	0.0431742	12	0.191
75	0.0602237	0.0208877	0.0637431	7	0.280
76	0.0205032	-0.0411995	0.0460194	2	0.044
77	0.0473707	0.0184194	0.0508258	4	0.154
78	0.0298769	0.000653001	0.029884	9	0.161
79	0.0360042	-0.047484	0.0595906	13	0.132

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
80	0.0315226	-0.0166741	0.0356609	16	0.221
81	0.017821	0.00777085	0.0194416	16	0.168
82	0.0352233	0.00461161	0.0355239	12	0.177
83	0.0167127	0.00452812	0.0173152	14	0.180
84	0.0198886	0.0212243	0.0290866	17	0.195
85	0.0321527	0.0136317	0.0349231	17	0.157
86	0.0381136	0.0412119	0.0561344	9	0.152
87	0.0288696	0.0293957	0.0412015	18	0.209
88	0.0280305	0.0304516	0.0413885	17	0.221
89	0.0165329	0.0214638	0.027093	13	0.136
90	0.0178161	-0.00761741	0.0193762	12	0.101
91	0.0538573	0.0270674	0.0602765	17	0.139
92	0.0472486	0.0282172	0.0550331	15	0.148
94	0.0436126	0.0322358	0.0542329	14	0.188
95	0.0131996	0.0283844	0.0313034	3	0.077
96	0.0665468	-0.0925439	0.113986	2	0.453
97	0.0327743	-0.0208671	0.0388535	4	0.575
98	0.0273608	-0.0011584	0.0273853	8	0.256
99	0.03158	-0.0223975	0.0387162	16	0.231
100	0.0251489	0.0285375	0.0380376	11	0.263
101	0.0157281	0.0305685	0.0343774	10	0.175
102	0.0134835	0.00323401	0.0138659	11	0.185
103	0.0116852	0.00609968	0.0131814	21	0.177
104	0.0208146	-0.0137588	0.024951	22	0.208
105	0.0307095	0.0199991	0.0366474	18	0.177
106	0.0227335	-0.000828093	0.0227485	15	0.157
107	0.0163889	0.00586726	0.0174075	14	0.226
107A	0.0897622	0.00167604	0.0897778	17	0.140
108	0.0243665	-0.023824	0.034078	16	0.126
109	0.096577	-0.0262957	0.100093	15	0.350
110	0.0617064	-0.0131873	0.0630998	18	0.673
111	0.0667634	-0.00423665	0.0668977	16	0.200
112	0.0769798	-0.0226354	0.0802387	12	0.169

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
113	0.00424173	0.0262915	0.0266315	4	0.240
114	0.0154238	-0.0326236	0.0360859	12	0.208
115	0.0146354	0.00012104	0.0146359	22	0.235
116	0.0112385	-0.00725739	0.0133781	20	0.182
117	0.0146678	-0.0200091	0.0248095	15	0.205
118	0.0180466	-0.00252376	0.0182222	22	0.181
119	0.026156	-0.00109796	0.026179	15	0.240
120	0.0373206	0.00537525	0.0377057	20	0.128
121	0.0464917	-0.00125046	0.0465085	16	0.105
122	0.0296052	0.0372753	0.0476016	15	0.159
124	0.0131533	0.00204573	0.0133114	16	0.143
125	0.0312123	-0.0127593	0.0337195	17	0.154
126	0.034606	-0.0321824	0.0472576	16	0.311
127	0.0612741	0.00355771	0.0613773	16	0.188
128	0.0505082	0.011801	0.0518685	15	0.231
129	0.0446499	-0.0113523	0.0460705	15	0.188
130	0.0159885	-0.019146	0.024944	11	0.374
131	0.025285	-0.00997955	0.0271831	14	0.195
133	0.00926336	-0.0095828	0.0133282	14	0.181
134	0.0128371	-0.0271249	0.0300092	14	0.147
135	0.0201169	-0.00820029	0.0217241	23	0.153
136	0.0087531	-0.0168196	0.0189609	13	0.196
139	0.00495412	0.0156759	0.0164401	18	0.265
140	0.0482531	0.0122468	0.049783	16	0.196
141	0.0398647	-0.021861	0.0454653	21	0.173
143	0.0724069	-0.0179402	0.0745963	20	0.198
144	0.0254791	-0.0154025	0.0297728	23	0.141
145	0.0242457	-0.0160211	0.0290608	23	0.102
146	0.0338015	0.0199094	0.0392291	18	0.125
147	0.0437839	-0.044464	0.0624025	15	0.128
148	0.0178358	-0.0446265	0.0480587	16	0.141
149	0.0204495	-0.00328644	0.0207119	15	0.162
150	0.0324702	-0.0029242	0.0326016	11	0.090

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
151	0.0361676	0.00424595	0.036416	12	0.101
152	0.0288181	0.0184229	0.0342036	12	0.148
153	0.00813829	0.0113874	0.0139966	12	0.159
154	0.00545097	-0.000417175	0.00546692	20	0.139
155	0.0256562	0.00489464	0.0261189	15	0.191
156	0.0383985	0.00927553	0.0395029	18	0.142
157	0.0275552	0.0145327	0.0311526	19	0.127
158	0.0279131	0.00797808	0.0290308	8	0.093
159	0.0384745	0.00724848	0.0391513	14	0.087
160	0.0125347	0.00710901	0.0144103	15	0.118
900003	0.0397651	-0.0396323	0.0561425	39	0.362
900006	0.0331456	0.0367864	0.0495164	15	0.187
900007	0.00600119	-0.00186836	0.0062853	15	0.121
Total	0.0385916	0.0222292	0.044536		0.222

Table 3. Control points.

Digital Elevation Model

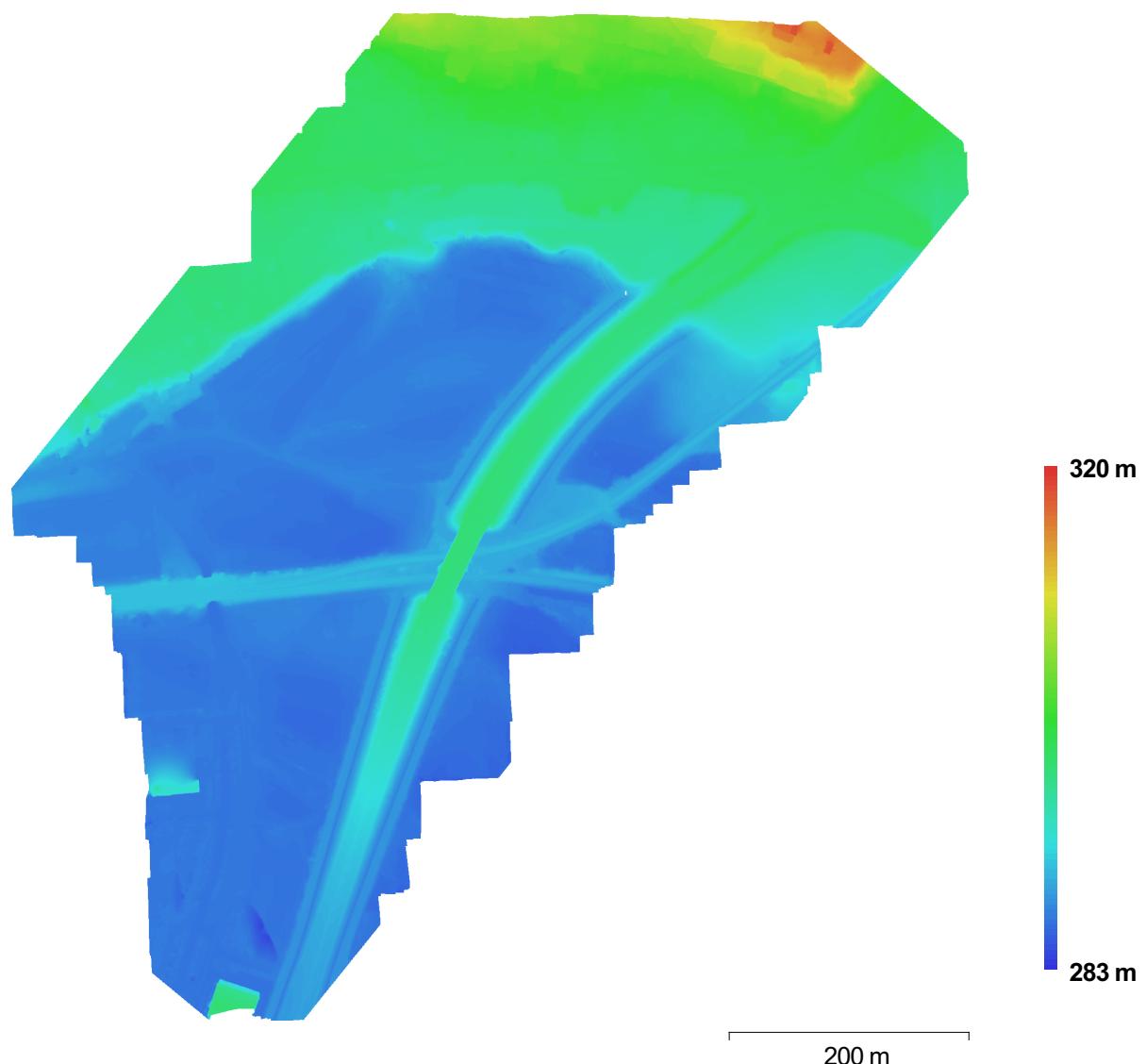


Fig. 6. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 8.61 cm/pix

Point density: 134.929 points per sq m

Processing Parameters

General	
Cameras	729
Aligned cameras	729
Markers	154
Coordinate system	Slovenia 1996 / Slovene National Grid (EPSG:3794)
Point Cloud	
Points	58,178 of 74,034
RMS reprojection error	0.165654 (0.420575 pix)
Max reprojection error	1.79194 (35.1785 pix)
Mean key point size	2.32759 pix
Effective overlap	10.893
Alignment parameters	
Accuracy	High
Pair preselection	Reference
Key point limit	40,000
Tie point limit	1,000
Constrain features by mask	No
Matching time	1 hours 29 minutes
Alignment time	1 minutes 8 seconds
Optimization parameters	
Optimization time	2 seconds
Depth Maps	
Count	729
Reconstruction parameters	
Quality	Medium
Filtering mode	Aggressive
Processing time	6 hours 31 minutes
Dense Point Cloud	
Points	60,362,597
Reconstruction parameters	
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Processing time	40 minutes 33 seconds
Model	
Faces	7,949,818
Vertices	3,979,413
Reconstruction parameters	
Surface type	Height field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Face count	8,000,000
Processing time	6 minutes 45 seconds
DEM	
Size	11,330 x 12,108
Coordinate system	Slovenia 1996 / Slovene National Grid (EPSG:3794)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Orthomosaic	
Size	16,000 x 16,600
Coordinate system	Slovenia 1996 / Slovene National Grid (EPSG:3794)
Channels	3, uint8
Blending mode	Mosaic
Reconstruction parameters	

Surface
Enable color correction

DEM
No

PRILOGA B: IZRAČUN STATISTIČNIH MER ZA OCENJEVANJE KAKOVOSTI FOTOGRAMETRIČNIH IZDELKOV

Preglednica B1: Seznam koordinat kontrolnih točk in izračun statističnih mer za ugotavljanje kakovosti stereozajema.

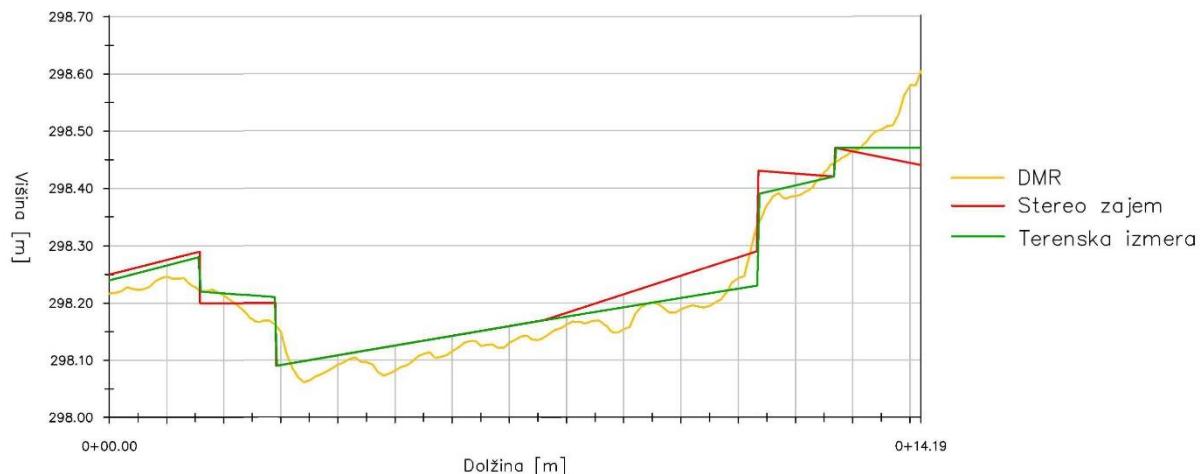
Terenske točke				Stereo točke			Odstopanja		
Točka	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]
1	464752,420	106844,080	298,540	464752,420	106844,090	298,550	0,000	0,010	0,010
2	464769,710	106833,400	298,210	464769,700	106833,390	298,220	-0,010	-0,010	0,010
3	464758,810	106814,020	296,540	464758,800	106814,030	296,580	-0,010	0,010	0,040
4	464762,110	106814,270	296,620	464762,150	106814,310	296,600	0,040	0,040	-0,020
5	464776,930	106844,450	298,190	464776,950	106844,440	298,210	0,020	-0,010	0,020
6	464778,120	106845,910	298,160	464778,130	106845,900	298,190	0,010	-0,010	0,030
7	464778,680	106845,350	298,170	464778,660	106845,330	298,190	-0,020	-0,020	0,020
8	464778,900	106841,950	298,210	464778,890	106841,920	298,240	-0,010	-0,030	0,030
9	464783,150	106844,750	298,220	464783,170	106844,720	298,260	0,020	-0,030	0,040
10	464784,630	106847,120	298,180	464784,690	106847,140	298,210	0,060	0,020	0,030
11	464786,220	106844,780	298,180	464786,180	106844,780	298,210	-0,040	0,000	0,030
12	464787,260	106845,570	298,080	464787,230	106845,560	298,130	-0,030	-0,010	0,050
13	464787,870	106842,800	298,220	464787,870	106842,770	298,230	0,000	-0,030	0,010
14	464807,040	106831,090	298,240	464807,030	106831,060	298,250	-0,010	-0,030	0,010
15	464807,490	106831,040	298,230	464807,550	106831,000	298,250	0,060	-0,040	0,020
16	464812,710	106834,050	298,230	464812,730	106834,070	298,240	0,020	0,020	0,010
17	464558,690	106669,130	289,880	464558,650	106669,110	289,910	-0,040	-0,020	0,030
18	464569,600	106509,020	286,500	464569,580	106509,020	286,530	-0,020	0,000	0,030
19	464570,440	106511,250	286,550	464570,430	106511,210	286,560	-0,010	-0,040	0,010
20	464586,640	106489,540	290,620	464586,600	106489,600	290,620	-0,040	0,060	0,000
21	464592,870	106497,160	290,550	464592,840	106497,180	290,540	-0,030	0,020	-0,010
22	464593,840	106464,130	286,990	464593,830	106464,050	287,020	-0,010	-0,080	0,030
23	464584,690	106484,630	290,590	464584,700	106484,630	290,610	0,010	0,000	0,020
24	464582,880	106504,930	290,770	464582,960	106504,890	290,750	0,080	-0,040	-0,020
Srednja vrednost opazovanj (m)							0,002	-0,009	0,018
Standardni odklon (m)							0,033	0,032	0,024
RMSE (m)							0,032	0,031	0,025
RMSEr (m)							0,044		
Horizontalna natančnost pri 95-odstotni stopnji zaupanja							0,077		
Vertikalna natančnost pri 95-odstotni stopnji zaupanja							0,049		

Preglednica B2: Seznam koordinat kontrolnih točk in izračun statističnih mer za ugotavljanje kakovosti ortofota in DMR.

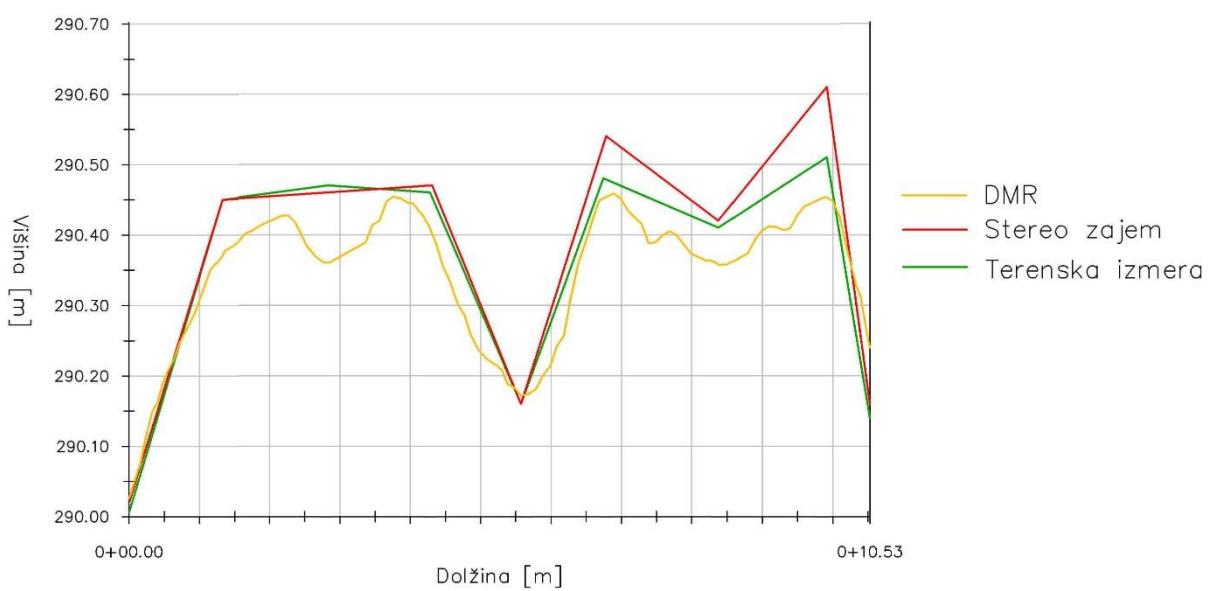
Terenske točke				Oblak točk			Odstopanja		
Točka	X [m]	ΔX [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]
1	464752,420	106844,080	298,540	464752,412	106844,133	298,587	-0,008	0,053	0,047
2	464769,710	106833,400	298,210	464769,675	106833,465	298,180	-0,035	0,065	-0,030
3	464758,810	106814,020	296,540	464758,775	106814,079	296,559	-0,035	0,059	0,019
4	464762,110	106814,270	296,620	464762,157	106814,308	296,659	0,047	0,038	0,039
5	464776,930	106844,450	298,190	464776,968	106844,482	298,190	0,038	0,032	0,000
6	464778,120	106845,910	298,160	464778,117	106845,886	298,161	-0,003	-0,024	0,001
7	464778,680	106845,350	298,170	464778,653	106845,390	298,155	-0,027	0,040	-0,015
8	464778,900	106841,950	298,210	464778,849	106841,938	298,178	-0,051	-0,012	-0,032
9	464783,150	106844,750	298,220	464783,133	106844,741	298,198	-0,017	-0,009	-0,022
10	464784,630	106847,120	298,180	464784,674	106847,175	298,155	0,044	0,055	-0,025
11	464786,220	106844,780	298,180	464786,133	106844,793	298,161	-0,087	0,013	-0,019
12	464787,260	106845,570	298,080	464787,193	106845,600	298,082	-0,067	0,030	0,002
13	464787,870	106842,800	298,220	464787,870	106842,816	298,215	0,000	0,016	-0,005
14	464807,040	106831,090	298,240	464807,044	106831,202	298,251	0,004	0,112	0,011
15	464807,490	106831,040	298,230	464807,511	106831,067	298,207	0,021	0,027	-0,023
16	464812,710	106834,050	298,230	464812,731	106834,153	298,203	0,021	0,103	-0,027
17	464558,690	106669,130	289,880	464558,677	106669,132	289,897	-0,013	0,002	0,017
18	464569,600	106509,020	286,500	464569,578	106509,079	286,463	-0,022	0,059	-0,037
19	464570,440	106511,250	286,550	464570,440	106511,250	286,512	0,000	0,000	-0,038
20	464586,640	106489,540	290,620	464586,608	106489,626	290,562	-0,032	0,086	-0,058
21	464592,870	106497,160	290,550	464592,821	106497,233	290,519	-0,049	0,073	-0,031
22	464593,840	106464,130	286,990	464593,806	106464,117	286,955	-0,034	-0,013	-0,035
23	464584,690	106484,630	290,590	464584,694	106484,593	290,172	0,004	-0,037	-0,418
24	464582,880	106504,930	290,770	464582,927	106504,936	290,765	0,047	0,006	-0,005
Srednja vrednost opazovanj (m)							-0,011	0,032	-0,028
Standardni odklon (m)							0,036	0,059	0,089
RMSE (m)							0,037	0,051	0,090
RMSE _r (m)							0,062		
Horizontalna natančnost pri 95-odstotni stopnji zaupanja							0,108		
Vertikalna natančnost pri 95-odstotni stopnji zaupanja							0,176		

PRILOGA C: PREČNI PROFILI TESTNIH OBMOČIJ

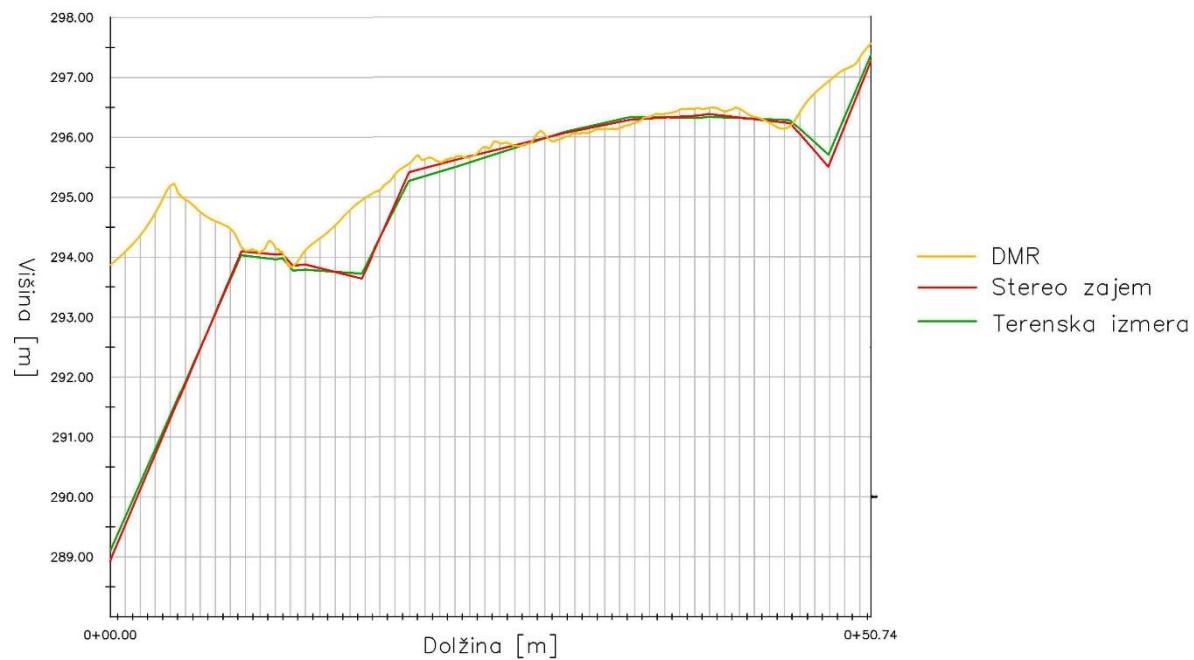
Profil 2 – CESTA



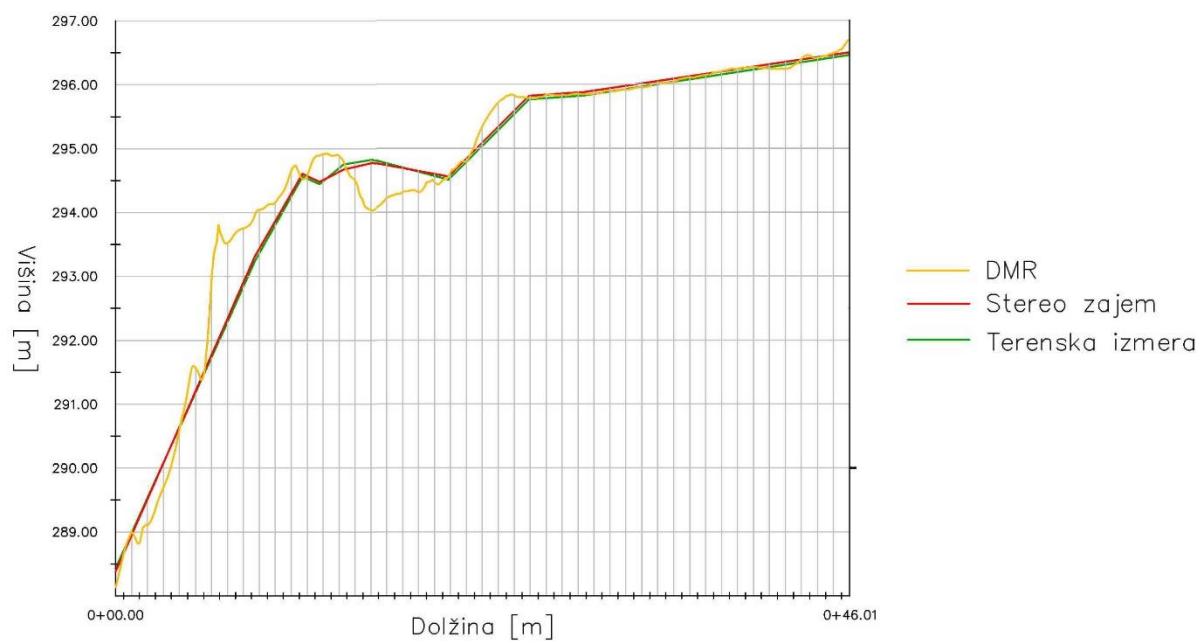
Profil 2 – ŽELEZNICA



Profil 2 – Zarast



Profil 3 – Zarast



PRILOGA D: CERTIFIKAT GEODETSKEGA NAČRTA

GEODETSKA DRUŽBA d.o.o.

Gerbičeva ulica 51 a, 1000 Ljubljana

Telefon: 01 / 420 12 20, Fax: 01 / 420 12 29

Vpisana v imenik geodetskih podjetij pri IZS pod zaporedno številko 0183.



GEODETSKA DRUŽBA

CERTIFIKAT GEODETSKEGA NAČRTA**1. Naročnik geodetskega načrta: MESTNA OBČINA LJUBLJANA****Mestni trg 1
1000 Ljubljana**

(ime in priimek fizične osebe oz. firma družbe)

2. Odgovorni geodet: Ksenija Simčič, IZS Geo 0278

(ime in priimek odgovornega geodeta, identifikacijska številka odgovornega geodeta)

potrjujem,**da je geodetski načrt št.: GD 26/2016**

(Številka geodetskega načrta)

izdelan skladno s predpisi in z namenom uporabe, opredeljenim v točki 3 tega certifikata.**3. Namen uporabe geodetskega načrta:**

- za izdelavo strokovnih podlag za območje OPPN 150 pod Dunajsko cesto (P+R v Črnučah)

4. Podatki o vsebini geodetskega načrta:

Podatki	Vir podatkov	Institucija	Datum	Natančnost
(naveda posameznega podatka, skupine podatkov ali celotne vsebine)	(geodetska izmera oziroma ime zbirke geodetskih ali prostorskih podatkov, iz katere so podatki prevzeti)	(naziv geodetskega podjetja, ki je izvedlo geodetsko izmero oziroma naziv upravljavca zbirke geodetskih ali prostorskih podatkov, iz katere so podatki prevzeti)	(datum geodetske izmere oziroma izdaje podatkov iz zbirke geodetskih ali prostorskih podatkov)	(opis natančnosti podatka, skupine podatkov ali celotne vsebine)
topografska vsebina	kombinirana fotogrametrična izmera na podlagi stereo parov aerosnemanja ter lidar podatkov, dopodnjena s terenskimi domeritvami	Geodetska družba d.o.o.	april 2016	fotogrametrična izmera in terenske domeritve: natančnost 10 cm
zemljiški kataster	zemljiško katastrski prikaz in seznam zemljiško katastrskih točk in urejenih mej	Geodetska uprava Republike Slovenije	april 2016	grafično numerični kataster z vklopom, natančnost do 1 m; urejene meje, natančnost do 10 cm
gospodarska javna infrastruktura	Zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture	Geodetska uprava Republike Slovenije	april 2016	elektrika: 1 – 5 m vodovod: 1 – 5 m kanalizacija: 1 – 5 m plin: 0,1 – 1 m el. komunikacije: 1 – 5 m

5. Pogoji za uporabo geodetskega načrta:

- Geodetski načrt je izdelan za izdelavo strokovnih podlag za območje OPPN 150 pod Dunajsko cesto (P + R v Črnučah).
- Osnova za izdelavo geodetskega načrta so bili stereopari letalskega snemanja iz marca 2016, s katerimi razpolaga Geodetska družba d.o.o. in podatki Laserskega skeniranja Slovenije iz leta 2015, s katerimi razpolaga Agencija Republike Slovenije za okolje. V aprilu 2016 je bila na terenu narejena identifikacija in terenske domeritve. Geodetski načrt je bil izdelan v D96/TM koordinatnem sistemu in transformiran v D48/GK koordinatni sistem.
- Osnova za terenske meritve so bile z metodo GPS-RTK določene izhodiščne točke geodetske mreže, ki so bile nato transformirane iz koordinatnega sistema D96/TM v koordinatni sistem D48/GK. Na načrtu prikazane in na terenu stabilizirane so točke s koordinatami v D48/GK koordinatnem sistemu:

1	y=464778.66	x=106832.31	višina=298.30
2	y=464962.48	x=106746.91	višina=299.30
3	y=464589.15	x=106469.16	višina=287.00
4	y=464611.56	x=106296.71	višina=286.43

- Izhodišče za določitev nadmorskih višin na območju GN je reper z oznako PNI-211 in nadmorsko višino:

PNI-211 višina=299.724

- Med izhodiščnimi točkami so bile s terestričnimi meritvami določene točke operativnega poligona, ki so bile uporabljene kot stojišča tahaometrične izmere.
- Za prikaz vsebine geodetskega načrta so bili uporabljeni znaki Topografskega ključa, ki ga je izdala Geodetska uprava Republike Slovenije v maju 2006.
- Na geodetskemu načrtu je poleg topografske vsebine prikazana tudi komunalna infrastruktura in podatki o sosednjih objektih.
- Podatki o elektrovodih, vodih elektronskih komunikacij, vodovodnem, kanalizacijskem omrežju ter plinu so bili prevzeti iz Zbirnega katastra gospodarske javne infrastrukture, ki ga vodi Geodetska uprava RS.
- Objekti na načrtu so pridobljeni s fotogrametrično izmero (po strehah objektov).
- Naročniku je bil predan geodetski načrt v digitalni obliki (Autodesk DWG format). Vsebina digitalnega načrta je enaka potrjenemu izrisu.

Ljubljana, 12. april 2016
(kraj, datum)

.....
(osebni žig in podpis odgovornega geodeta)

.....
(žig geodetskega podjetja, podpis odgovorne osebe)

PRILOGA E: GRAFIČNI IZRIS GEODETSKEGA NAČRTA

