

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/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Frangež, V., 2016. Analiza vpliva geometrije aerolaserskega skeniranja na kakovost določitve digitalnega modela reliefa. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Kosmatin Fras, M., somentorja Urbančič, T., Grigillo, D.): 33 str.

Datum arhiviranja: 11-08-2016

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/>

This is original version of final thesis.

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

Frangež, V., 2016. Analiza vpliva geometrije aerolaserskega skeniranja na kakovost določitve digitalnega modela reliefa. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kosmatin Fras, M., co-supervisors Urbančič, T., Grigillo, D.): 33 pp.

Archiving Date: 11-08-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GEODEZIJA IN
GEOINFORMATIKA

Kandidat:

VALENS FRANGEŽ

**ANALIZA VPLIVA GEOMETRIJE AEROLASERSKEGA
SKENIRANJA NA KAKOVOST DOLOČITVE
DIGITALNEGA MODELA RELIEFA**

Diplomska naloga št.: 109/GIG

**ANALYSIS OF THE IMPACT OF AIRBORNE LASER
SCANNING GEOMETRY ON THE QUALITY OF
DIGITAL TERRAIN MODEL DETERMINATION**

Graduation thesis No.: 109/GIG

Mentorica:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Somentor:

asist. Tilen Urbančič
asist. dr. Dejan Grigillo

Ljubljana, 03. 06. 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna«

IZJAVE

Podpisani Valens Frangež izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Analiza vpliva geometrije aerolaserskega skeniranja na kakovost določitve digitalnega modela reliefa«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 18. 5. 2016

Valens Frangež

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.7/.8(497.4)(043.2)
Avtor:	Valens Frangež
Mentor:	doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
Somentor:	asist. Tilen Urbančič, univ. dipl. inž. geod. asist. dr. Dejan Grigillo
Naslov:	Analiza vpliva geometrije aerolaserskega skeniranja na kakovost določitve digitalnega modela reliefa
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	33 str., 5 pregl., 22 slik.
Ključne besede:	aerolasersko skeniranje, digitalni model reliefa, kakovost, geometrija aerolaserskega skeniranja, georeferenciranje

Izveček

Aerolasersko skeniranje je v sedanjem času ena izmed pogosteje uporabljenih tehnologij zajema podatkov o oblikovanosti zemeljskega površja. Oblak točk kot rezultat laserskega skeniranja je pogosto uporabljen za izdelavo visokokakovostnih digitalnih modelov reliefa (DMR), katerih natančnost je ovrednotena v postopku analize.

V nalogi smo obravnavali vpliv geometrije laserskega skeniranja na določitev višinske komponente položaja DMR-jev na primeru dveh vrst površin, travniku in asfaltu, na testnem območju v Radovljici. Znotraj posamezne površine smo obravnavali dva podatkovna niza, in sicer oblake snemalnih pasov in združene georeferencirane oblake. Vpliv geometrije laserskega skeniranja smo analizirali predvsem z vidika višine leta snemalne platforme nad terenom, velikosti kota od nadirja in oddaljenosti od referenčne GNSS postaje. Za referenčne vrednosti, na katerih je temeljila višinska primerjava, smo uporabili kontrolne točke, izmerjene na terenu. Na osnovi izvedene analize kakovosti DMR-ja, katere rezultat so mere statistične razpršenosti, in izračuna geometrijskih parametrov, smo izrisali grafe, ki so v nalogi glaven način prikaza rezultatov. Končne ugotovitve glede velikosti posameznega vpliva na kakovost določitve položajev točk aerolaserskega skeniranja smo podali v zaključku.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	528.7/.8(497.4)(043.2)
Author:	Valens Frangež
Supervisor:	Assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph.D.
Co-advisor:	Assist. Tilen Urbančič, B.Sc. of Geodesy Assist. Dejan Grigillo, Ph.D.
Title:	Analysis of the Impact of Airborne Laser Scanning Geometry on the Quality of Digital Terrain Model Determination
Document type.	Graduation Thesis – University Studies
Scope and tools:	33 p., 5 tab., 22 fig.
Keywords:	Airborne Laser Scanning, Digital Terrain Model, Quality, Airborne Laser Scanning Geometry, Georeferencing

Abstract

Airborne laser scanning is nowadays one of the most used technologies for data collection of the shape of the Earth's surface. Point cloud as a result of laser scanning is often used to produce high-quality digital terrain models (DTM), whose accuracy is evaluated in the analysis process. In the thesis we discussed the influence of the geometry of laser scanning on determination of the DTM's altitude component on two different types of grounding, meadow and asphalt, in testing area in Radovljica. Within each area we discussed two data sets, strip point clouds and georeferenced point clouds. We analyzed the impact of the height of the recording platform over the terrain, the size of angle from nadir and distance from the GNSS ground reference station on the geometry of laser scanning. The height comparison was based on check points, measured in the field. Based on the analysis of the quality of the DTM, the results of which are the measures of statistical dispersion, and the calculated geometric parameters, the figures were plotted, and those are the main way the results are displayed. Final findings regarding the size of each effect on the quality of the determination of point positions based on airborne laser scanning are given in the conclusion.

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi diplomske naloge se za strokovno vodenje, koristne nasvete in vsestransko pomoč iskreno zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras ter somentorjema asist. dr. Dejanu Grigillu in asist. Tilnu Urbančiču. Cenim ves vaš vloženi trud!

Želel bi se zahvaliti tudi doc. dr. Simoni Savšek, ki me je tekom študija dodatno navdušila nad geodezijo in me podpirala pri mojih študijskih podvigih.

Predvsem pa bi se rad za neprestano podporo in razumevanje zahvalil moji družini, mami Valeriji in babi Mari za vse vzpodbude ter očetu Jerneju, ki me je kot geodet v prvi vrsti vpeljal v geodezijo. Brez vas veliko samoumevnih stvari ne bi bilo mogočih!

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
2 AEROLASERSKO SKENIRANJE	3
3 DIGITALNI MODEL RELIEFA	6
4 IZVEDBA MERITEV, INŠTRUMENTARIJ IN TEHNIČNI PARAMETRI	8
4.1 Testno območje	8
4.2 Lasersko skeniranje območja in terestrična izmera	11
4.3 Uporabljena oprema in tehnični parametri laserskega skeniranja	13
5 OBDELAVA PODATKOV	15
5.1 Programska oprema	15
5.2 Potek obdelave podatkov	16
5.3 Pregled podatkov in analiza	18
5.4 Izračun geometrijskih parametrov	21
6 ANALIZA REZULTATOV	22
6.1 Vpliv višine leta	22
6.2 Vpliv kota od nadirja	25
6.3 Vpliv oddaljenosti od referenčne GNSS postaje	27
7 ZAKLJUČEK	30
VIRI	32

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz principa določitve položaja z aerolaserskim skeniranjem (Prirejeno po: Kraus, 2007).....	3
Slika 2: Podatki IMU: A) nagib ϕ B) naklon θ C) zasuk ψ (Prirejeno po: Triglav Čekada, 2009) ..	5
Slika 3: Laserski skener Riegl LMS-Q780 (www.riegl.com)	8
Slika 4: Leica TCRP1201+ (www.leica.com).....	8
Slika 5: Izris trajektorij letov in območij travnikov ter asfaltnih površin na ortofotu (vir: Geodetska uprava RS).....	9
Slika 6: Povprečne gostote točk glede na območje travnika in višino leta.....	10
Slika 7: Povprečne gostote točk glede na območje asfalta in višino leta	10
Slika 8: Prikaz območja Travnika 1 s kontrolnimi točkami in točkama geodetske mreže (vir: Geodetska Uprava RS)	12
Slika 9: Odprto okno v pregledovalniku FugroViewer	15
Slika 10: Shema postopka obdelave podatkov	16
Slika 11: Rezultat analize kakovosti DMR – razlike višin: a) oblak snemalnega pasu b) združen georeferenciran oblak	18
Slika 12: Prikaz območja travnika 3, preleta 6 z okolico	20
Slika 13: Odvisnosti σ od višine leta: asfalt – združen georeferenciran oblak	23
Slika 14: Odvisnosti σ od višine leta: travnik – združen georeferenciran oblak	23
Slika 15: Odvisnosti σ od višine leta: asfalt – oblak snemalnega pasu	24
Slika 16: Odvisnosti σ od višine leta: travnik – oblak snemalnega pasu.....	24
Slika 17: Odvisnosti RMSE od kota od nadirja: asfalt	26
Slika 18: Odvisnosti RMSE od kota od nadirja: travnik	26
Slika 19: Odvisnosti σ od kota od nadirja: travnik in asfalt– združen georeferenciran oblak.....	27
Slika 20: Odvisnosti σ od kota od nadirja: travnik in asfalt – oblak snemalnega pasu	27
Slika 21: Odvisnosti RMSE od oddaljenosti od referenčne GNSS postaje: asfalt	28
Slika 22: Odvisnosti RMSE od oddaljenosti od referenčne GNSS postaje: travnik	28

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Mere za oceno natančnosti višin pri normalni porazdelitvi odstopanj (Vir: Pavlovčič Prešeren in sod., 2015).....	7
Preglednica 2: Osnovni podatki obravnavanih območij.....	9
Preglednica 3: Primer koordinat kontrolnih točk območja 1 travnika.....	13
Preglednica 4: Osnovni tehnični podatki laserskega skenerja Riegl LMS-Q780 (Vir: www.riegl.com).....	14
Preglednica 5: Primerjava mer razpršenosti za DMR-je oblaka snemalnega pasu in združenega georeferenciranega oblaka za travnik 3.....	19

»Ta stran je namenoma prazna«

KRATICE

D48/GK	Geodetski datum 1948, Gauß-Krügerjeva projekcija
D96/TM	Geodetski datum 1996, transverzalna Mercatorjeva projekcija
DMR	Digitalni model reliefa
GNSS	angl. Global Navigation Satellite System
GNSS-RTK	angl. Global Navigation Satellite System-Real Time Kinematic
IMU	angl. Inertial Measurement Unit
LiDAR	angl. Light Detection and Ranging
POS	angl. Position and Orientation System
PPS	angl. Pulse Per Second
RMSE	angl. Root Mean Square Error
TIN	angl. Triangulated Irregular Network
WGS84	angl. World Geodetic System 1984

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Aerolasersko skeniranje je v sedanjem času ena izmed pogosteje uporabljenih tehnologij zajema podatkov o oblikovanosti zemeljskega površja. Pri njegovi uporabi je potrebno poznati tako prednosti, kot tudi omejitve za doseganje kar se da dobrih rezultatov. Podatki aerolaserskega skeniranja so uporabni na številnih področjih, ki so kakorkoli povezani s prostorom in njegovim razumevanjem. Oblak točk je kot rezultat laserskega skeniranja pogosto uporabljen za izdelavo visokokakovostnih digitalnih modelov reliefa (DMR). Za določitev kakovosti DMR-ja, izdelanega iz podatkov laserskega skeniranja, moramo poznati pot od zajema podatkov do njegove izdelave. S primernim postopkom obdelave opazovanj vseh senzorjev aerolaserskega skeniranja in izdelave DMR želimo odpraviti ali zmanjšati sistematične in druge neželene vplive na končni rezultat. Kakovost izdelanega DMR-ja ovrednotimo v postopku analize, kjer poskušamo opredeliti velikost posamičnih vplivov. V analizi lahko primerjamo DMR-je, ki so izdelani iz oblakov točk, posnetih na različnih višinah, na različnih površinah ali pa so izdelani z različnimi postopki obdelave.

V nalogi nas zanima opredelitev vplivov, od katerih je odvisna natančnost določitve višin DMR-ja. Osredotočili smo se predvsem na geometrijo laserskega skeniranja, torej način zajema oblaka točk, in na vrsto površin, manj pa na sam postopek obdelave podatkov, ki ima lahko na končen izdelek tudi velik vpliv.

Namen naloge je analizirati in ugotoviti, ali imajo različne višine leta snemalne platforme nad terenom, oddaljenost od referenčne GNSS (angl. Global Navigation Satellite System) postaje in različne velikosti kotov od nadirja pri usmeritvi laserskega žarka v prostor, vpliv na kakovost izdelanega DMR-ja. Ob izračunanih statističnih merah razpršenosti bomo posamične vplive predstavili in interpretirali tudi z grafi, ki bodo glaven način prikaza rezultatov. Za namene naloge smo razpolagali s kakovostnimi podatki, ki so primerni za ugotavljanje posamičnih vplivov na natančnost višin DMR-jev. Kot referenčne podatke smo uporabili koordinate kontrolnih točk, ki so bile izmerjene s klasično geodetsko izmero. Ocenjena natančnost koordinat kontrolnih točk je vsaj trikrat boljša od natančnosti položaja posamezne točke v oblaku točk aerolaserskega skeniranja. Prav zaradi tega razloga so takšne kontrolne točke primerne za ugotavljanje kakovosti DMR-jev. Vhodni podatki so bili oblaki točk, ki so bili zajeti iz petnajstih snemalnih linij, iz katerih smo izrezali manjša območja, iz teh pa nato izdelali DMR-je, za katere smo izvedli analizo. Obravnavali smo dve vrsti površin, in sicer asfaltirana območja in območja travnikov ter nato med njimi izvedli primerjavo rezultatov. Znotraj območij travnikov smo obravnavali še delitev glede na višino vegetacije in ugotavljali tudi ta vpliv na kakovost digitalnega modela. Prav

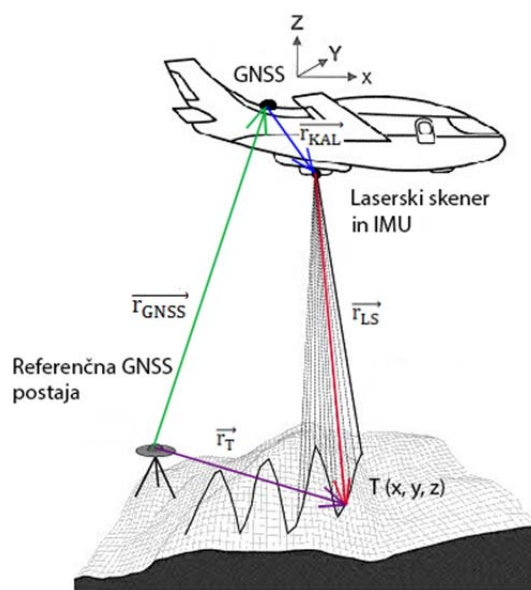
tako smo razlikovali med dvema skupinama/oblikama podatkov, in sicer obravnavali smo oblake snemalnih pasov in združene georeferencirane oblake ter razlike v rezultatih tudi predstavili.

Diplomska naloga je sestavljena iz sedmih vsebinsko zaključenih poglavij, in sicer uvodni teoretični del sega do tretjega poglavja. V prvem poglavju je podan uvod v nalogo in njen namen, drugo poglavje obsega aerolasersko skeniranje in elemente geometrije skeniranja ter tretje poglavje, kjer so predstavljeni digitalni model reliefa in statistične mere za ocenjevanje kakovosti DMR-jev. Praktični del naloge obsega tri poglavja, četrto, peto in šesto. V četrtem poglavju so opredeljeni obravnavano testno območje, uporabljen instrumentarij in predstavljene metode zajema podatkov ter tehničnih parametrov laserskega skeniranja. V petem poglavju je predstavljena izvedba obdelave podatkov, in sicer od uporabljene programske opreme, postopka obdelave do končnega pregleda podatkov in njihove analize, ter postopek priprave podatkov na predstavitev in interpretacijo. V šestem poglavju podamo končne rezultate diplomske naloge, ki so vsebinsko razdeljeni na tri podpoglavja. Ta so določena glede na obravnavan geometrijski vpliv: (a) višino leta nad terenom, (b) velikostjo snemalnega kota od nadirja in (c) oddaljenostjo od referenčne GNSS postaje. Celoten povzetek končnih ugotovitev in rezultatov vpliva geometrije aerolaserskega skeniranja na kakovost določitve DMD-ja je podan v zaključku.

2 AEROLASERSKO SKENIRANJE

Aerolasersko skeniranje ali lidar (angl. Light Detection and Ranging, LiDAR) je tehnologija zajema podatkov fizičnega površja na osnovi laserskega žarka, ki ga odda laserski skener, del difuzno odbitega žarka nato zabeleži detektor na krovu plovila. Glede na merjen čas potovanja žarka od oddaje do sprejema se določi razdalja od skenerja do točke na zemeljskem površju. Vsaki točki lahko določimo prostorske koordinate, in sicer na osnovi izmerjene razdalje, kota pod katerim je bil laserski žarek oddan in znanega položaja ter kotov orientacije laserskega skenerja v času skeniranja (slika 1). Vse te vrednosti se med letom spreminjajo, beleži pa jih t.i. dinamični POS (angl. Position and Orientation System), ki je sestavljen iz dveh delov, GNSS in IMU (angl. Inertial Measurement Unit, slov. inercialna merska naprava) (Kraus, 2007).

Postopek laserskega skeniranja opredeljuje delovanje dveh glavnih segmentov, to je laserskega skenerja, ki meri razdalje do točk na površju Zemlje, ter sistema za določanje položaja in orientacije celotnega sistema, ki ga sestavljata GNSS in IMU. Za doseganje čim višje natančnosti pri določanju koordinat točk na zemeljskem površju, je potrebno izvesti kalibracijo snemalnega sistema, in sicer določiti medsebojno prostorsko in časovno usklajenost med laserskim skenerjem, IMU in GNSS sistemom. V postopku kalibracije se z elektronskim tahimetrom določijo oddaljenosti med koordinatnimi izhodišči posameznih sistemov (laserskim skenerjem, IMU in GNSS). Koti zasukov med laserskim skenerjem in inercialno mersko napravo (angl. Boresight Alignment, slov. kotna neporavnost) se določijo na osnovi kalibracijskega leta, ki se izvede na dveh različnih višinah, pri čemer ima linija leta obliko štiriperesne deteljice. Kakovostna kalibracija celotnega snemalnega sistema je osnovni pogoj za dobro kakovost končnega georeferenciranja oblaka točk (Vosselman in Maas, 2010 in Kocijančič, 2013).



Slika 1: Prikaz principa določitve položaja z aerolaserskim skeniranjem (Prirejeno po: Kraus, 2007)

Povezave vektorjev na sliki 1 lahko zapišemo tudi z naslednjim zapisom:

$$\vec{r}_T = \vec{r}_{GNSS} + \vec{r}_{KAL} + \vec{r}_{LS}$$

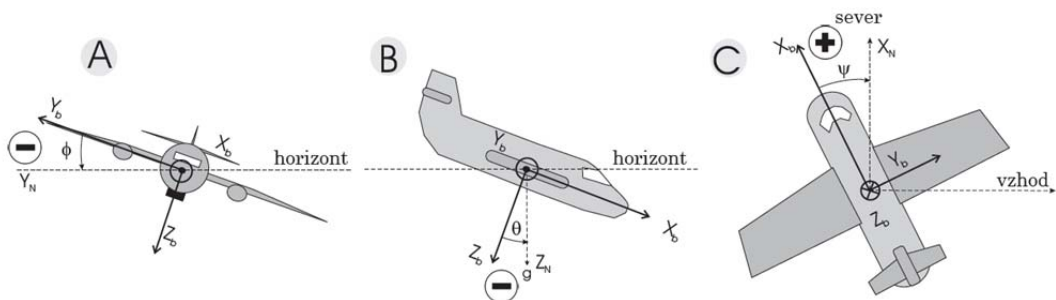
Vektor \vec{r}_{KAL} je določen v postopku kalibracije snemalnega sistema, vektor \vec{r}_{GNSS} se na določen časovni interval meri v času snemanja in predstavlja položaj GNSS antene na krovu plovila glede na referenčno GNSS postajo na površju Zemlje (položaj se določi na osnovi metode diferencialnega GNSS), vektor \vec{r}_{LS} pa določimo iz dolžine, ki jo izračunamo iz merjenega časa potovanja žarka, in usmeritve laserskega žarka od skenerja do točke na površju Zemlje. Ob poznanih vseh treh vektorjih lahko določimo vektor \vec{r}_T , ki določa položaj točke na površju v koordinatnem sistemu, v katerem se izvajajo GNSS meritve. Za prehod v državni ali kakšen drug referenčni koordinatni sistem je potrebna še transformacija koordinat.

Ker je princip aerolaserskega skeniranja, kinematičen postopek, slika 1 pa prikazuje le en časovni trenutek, je potrebno, da poleg prostorske usklajenosti posameznih sistemov zagotovimo tudi zelo natančno časovno usklajenost. Časovna sinhronizacija in interpolacija posameznih meritev je dosežena na osnovi PPS signala (angl. Pulse Per Second), ki ga zagotavlja GNSS sistem. Ta sproži začetek štetja časa na uri laserskega skenerja in IMU sistema. Ob znanih časovnih trenutkih registracije (angl. Time Stamps) se lahko opazovanja posameznih sistemov med seboj uskladijo ter uporabijo za rekonstrukcijo trajektorij leta (Vosselman in Maas, 2010).

Po izvedenem postopku aerolaserskega skeniranja imamo na razpolago tri vrste podatkovnih nizov, in sicer (Vosselman in Maas, 2010):

- kalibracijske podatke in podatke referenčne GNSS postaje,
- podatke položaja in orientacije posameznih naprav snemalnega sistema v prostoru (GNSS in IMU) v določenih časovnih trenutkih,
- notranje parametre skeniranja, merjene dolžine in notranje kote glede na hod skenerja.

Podatki GNSS in IMU so potrebni za rekonstrukcijo trajektorij leta, ki jih potrebujemo za določitev položaja točk. Za določitev položaja faznega centra antene GNSS s primerno natančnostjo, uporabimo metodo diferencialnega GNSS. Podatki IMU podajajo spreminjanje orientacije (smeri) plovila v treh koordinatnih oseh: nagib ϕ , naklon θ in zasuk ψ . Slika 2 prikazuje vsako izmed sprememb smeri, označeni pa so tudi predznaki, ki so pomembni pri upoštevanju posameznega kota pri kasnejših izračunih (Triglav Čekada, 2009).



Slika 2: Podatki IMU: A) nagib ϕ B) naklon θ C) zasuk ψ (Prirejeno po: Triglav Čekada, 2009)

Na osnovi vseh treh podatkovnih nizov lahko izračunamo prostorske koordinate vsake posamezne točke v oblaku točk. Glede na želeno uporabo podatkov in izdelke izvedemo nadaljnje postopke obdelave, kot so filtriranje, segmentacija, klasifikacija oblaka točka in modeliranje. Med izvedbo laserskega skeniranja se za namene klasifikacije oblaka točk beležijo tudi drugi atributni podatki (npr. red odboja in intenziteta) (Vosselman in Maas, 2010).

3 DIGITALNI MODEL RELIEFA

Zemeljsko površje (relief, teren) je kompleksna ploskev, ki jo v digitalni obliki predstavlja digitalni model reliefa (DMR). Za opredelitev DMR-ja lahko uporabimo različne strukture podatkov, ploskev reliefa pa ustvarimo šele z modeliranjem teh podatkov. Struktura podatkov je lahko v obliki enakomerno ali neenakomerno razporejenih točk, katerih višine se ujemajo s površjem Zemlje ter ne vključujejo vegetacije in drugih objektov, ki niso del reliefa. Za zajem podatkov reliefa lahko uporabimo različne tehnologije in metode. Za izdelavo visokokakovostnih DMR-jev se v zadnjem času veliko uporabljata aerolasersko skeniranje ter bližnjelikovni fotogrametrični zajem z brezpilotnimi letalniki (slednji predvsem za manjša območja). Ocenjo kakovosti, ki zajema natančnost, popolnost in gostoto točk, lahko obravnavamo glede na oblak točk ali izveden DMR. V praktičnem delu te diplomske naloge bomo kakovost ocenjevali za izdelan DMR. Oblak točk predstavlja originalen podatek laserskega skeniranja, njegova kakovost je odvisna od samega načina zajema podatkov in njegovih parametrov. Oblak točk je vreden podatek za izdelavo DMR-ja, na kakovost katerega dodatno vplivajo postopki filtriranja in klasifikacije, redčenje točk in interpolacija točk v rastrsko strukturo. Predvsem na območjih vegetacije in grajenih objektov se lahko zgodi, da nimamo dovolj velike gostote zajetih točk oziroma so lahko celo večje površine brez podatkov, zato DMR na teh mestih ne bo ustrezal dejanskemu stanju (EuroSDR, 2011).

V splošnem ločimo kakovost določitve položaja točk na ploskvi DMR-ja na višinsko in horizontalno komponento. Natančnost višin je v veliki meri odvisna od nagiba terena in gostote razporeditve točk na terenu, na katero vpliva hitrost skeniranja in višina leta. Natančnost določitve horizontalnega položaja pa je odvisna od višine leta, kakovosti kalibracije sistema in podatkov IMU. Razvoj skenerjev je do danes omogočil, da se dosegajo vse boljše natančnosti, in sicer v tehničnih podatkih laserskega skenerja, ki je bil uporabljen pri obravnavanem laserskem skeniranju, navajajo natančnost $\sigma = 2$ centimetra (RIEGL, 2015).

V praksi se kakovost digitalnih modelov preverja s kontrolnimi točkami, katerih natančnost določitve mora biti veliko boljše od samih podatkov laserskega skeniranja. Če gledamo predvsem statistično, moramo koordinate kontrolnih točk določiti z vsaj trikrat boljše natančnostjo kot je natančnost metode, ki jo preverjamo. Število kontrolnih točk ni nujno zelo veliko, morajo pa biti čim bolj enakomerno razporejene po območju. Za njihov zajem se po navadi uporabijo klasične geodetske metode (polarna metoda izmere), natančnejše GNSS metode izmere in niveliranje. Iz razlike višin med točkami DMR-ja in kontrolnimi točkami izračunamo statistične mere, kot sta koren srednjega kvadratnega pogreška RMSE (angl. Root Mean Square Error) in standardni

odklon σ (preglednica 1). V primeru primerjave točk modela in kontrolnih točk, ki so podane v referenčnem koordinatnem sistemu, govorimo o absolutni točnosti (EuroSDR, 2011).

Mera za natančnost oziroma σ predstavlja višinsko odstopanje točk DMR-ja glede njihovo srednjo vrednost μ . Mera za točnost, RMSE, pa je določena na osnovi razlik višin Δh med višinami točk DMR-ja h_{DMR} in višinami kontrolnih točk h_{REF} (Pavlovčič Prešeren in sod., 2015).

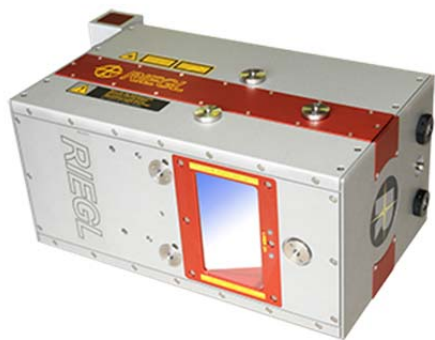
Če so odstopanja višin točk statistično normalno porazdeljena, se lahko kakovost višin DMR-ja določi na osnovi statističnih mer razpršenosti z uporabo enačb, zapisanih v preglednici 1. V praktičnem delu diplomske naloge smo za kontrolne točke izračunali RMSE in σ . Prag grobih pogreškov predstavlja trikratno vrednost izračunanega RMSE. V primeru, da se v postopku ugotovi, da je prisotnih veliko grobih pogreškov, in če porazdelitev pogreškov ni normalna, se uporabijo robustne ocene natančnosti, kot je recimo mediana (EuroSDR, 2011).

Preglednica 1: Mere za oceno natančnosti višin pri normalni porazdelitvi odstopanj (Vir: Pavlovčič Prešeren in sod., 2015)

Število kontrolnih točk	n
Odstopanja višin	$\Delta h = h_{DMR} - h_{REF}$
Koren srednjega kvadratnega pogreška	$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta h^2}{n}}$
Srednja vrednost odstopanj	$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i$
Standardni odklon	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \mu)^2}$
Prag grobih pogreškov	$ \Delta h \geq 3 \cdot RMSE$

4 IZVEDBA MERITEV, INSTRUMENTARIJ IN TEHNIČNI PARAMETRI

Podatki, potrebni za izdelavo diplomske naloge, so bili v večini predhodno pridobljeni, in sicer aerolasersko skeniranje se je izvedlo na dan 11. 8. 2014, terenske meritve s tahimetrom pa so potekale na dan 15. 7. 2015. Izmera je bila izvedena za izbrano testno območje v Radovljici, kjer je bil za zajem oblaka točk uporabljen helikopter z nameščenim laserskim skenerjem Riegl LMS-Q780, za izmero koordinat kontrolnih točk pa tahimeter Leica TCRP1201+.

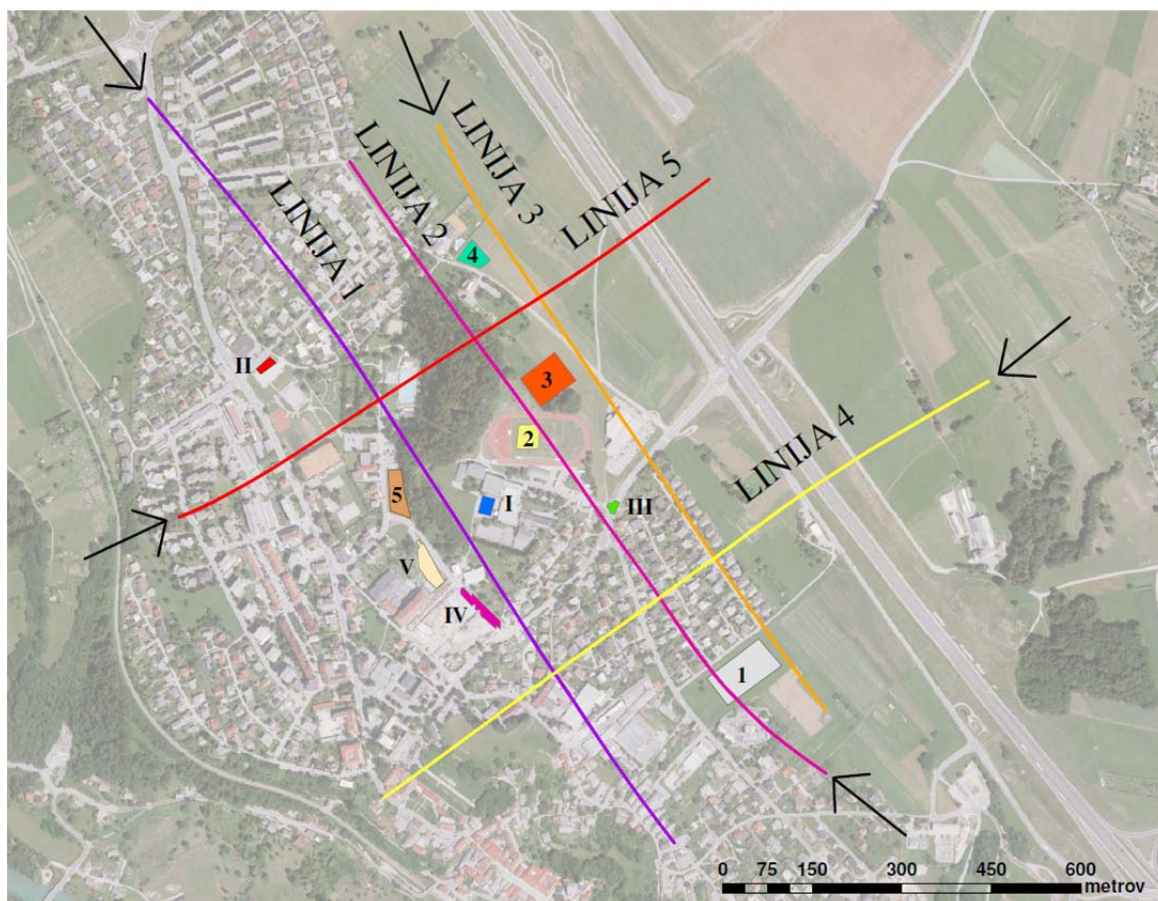


Slika 3: Laserski skener Riegl LMS-Q780 (www.riegl.com) Slika 4: Leica TCRP1201+ (www.leica.com)

Prednost uporabe teh podatkov, predvsem aerolaserskega skeniranja, je ta, da so bili ti zajeti na osnovi predhodno določenih tehničnih parametrov laserskega skeniranja za zagotavljanje najboljše kakovosti, za namene akademskih študij. Ti podatki omogočajo preučevanje vplivov posameznih elementov geometrije ob uporabljenem visoko kakovostnem laserskem skenerju.

4.1 Testno območje

Za testna območja je bilo izbranih 5 travnikov in 5 asfaltnih površin, kakor prikazuje slika 5. Območja travnikov so označena s poligoni in vpisanimi arabskimi številkami, asfaltne površine pa so označene s poligoni in pripisanimi rimskimi številkami. Osnovni podatki posameznega obravnavanega območja so zbrani v preglednici 2. Zraven zapisanega v preglednici je potrebno omeniti tudi to, da ima vsak izmed travnikov svoje specifikacije in značilnosti, in sicer razlika območij travnikov je v višini vegetacije in obliki terena. Tako obravnavan travnik 2 leži na območju nogometnega igrišča, kjer je trava enakomerno pokošena do višine nekaj centimetrov, teren pa je relativno raven, travnika 1 in 4 predstavljata območje s pravkar pokošeno travo z višino do 10 centimetrov in travnika 3 in 5 območje visoke trave, ki seže tudi do višine 40 centimetrov. Te razlike v višini vegetacije so dovolj velike za ugotavljanje velikosti posameznih vplivov na končne rezultate. Območja asfaltnih površin predstavljajo območja cestišč in parkirišč znotraj mesta, ta pa so relativno ravna in med seboj podobnih značilnosti.

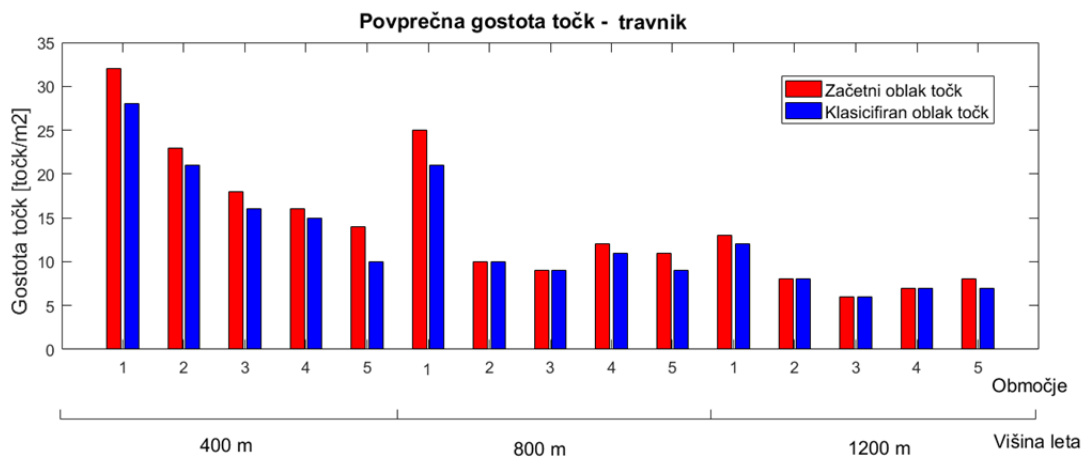


Slika 5: Izris trajektorij letov in območij travnikov ter asfaltnih površin na ortofotu (vir: Geodetska uprava RS)

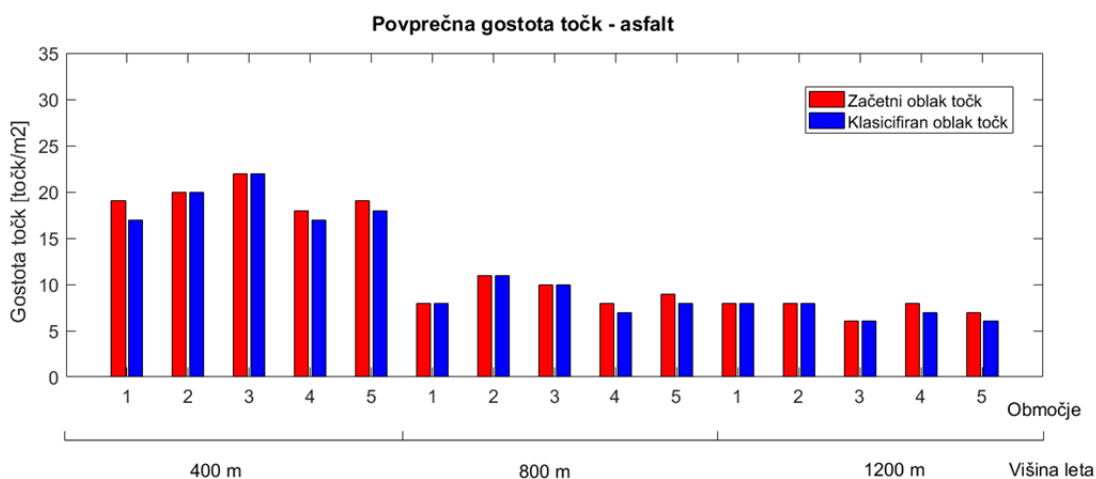
Preglednica 2: Osnovni podatki obravnavanih območij

Območje		Površina [m ²]	Število kontrolnih točk
Travnik	1	3180	33
	2	1461	38
	3	4288	35
	4	1371	35
	5	1951	35
Asfalt	I	648	36
	II	389	34
	III	290	34
	IV	1189	34
	V	1676	36

V preglednici 2 so zapisani podatki o površinah in številu kontrolnih točk za vsa obravnavana območja. Za vsako posamezno območje je bilo izmerjenih med 33 in 38 kontrolnih točk. Obravnavana območja so različnih velikosti, največje meri 4288 m² (Travnik 3) in najmanjše 290 m² (Asfalt III).



Slika 6: Povprečne gostote točk glede na območje travnika in višino leta



Slika 7: Povprečne gostote točk glede na območje asfalta in višino leta

Glede na višino leta skeniranja so na slikah 6 in 7 predstavljeni podatki povprečnih gostot točk za vsako območje travnika in asfalta. Grafa prikazujeta gostote točk za začetni oblak točk, ki je zgolj obrezan in še neobdelan, ter klasificiran oblak točk, ki vsebuje le še talne točke in je vhodni podatek za izdelavo DMR-ja (podpoglavje 5.2). Izračun števila točk smo izvedli s programom LASinfo, ki je en izmed orodij programskega paketa LAStools (www.rapidlasso.com/lastools). Na osnovi poznane površine smo izračunali povprečno gostoto točk. Iz grafov je razvidno, da gostota točk z višino laserskega skeniranja upada, in sicer največji padec gostote točk je pri prehodu iz višine 400 metrov na 800 metrov, med tem ko ta pri prehodu na 1200 metrov ni tako velik. Prav tako lahko opazimo, da se je gostota točk s postopkom klasifikacije zmanjšala ali ostala enaka. Zmanjšanje gostote je predvsem opazno pri območjih travnikov, kjer je odbojna ploskev bolj razgibana in je odboj žarka lahko rezultat odbojev tudi od travnih bilk. S postopkom

klasifikacije smo ne-talne točke odstranili, zaradi česar se je gostota zmanjšala, in sicer največ za 4 točke/m² (območje travnika 1 pri višinah 400 in 800 metrov). Pri asfaltnih površinah so vrednosti gostot obeh oblakov točk primerljive zaradi manj razgibanega terena. Izračunana povprečna gostota točk za klasificiran oblak točk, ki je osnova za nadaljnjo obdelavo, za višino skeniranja 1200 metrov je 8 točk/m², za višino skeniranja 800 metrov je 10 točk/m² in za višino skeniranja 400 metrov 18 točk/m². Res je, da bi se ekonomičnost laserskega skeniranja ob višji višini leta povečala, vendar na račun manjše gostote točk in posledično verjetno slabše kakovosti DMR-ja.

4.2 Lasersko skeniranje območja in terestrična izmera

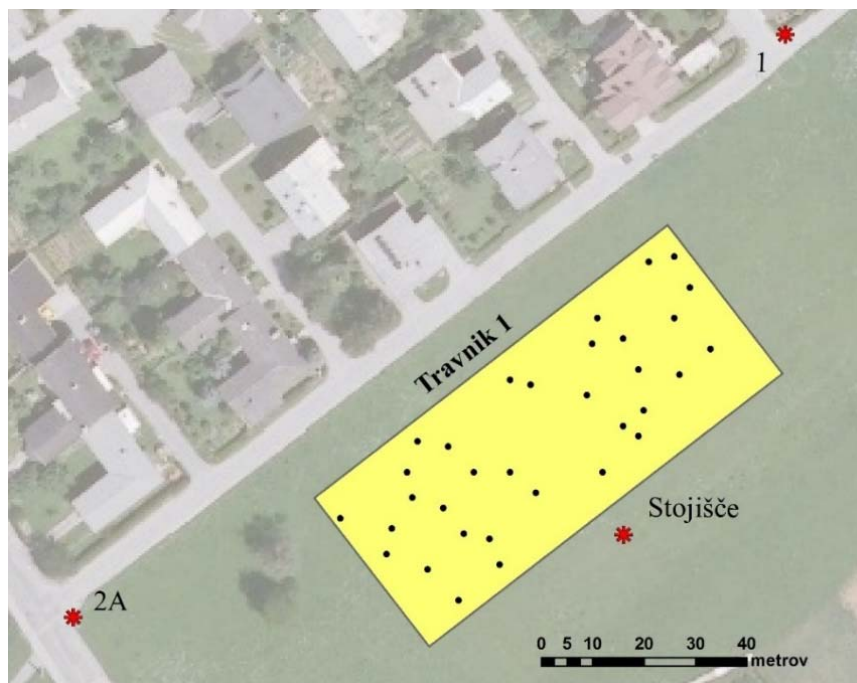
Na sliki 5 so, poleg položajev območij, prikazane tudi linije preletov oziroma trajektorij leta helikopterja ob aerolaserskem skeniranju. Pri podatkih o trajektorijah leta gre za ogromno množico točk, saj imamo podatek o položaju snemalnega sistema za vsakih 0,004 sekunde oziroma za približno vsakih 10 centimetrov leta. Na prikazu so se pri tako majhnem merilu točke združile v enotno linijo. Prikazan je zgolj primer petih linij izmed 15, kjer imajo vse naslednje enako geometrijo, razlika pa je zgolj v višini leta nad terenom. Linije od 1 do 5 potekajo na višini 1200 metrov, linije od 6 do 10 na višini 800 metrov in linije od 11 do 15 na višini 400 metrov nad terenom. S puščicami so za vsako posamezno linijo označene smeri poteka preleta za višino 1200 metrov.

Na vseh desetih območjih so bile, kot že omenjeno, terensko izmerjene kontrolne točke, na osnovi katerih smo ocenili višinsko točnost DMR-ja. Vse meritve kontrolnih točk s tahimetrom smo izvajali na nivoju terena oziroma delovišča. Ker je geodetska mreža izravnana na nivoju elipsoida WGS84, je bilo pri izračunu koordinat točk potrebno vsa opazovanja popraviti za vpliv težnostnega polja Zemlje, za vpliv geometrije elipsoida ter za projekcijske popravke. V celotnem postopku obdelave so vse koordinate bile podane v koordinatnem sistemu D96/TM v zapisu (n, e, h), tako kontrolne točke, kot tudi oblaki točk laserskega skeniranja. Za zagotovitev čim boljše kakovosti podatkov, smo uporabili izvoren podatek o višini, t.j. elipsoidne višine.

Za območje Radovljice je bila v predhodni diplomski nalogi (Ozmec, 2015) v omenjenem koordinatnem sistemu že vzpostavljena geodetska mreža. Geolokacija geodetske mreže, ki je bila izmerjena v lokalnem koordinatnem sistemu, se je izvedla s 7-parametrično transformacijo osnovi 8 veznih točk, določenih s statično izmero GNSS (Ozmec, 2015).

Vse koordinate kontrolnih točk, ki smo jih uporabili v nalogi, so bile izmerjene z navezavo na obstoječo geodetsko mrežo. Koordinate stojišča smo določili z notranjim urezom z izvedbo

meritev (horizontalna smer, zenitna razdalja in poševna dolžina) na vsaj dve točki geodetske mreže. Terenska izmera kontrolnih točk je sledila aerolaserskemu skeniranju, zato smo si lahko predhodno izdelali DMR, in sicer na osnovi interpolacije oblaka točk v rastrsko obliko. Kontrolne točke so bile za posamezno območje izbrane naključno v že izdelanih DMR-jih (pri travnikih DMR 1 in pri asfaltih DMR 0,5) vseh območij z uporabo funkcije *rand* v programu Matlab. Položaj posamezne kontrolne točke smo najprej zakoličili s točnostjo 2-3 centimetre, nato pa zakoličeni točki z metodo trigonometričnega višinomerstva izmerili višino. Prednost izbrane metode izmere kontrolnih točk je, da v postopku primerjave višin ni potrebno izvajati interpolacije. Slika 8 prikazuje položaje točk obstoječe geodetske mreže 1, 2A in vzpostavljenegega stojišča, ki so bili osnova pri zakoličbi položaja in izmeri višin kontrolnih točk območja travnika 1.



Slika 8: Prikaz območja Travnika 1 s kontrolnimi točkami in točkama geodetske mreže (vir: Geodetska Uprava RS)

Natančnost koordinat uporabljenih točk geodetske mreže (1 in 2A) je bila boljša od 2 milimetrov (Ozmec, 2015). Glede na natančnosti uporabljenega instrumentarija in koordinat točk geodetske mreže, so ocenjena natančnosti koordinat posameznih kontrolnih točk vseh območij travnikov in asfaltnih površin med 4,8 in 5,6 milimetrov. V primerjavi z natančnostjo laserskega skeniranja, ki jo navaja proizvajalec in znaša 20 mm, lahko ugotovimo, da je ocenjena natančnost koordinat kontrolnih točk vsaj trikrat boljša od natančnosti položaja posamezne točke v oblaku točk aerolaserskega skeniranja (Ozmec, 2015 in RIEGL, 2015).

Preglednica 3 vsebuje koordinate vseh kontrolnih točk (n, e, h) za območje travnika 1.

Preglednica 3: Primer koordinat kontrolnih točk območja 1 travnika

Št. točke	n [m]	e [m]	h_{REF} [m]	Št. točke	n [m]	e [m]	h_{REF} [m]
1	134110,500	436845,500	539,587	18	13412,500	436903,500	539,638
2	134103,500	436854,500	539,492	19	134128,500	436900,500	539,675
3	134108,500	436855,500	539,569	20	134131,500	436904,500	539,697
4	134100,500	436862,500	539,522	21	134134,500	436893,500	539,696
5	134094,500	436868,500	539,510	22	134136,500	436882,500	539,752
6	134101,500	436876,500	539,552	23	134137,500	436878,500	539,773
7	134106,500	436874,500	539,589	24	134149,500	436895,500	539,861
8	134112,500	436865,500	539,625	25	134144,500	436894,500	539,822
9	134114,500	436859,500	539,611	26	134145,500	436900,500	539,862
10	134119,500	436858,500	539,638	27	134139,500	436903,500	539,740
11	134125,500	436860,500	539,682	28	134138,500	436911,500	539,745
12	134124,500	436866,500	539,660	29	134143,500	436917,500	539,726
13	134119,500	436871,500	539,671	30	134149,500	436910,500	539,822
14	134119,500	436878,500	539,657	31	134155,500	436913,500	539,861
15	134115,500	436883,500	539,626	32	134161,500	436910,500	539,913
16	134119,500	436896,500	539,604	33	134160,500	436905,500	539,920
17	134107,500	436869,500	539,576				

4.3 Uporabljena oprema in tehnični parametri laserskega skeniranja

Pri aerolaserskem skeniranju je bil uporabljen laserski skener Riegl LMS-Q780, in sicer njegovi osnovni tehnični podatki so zbrani v preglednici 4. Gre za inštrument višjega cenovnega in kakovostnega razreda, namenjenega zajemu podatkov razgibanega terena, ki zaradi napredne tehnologije med drugim omogoča skeniranje na velikem razponu višin letenja.

Preglednica 4: Osnovni tehnični podatki laserskega skenerja Riegl LMS-Q780 (Vir: www.riegl.com)

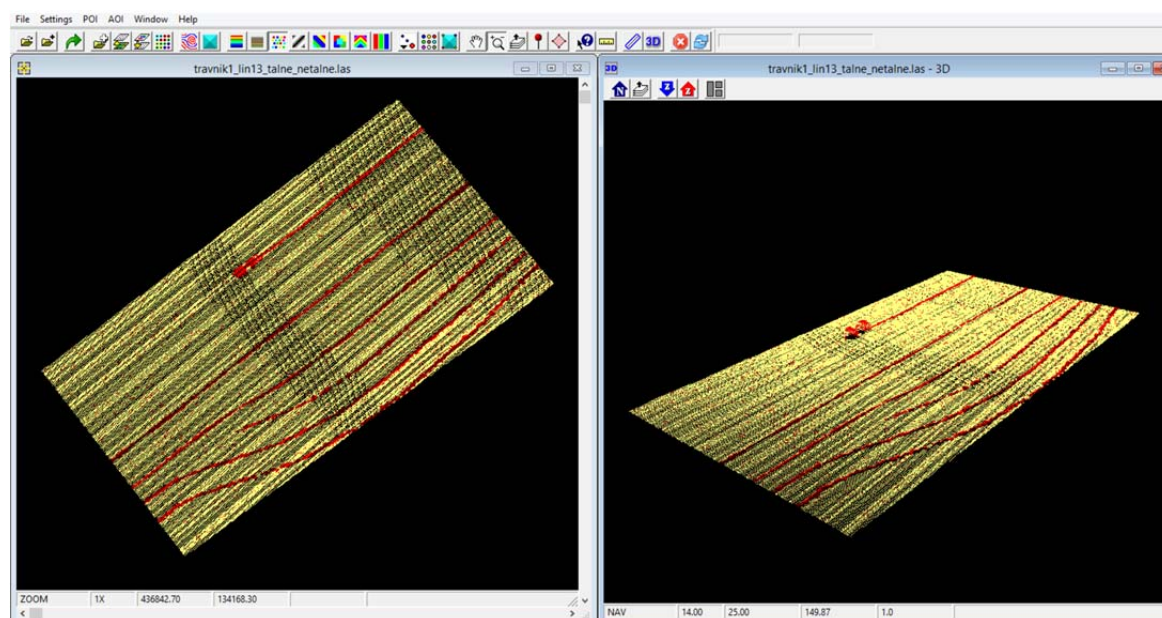
Najmanjša/največja višina skeniranja	50 m/5800 m	
Natančnost in točnost položaja posamezne točke v oblaku	20 mm	
Hitrost skeniranja	200 linij/sekundo	
Vidno polje	± 30°	
Valovna dolžina laserja	Bližnja infrardeča	
Divergenca laserskega žarka	0,25 mrad	
Premer odtisa laserskega žarka na tleh pri izbrani višini	400 m	10 cm
	800 m	20 cm
	1200 m	30 cm
Frekvenca ponovitve impulza	do 400 kHz	

5 OBDELAVA PODATKOV

5.1 Programska oprema

Dandanes so na trgu dostopni različni programi, ki so namenjeni prikazovanju in obdelavi oblakov točk laserskega skeniranja, nekateri od teh pa so prosto dostopni na medmrežju. Za začetni in tudi sproten pregled podatkov in rezultatov smo uporabili brezplačen program FugroViewer (www.fugroviewer.com), ki je namenjen pregledu rastrskih in vektorskih prostorskih podatkovnih nizov. V njem lahko pregledujemo oblake točk glede na različne lastnosti, in sicer glede na razrede klasifikacije, višino, intenziteto odboja, zaporedje pasu snemanja, datoteko, v kateri so podatki shranjeni in število ter zaporedje odbojev od vsakega oddanega laserskega impulza.

Primer prikaza uporabe pregledovalnika FugroViewer, kjer so točke obarvane glede na razred klasifikacije, prikazuje slika 9. Na sliki je prikazano območje travnika 1, snemalnega pasu 13, kjer so z rdečo barvo obarvane točke, ki spadajo v ne-talne točke ter z rumeno barvo talne točke. V tem primeru gre za trenutek spravila pokošene trave oziroma baliranje, kjer lahko iz oblaka točk zelo lepo razberemo obris traktorja in zgrabkov. Na levem delu slike je prikaz v 2D, na desnem delu pa v 3D pogledu.



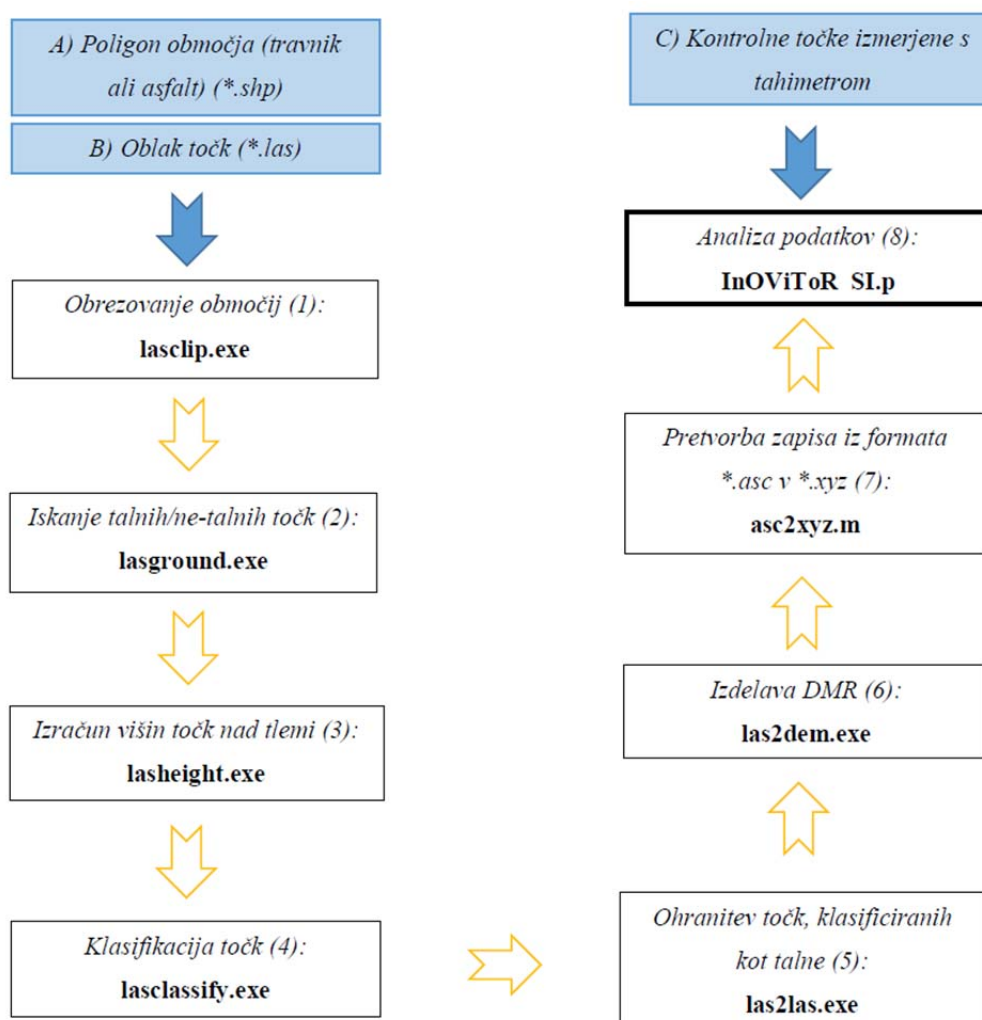
Slika 9: Odprto okno v pregledovalniku FugroViewer

V postopku obdelave smo uporabili programski paket LAStools (www.rapidlasso.com/lastools), ki predstavlja zbirko različnih orodij za obdelavo oblakov točk. Gre za visoko učinkovita orodja,

kjer se posamično orodje lahko uporablja samostojno ali pa kot funkcija v spisani enostavni tekstovni programski datoteki s skripto oziroma zagonski datoteki (angl. batch file). Ob uporabi je potrebno poznati posamezne parametre in nastavitve, ki se lahko definirajo ob izvedbi posameznega koraka obdelave. Prednost je tudi ta, da je delovanje programskega paketa in obdelave velikih podatkovnih nizov izvedljivo tudi ob minimalnih tehničnih specifikacijah razpoložljive strojne opreme.

5.2 Potek obdelave podatkov

Posamezni koraki postopka obdelave podatkov in uporabljena orodja so predstavljeni v shemi na sliki 10. Oblaki z vhodnimi podatki so obarvani z modro barvo. Podrobni opisi in razlage vsakega od osmih korakov so podani v nadaljevanju.



Slika 10: Shema postopka obdelave podatkov

Iz slike 10 je razvidno, da imamo na začetku dva vhodna podatka, in sicer na osnovi poligonov območij smo iz posameznih oblakov točk snemalnih pasov izrezali območja (1). Tako smo dobili

oblake točk območij za vsak posamezen prelet, kjer pa vsako območje ni bilo skenirano v vsakem preletu. V naslednjem koraku smo točke klasificirali na talne in ne-talne, na osnovi nastavljenih parametrov (2). Uporabljeni parametri so določali natančnost zapisa (*step*), odstranitev osamelcev v oblaku točk zaradi večpotja ali odboja od ptic (*spike*) in določitev največjega odmika od predvidenega nivoja terena, ki bo še zmeraj vključeval talne točke (*offset*).

V naslednjem koraku (3) smo vsaki točki oblaka izračunali višino nad tlemi in nato vse točke klasificirali glede na posamične razrede (4), pri tem smo uporabili parametra iskanja skupine točk, ki predstavljajo strehe (*planar*) in drevesa (*rugged*). Ti dve nastavitvi prideta do najboljšega izraza pri bolj razgibanem terenu in nam pomagata tvoriti regije na osnovi iskanja sosednjih točk. V našem primeru pa sta bili uporabni pri klasifikaciji točk na traktorju in zgrabkih sena, kakor je razvidno iz slike 9, saj je bilo pomembno, da so te točke klasificirane kot ne-talne. V naslednjem koraku smo ohranili zgolj točke s pripisanim razredom 2 (*keep class*), kar je oznaka za talne točke (5), ostali razredi klasifikacije pa za nas niso več pomembni. Sledila je izdelava DMR-ja v rastrski obliki (6), kjer je izhodna datoteka zapisana v formatu ASCII. Sledila je pretvorba v za nas bolj uporabno datoteko *.xyz (7), kjer so za vsako posamezno točko v isti vrstici zapisane njene koordinate (n, e, h).

V zadnjem koraku (8), ki je na shemi prikazan z odebeljenim okvirjem, smo kot vhodni podatek uporabili še kontrolne točke, na osnovi katerih smo za vsa območja izvedli analizo kakovosti modela reliefa. V tem koraku smo lahko zaznali in odstranili morebitne grobe pogoške, da ne bi vplivali na naše končne rezultate. S postopkom analize, izvedene na osnovi odstopanj višin, smo prišli do nam želenih rezultatov, in sicer osnovnih mer statistične razpršenosti, to sta RMSE in σ .

Primer zapisa zagonske datoteke (*.bat), kjer so zapisani vsi zgoraj opisani koraki obdelave:

```
REM Izreži oblak točk za poligon in jih zapiši v *.las datoteko
lasclip -i linija_1.las -poly obmocjel.shp -o obml_lin1.las.las

REM Iskanje talnih/ne talnih točk
lasground -i obml_lin1.las -o obml_lin1_tal_netal.las -extra_fine -step 0.5
-spike 0.1 -offset 0.1

REM Izracun visine točk nad tlemi
lasheight -i obml_lin1_tal_netal.las -o obml_lin1_visine.las

REM Klasifikacija lidarskih točk
lasclassify -i obml_lin1_visine.las -o obml_lin1_klas.las -planar 0.5 -rugged 0.1

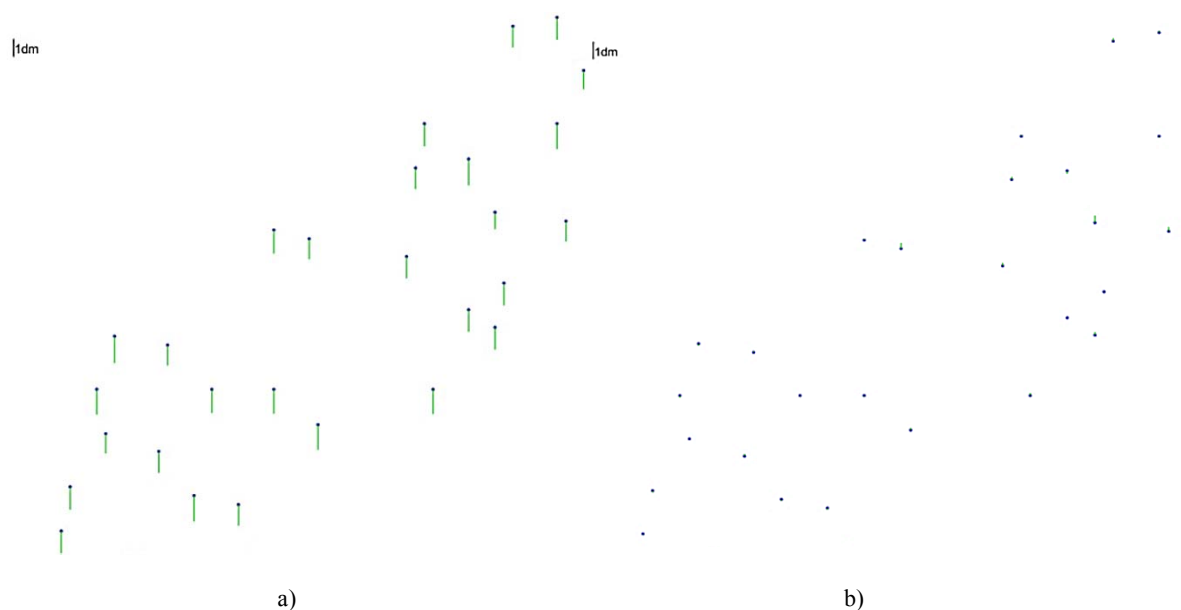
REM Obdrži le točke, klasificirane kot tla
las2las -i obml_lin1_klas.las -keep_class 2 -o obml_lin1_klas2.las

REM Ustvari in izvozi DMR
las2dem -i obml_lin1_klas2.las -o obml_lin1_DMV.asc -rescale 0.001 0.001 0.001 -step 1

pause
```

5.3 Pregled podatkov in analiza

Obdelava podatkov za vsako testno območje (5 območij travnika in 5 območij asfaltnih površin) je bila po prej opisanem postopku (podpoglavje 5.2) ponovljena štirikrat. In sicer, znotraj vsake površine smo obravnavali dva podatkovna niza (posamezen oblak snemalnega pasu in združen georeferenciran oblak), za vsak niz smo računali RMSE in σ . Oblak snemalnega pasu je rezultat obdelave opazovanj skenerja, GNSS in IMU sistema, z upoštevanjem podatkov kalibracije; v bistvu je tu uporabljen postopek direktnega georeferenciranja. Postopek kalibracije obsega identifikacijo, modeliranje in ocenjevanje števila sistematičnih vplivov, povezanih s posameznimi sistemi laserskega skeniranja (laserskim skenerjem, GNSS in IMU sistemom), z namenom izboljšanja natančnosti podatkov. Združen georeferenciran oblak je izdelan s postopkom registracije snemalnih pasov in upoštevanjem položaja oslonilnih točk. V postopku registracije se posamezni oblaki snemalnih pasov združijo in izravnajo po metodi najmanjših kvadratov. Pri tem se upoštevajo tudi podatki kalibracije sistema, referenčne GNSS postaje ter diskretnih oslonilnih točk, ki so bile predhodno izmerjene na terenu (običajno z GNSS-RTK (angl. Global Navigation Satellite System-Real Time Kinematic) metodo izmere). Pomembno je, da se posamezni pasovi med seboj zadostno prekrivajo, kar omogoča prepoznavanje veznih točk med pasovi. Oslonilne točke materializirajo neke markantne točke oziroma detajle, najpogosteje so to robovi cestišč ali zeber pri prehodih čez cestišče in lomne točke streh (slemen). Pomembno je poudariti, da smo pri ugotavljanju razlik vseeno obravnavali posamezne snemalne pasove in ne celotnega združenega oblaka. Ta postopek, katerega rezultat sta dva različna podatkovna niza, je izvedlo podjetje, ki je opravilo snemanje (Vosselman in Maas, 2010).



Slika 11: Rezultat analize kakovosti DMR – razlike višin: a) oblak snemalnega pasu b) združen georeferenciran oblak

V postopku analize s programom InOViTOR_SI.p, avtorja asist. dr. Dejana Grigilla, so vmesni rezultati bili tudi izrisi, ki predstavljajo odstopanja višin podatkov laserskega skeniranja glede na podatke kontrolnih točk, izmerjenih s tahimetrom. Uporabljen program je bil izdelan na osnovi navodil za ocenjevanje kakovosti DMR-jev iz dokumentacije EuroSDR (EuroSDR, 2011).

Ker smo pri izmeri kontrolnih točk določili višine točkam mreže DMR-ja, v postopku ocenjevanja kakovosti ni bilo potrebno izvesti interpolacije višin, ampak smo lahko direktno primerjali h_{REF} z višinami modelnih točk. S tem smo zagotovili primernejšo osnovo za analizo, saj smo iz izračuna izključili vpliv ponovne interpolacije.

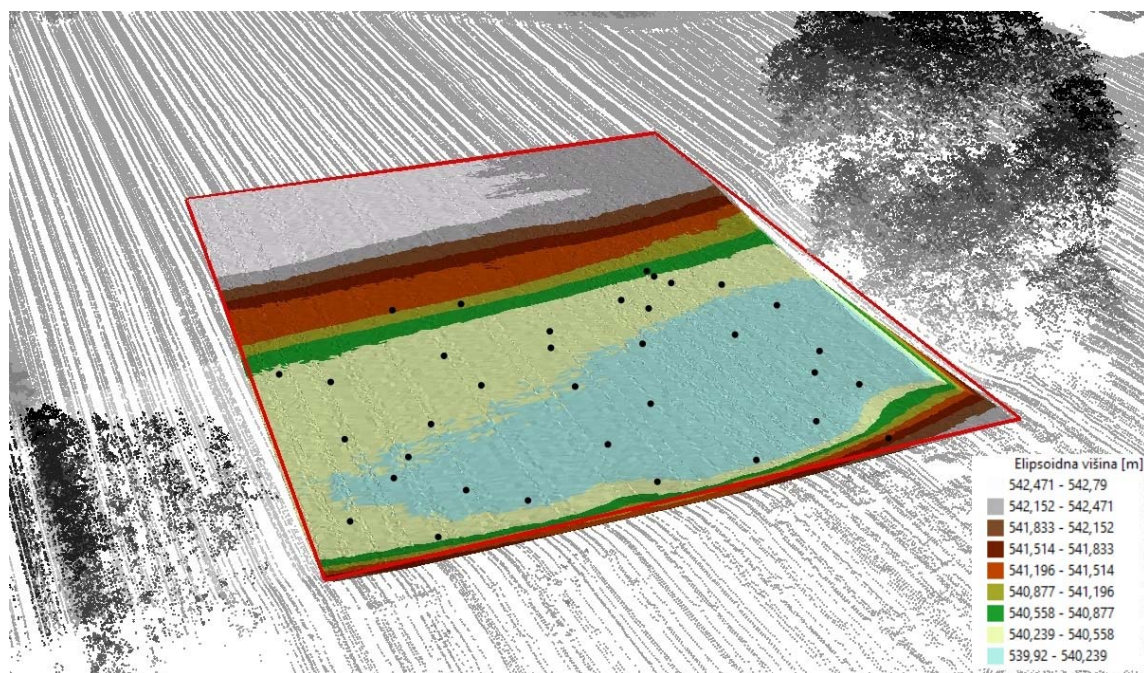
Preglednica 5: Primerjava mer razpršenosti za DMR-je oblaka snemalnega pasu in združenega georeferenciranega oblaka za travnik 3

Snemalni pas	DMR oblaka snemalnega pasu		DMR združenega georeferenciranega oblaka	
	σ [cm]	RMSE [cm]	σ [cm]	RMSE [cm]
1	2,81	10,78	1,93	1,93
2	2,53	10,34	2,37	2,40
3	3,45	11,95	2,04	2,17
4	3,82	15,12	3,31	3,47
5	3,62	14,84	2,28	2,34
6	2,91	13,15	1,79	2,08
7	2,68	15,07	2,91	2,87
8	2,93	10,35	2,00	1,98
9	2,91	8,19	2,17	2,15
10	3,19	8,27	2,01	1,99
11	2,72	11,95	1,97	1,96
12	2,78	15,15	2,70	2,76
13	2,88	14,43	3,00	3,06
14	/	/	/	/
15	3,44	14,01	3,48	3,48

Če torej primerjamo vsebino preglednice 5 ter slik 11 a) in b), kjer so predstavljeni rezultati za območje travnika 3, snemalni pas 6, lahko ugotovimo, da je DMR oblaka snemalnega pasu nižje od kontrolnih točk za dobrih 13 centimetrov. Za rezultate DMR-ja združenega georeferenciranega oblaka pa lahko ugotovimo, da smo s postopkom usklajevanja posameznih oblakov točk različnih trajektorij leta in upoštevanjem oslonilnih točk odpravili večji del sistematičnih vplivov. V tem

primeru so razlike v povprečju le še nekaj več kot 2 centimetra. Na sliki 11 je za lažjo inetrpretacijo kot merilo dodana dolžina 1 decimetra.

Za ponazoritev razlike vrednosti mer statistične razpršenosti za združene georeferencirane oblake in oblake snemalnih pasov sem izpostavil primer območja travnika 3 (preglednica 5). Geometrija skeniranja je bila v primeru preleta 14 taka, da območja travnika 3 glede na višino leta ter kot skeniranja ni dosegla. Vrednosti σ so v obeh podatkovnih nizih primerljivih vrednosti, kar je tudi pričakovano, saj je sama geometrija oblaka med postopkom ostala skoraj enaka. V primeru združenih georeferenciranih oblakov se je natančnost zaradi upoštevanja oslonilnih točk in registracije snemalnih pasov malo izboljšala, kar se odraža v nekoliko manjših vrednostih σ . Samo vrednost σ podaja proizvajalec laserskega skenerja med tehničnimi specifikacijami, in sicer ta znaša 2 centimetra, kar se v tem konkretnem primeru sklada z našimi rezultati. Vrednosti RMSE so v primeru oblakov snemalnih pasov dokaj visoke in zelo različne za različne trajektorije, in sicer od 8 do 15 centimetrov, v primeru združenih georeferenciranih oblakov pa so se znižale tudi do petkratne vrednosti, in sicer na približno vrednost 2 centimetrov. Sam RMSE vključuje vse sistematične in ostale pogreške, v veliki meri je vezan na kakovost določitve medsebojnega odnosa med sistemom za merjenje zasukov IMU in sistemom za satelitsko pozicioniranje GNSS. Ob izvedenem postopku georeferenciranja ob uporabi oslonilnih točk lahko ta vpliv sistematičnih pogreškov močno zmanjšamo in poenotimo za vse snemalne pasove, kar je lepo razvidno iz preglednice 5.



Slika 12: Prikaz območja travnika 3, preleta 6 z okolico

Vsebina slike 12 predstavlja območje travnika 3, ki je predstavljen z barvami, pojasnjenimi v dodani legendi, in sicer glede na elipsoidno višino točk. Izrisane so tudi kontrolne točke ter z rdečo črto rob območja, ki je služil za izrez območja iz oblaka točk. Okolica, ki nas v tem primeru ne zanima, je obarvana s sivo barvno lestvico. Na desni strani do samega območja sega grmičevje in drevje, del tudi nad samo območje. Slika 12 prikazuje le talne točke klasificiranega oblaka točk in ne vsebuje točk, ki so se odbile od drevja. Za lepši prikaz območja je bil izdelan način predstavitve TIN (angl. Triangulated Irregular Network), ki temelji na vektorski predstavitvi tridimenzionalnih koordinat. Iz slike je razvidna tudi smer leta, kar je moč razbrati iz same progaste strukture oblaka točk.

5.4 Izračun geometrijskih parametrov

Podatki o statističnih merah razpršenosti so nam iz prejšnjega postopka analize znani, dodatno je bilo potrebno izračunati še geometrijske parametre, v odvisnosti od katerih bomo nato rezultate lahko prikazali.

Za predstavitev odvisnosti σ od višine leta nad terenom je bilo potrebno najprej izračunati težišče koordinat kontrolnih točk za vsako območje posebej. Te koordinate težišča so nam služile za izračun najbližje oddaljenosti do točke v posamezni trajektoriji leta s katere je bilo neko območje poskenirano. Poznanim koordinatam najbližje točke v trajektoriji leta smo nato od višinske komponente odšteli višino težiščne točke tistega območja ter tako dobili višino leta laserskega skenerja nad terenom.

Ob poznani višini leta na terenom in poševni oddaljenosti točke v trajektoriji leta do težiščne točke območja na tleh smo lahko nato s preprosto enačbo kotnih funkcij izračunali posamičen kot, ki ga oklepata ti dve daljici. Tako smo dobili kot od nadirja, ki pa še ni bili dokončen, saj smo ga morali popraviti za vrednosti nagibov letala v trenutku zajema. Podatki orientacije helikopterja v prostoru (nagib, naklon in zasuk), ki jih beleži sistem IMU, so nam bili na voljo za vsako točko v trajektoriji leta. Glede na upoštevan predznak, ki je podan v poglavju 2, smo kotom prištevali in odštevali kote nagibov, ki so bili izmed treh naštetih za nas najpomembnejši ter so imeli med drugim na končen rezultat največji vpliv.

Prav tako je bilo potrebno izračunati oddaljenosti od težišča koordinat posameznega območja od referenčne GNSS postaje RADO v Radovljici za vsa obravnavana območja. Koordinate permanentne postaje so bile dostopne preko spletne strani omrežja Signal (www.gu-signal.si), podane so v starem državnem koordinatnem sistemu D48/GK. Za transformacijo je bila uporabljena spletna verzija programa SiTraNet (www.sitranet.si).

6 ANALIZA REZULTATOV

Na osnovi rezultatov analize s programom InOViTOR_SI in nadaljnje obdelave smo rezultate predstavili z grafi, in sicer obravnavali smo tri bistvene geometrijske vplive, ki so predstavljeni v treh sklopih. To so vpliv višine leta nad terenom, velikosti kota snemanja od nadirja ter oddaljenost od referenčne GNSS postaje, pri vseh treh smo tako ugotavljali razporeditev podatkov glede na izračunan σ in RMSE. Za izvedene izračune in izrise grafov je bil uporabljen programski paket Matlab (www.mathworks.com). Izrisali smo 10 grafov, ki so bili osnova za interpretacijo in ugotavljanje posameznih vplivov geometrije na višinsko komponento določitve položaja. Znotraj posameznega obravnavanega geometrijskega vpliva smo razlikovali med dvema površinama, travniki in asfalti, kjer so razlike v rezultatih občutne. Prav tako sta za vsako površino obravnavana dva podatkovna niza, oblak snemalnega pasu in združen georeferenciran oblak.

En izmed načinov predstavitve podatkov, kjer želimo ugotoviti ali sta dva tipa podatkov v medsebojni odvisnosti, je s pomočjo regresijske premice oziroma druge funkcije, ki se podatkom najboljše prilega. Izračunan koeficient korelacije ali brezdimenzijske mere linearne povezanosti lahko leži na intervalu $-1 \leq \rho \leq 1$. Če je vrednost koeficienta okrog vrednosti 0 pomeni, da je med spremenljivkama slaba linearna povezanost, če pa je ta blizu -1 ali 1 pa je ta linearna povezanost močno pozitivna ali negativna, kar pomeni, da sta dva tipa podatkov v medsebojni odvisnosti (Drobne, 2009).

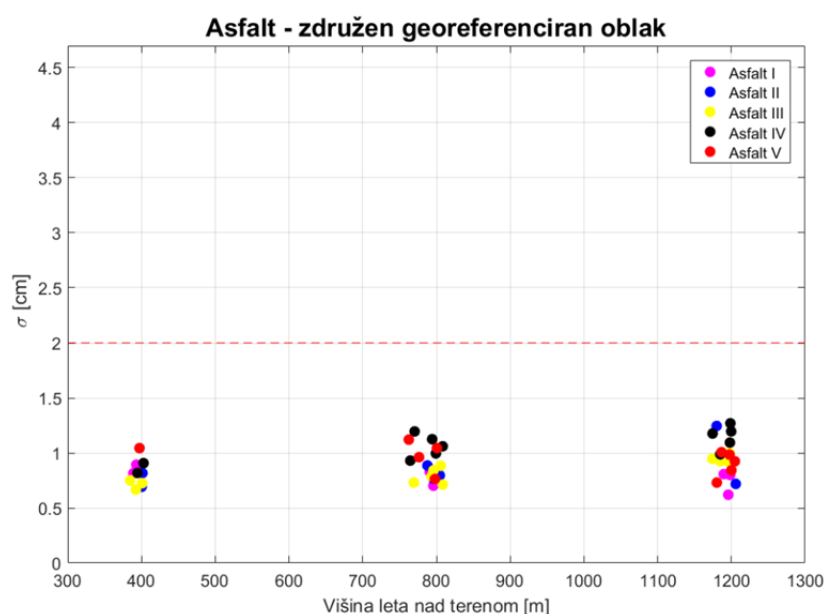
6.1 Vpliv višine leta

Primerjali bomo grafa s prikazom podatkov za asfaltne površine in travnike, kot prikazujeta sliki 13 in 14. Opazimo lahko, da je variacijski razmik (razlika med največjo in najmanjšo vrednostjo v vzorcu) pri travnikih veliko večji kot pri asfaltnih površinah, in sicer gre za preprosto razlago glede samih značilnosti posameznih travnikov. Kot prikazuje legenda, vsaka barva ustreza določenemu travniku. Razvidno je, da najnižji σ pripadajo travniku 2, kjer gre za območje nogometnega igrišča z nizko in enakomerno pokošeno travo. Na drugi strani imamo travnika 3 in 5, kjer je trava v času laserskega skeniranja segala tudi do 40 centimetrov visoko, temu ustrezajoči pa so tudi visoki σ , izmed vseh najvišji. σ travnikov 1 in 4 so nekje vmes, saj gre za pokošeno travo do višine 10 centimetrov.

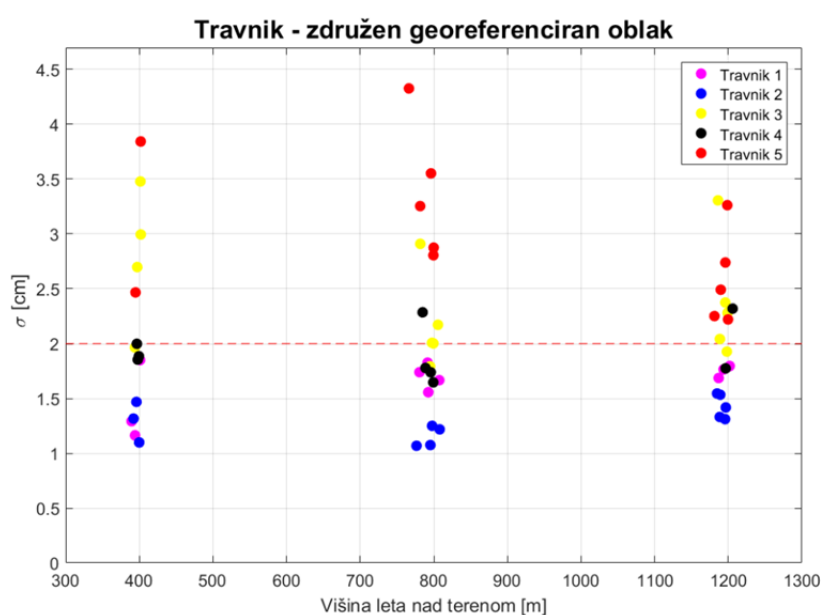
Iz tega lahko povzamemo, da višina trave oziroma prisotnost vegetacije močno vpliva na velikost σ in natančnost interpoliranih DMR-jev. Za primerjavo lahko vzamemo območja asfaltnih površin, kjer so ne glede na območje vsi σ približno enaki in se gibljejo okrog 1 centimetra, saj je podlaga ravna ter brez ovir, kot je recimo vegetacija na območjih travnikov. Na slikah 13 in 15

lahko tudi opazimo, da se variacijski razmik σ za asfalte povečuje z višino leta kar pomeni, da ima tudi sama višina leta vpliv na velikost σ , čeprav majhen.

Na vseh grafih v podpoglavju 6.1 je z rdečo prekinjeno črto označena tudi mejna linija pri vrednosti $\sigma = 2$ centimetra (natančnost, ki jo navaja proizvajalec laserskega skenerja). Stopnja zaupanja pri tem je σ , kar predstavlja 68,3% stopnjo zaupanja. Kot merilo za negotovost pa velikokrat uporabljamo merilo $3 \cdot \sigma$, kar pa predstavlja stopnjo zaupanja 99,7%, torej je v našem primeru vse, kar je znotraj 6 centimetrov, dober rezultat.

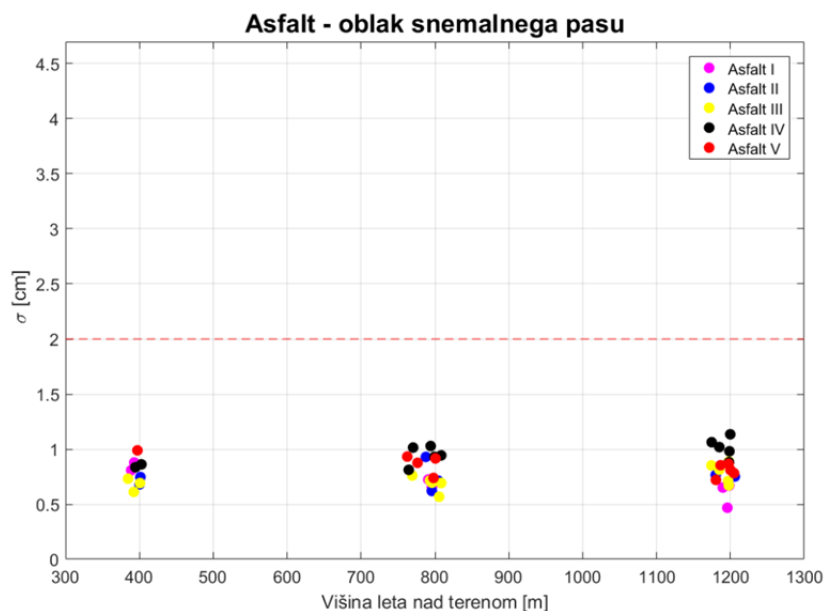


Slika 13: Odvisnosti σ od višine leta: asfalt – združen georeferenciran oblak

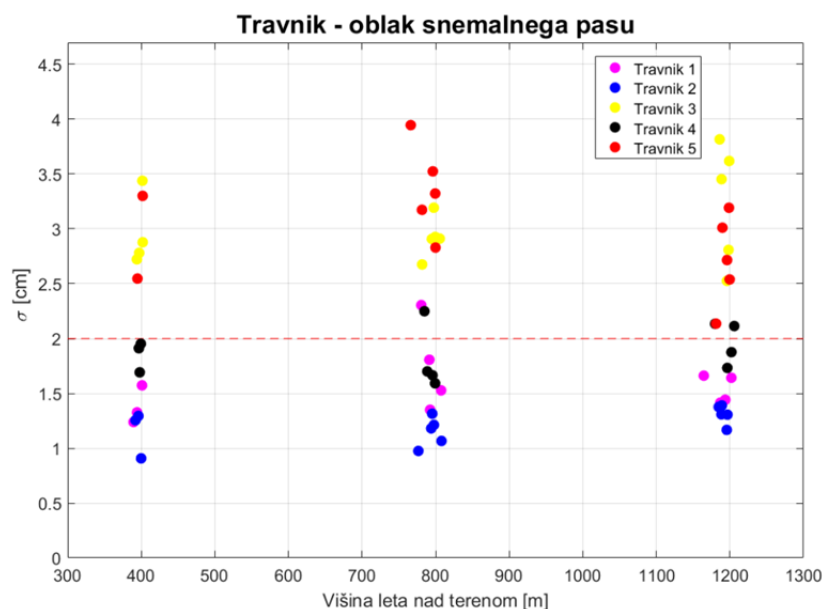


Slika 14: Odvisnosti σ od višine leta: travnik – združen georeferenciran oblak

Na slikah 15 in 16 sta izrisana še grafa za oblake snemalnih pasov, ki pa sta zelo podobna grafoma z rezultati obdelave združenih georeferenciranih oblakov na slikah 13 in 14. Predvidevamo, da σ ne vsebuje sistematične napake, saj se geometrija oblaka v postopku georeferenciranja ne spremeni, zato mora v obeh primerih podatkov njegova vrednost ostati približno enaka.



Slika 15: Odvisnosti σ od višine leta: asfalt – oblak snemalnega pasu



Slika 16: Odvisnosti σ od višine leta: travnik – oblak snemalnega pasu

Iz vseh grafov v tem podpoglavju je razvidno, da se večina vrednosti σ , tako na travniku, kot tudi asfaltu giblje pod označeno rdečo linijo, katere pomen je podan na začetku tega podpoglavja.

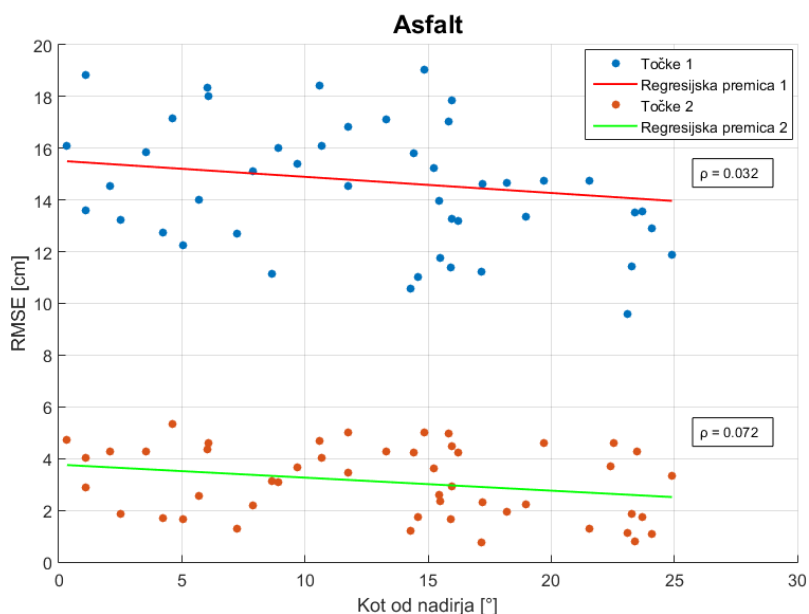
Najboljše natančnosti, se gibljejo okrog vrednosti 0,5 centimetra, kar pomeni, da smo ovrednotili podatke laserskega skeniranja z boljšo natančnost od predpisane za kar štirikrat. Razlog za to je velika množica točk v oblaku točk, dobra odbojna površina, uporabljen postopek izravnave ter popolnega georeferenciranja, ki skupaj omogočajo doseganje tudi boljše natančnosti od predpisane.

6.2 Vpliv kota od nadirja

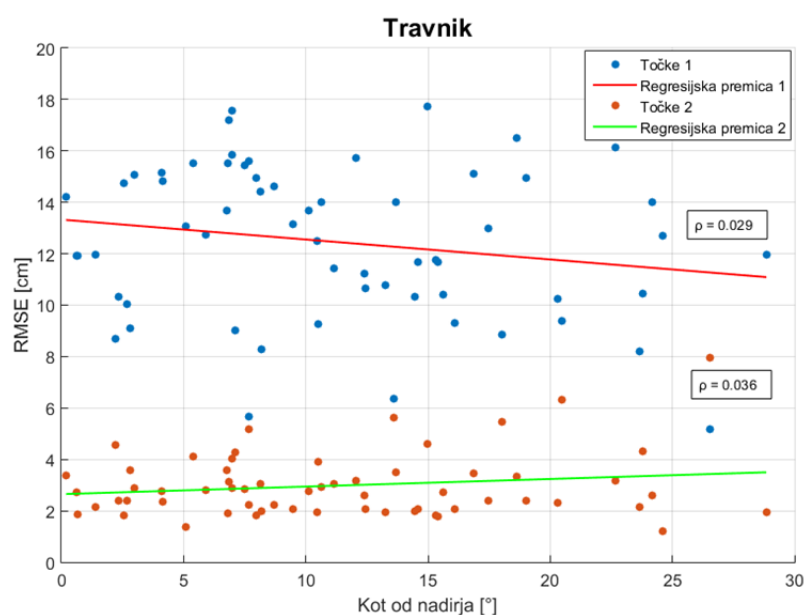
Izris grafov na slikah 17 in 18 je bil izveden za geometrijski vpliv velikosti kota od nadirja, tako v odvisnosti od RMSE kot tudi σ , skupno za združene georeferencirane oblake in oblake snemalnih pasov ter posebej za asfalt in travnik. Za vsako skupino razpršenih točk je izrisana regresijska premica, ki je v vseh primerih dokaj vodoravna. Iz obeh grafov je razvidno, da imamo velik vzorec, veliko razpršenost točk, te pa se gibljejo po celotnem območju delovanja samega laserskega skenerja, torej od kota 0° pa do kota $\pm 30^\circ$.

V primeru asfaltnih površin lahko opazimo, da imamo točke z največjim kotom od nadirja do vrednosti okrog 25° . Iz obeh grafov lahko jasno razberemo, da se po postopku georeferenciranja vrednosti RMSE znatno znižajo, in sicer za okrog 12 centimetrov v obeh primerih. Trdimo lahko, da je postopek usklajevanja posameznih oblakov točk različnih trajektorij in georeferenciranja odpravil prisotne sistematične napake, ki se izražajo preko RMSE. V vrednost RMSE je vključena tudi kakovost določitve vektorjev med sistemi na krovu vzpostavljenega koordinatnega sistema, ki je torej v našem primeru dobra. Ne glede na značilnosti območja so rezultati postopka usklajevanja in georeferenciranja podobni. Višinska odstopanja točk DMR-ja od kontrolnih točk, so po izvedenem postopku tako veliko manjša, in sicer za okrog 3 centimetre, kar pomeni, da se je točnost podatkov zelo povečala.

Kar se tiče vpliva kota od nadirja na velikost RMSE lahko trdimo, da se regresijska premica z večanjem kota minimalno spreminja. Parameter ρ , ki nam pove, kako dobro se točke prilegajo neki regresijski premici je pripisan na graf. Iz tega lahko povzamemo, da pri sodobnih laserskih skenerjih višjega cenovnega razreda, vpliv kota laserskega žarka od nadirja ne igra velike vloge pri velikosti RMSE in posledično tudi na kakovost DMR-ja ter točnosti podatkov. Če se osredotočimo samo na združene georeferencirane podatke, lahko rečemo, da se natančnost s kotom pri asfaltu povečuje, medtem ko se pri travnikih zmanjšuje. Regresijska premica 1 (rdeča) na grafu v obeh primerih predstavlja oblake snemalnih pasov, regresijska premica 2 (zelena) pa združene georeferencirane oblake. Točke 1 (modra) se nanašajo na oblake snemalnih pasov, točke 2 (oranžna) pa na združene georeferencirane oblake.



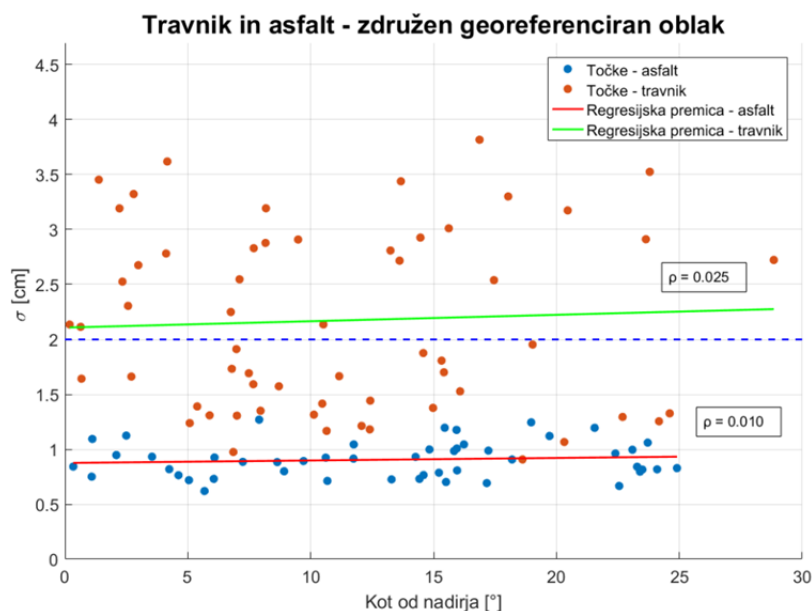
Slika 17: Odvisnosti RMSE od kota od nadirja: asfalt



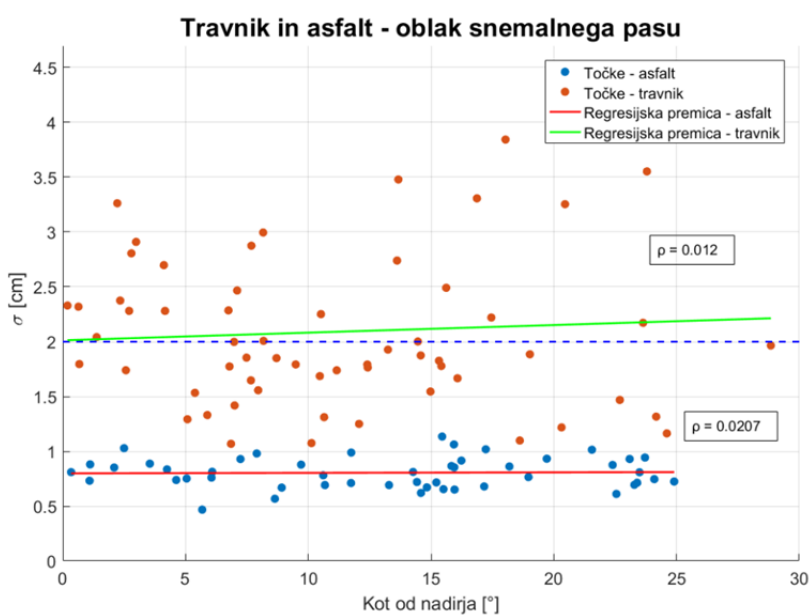
Slika 18: Odvisnosti RMSE od kota od nadirja: travnik

Odvisnost σ od kota od nadirja predstavljata grafa na slikah 19 in 20. Prvi graf predstavlja združene georeferencirane oblake, drugi graf pa oblake snemalnih pasov, na obeh grafih skupno za travnik in asfalt. Opazimo lahko, da sta izrisa zelo podobna, postopek usklajevanja posameznih oblakov točk različnih trajektorij leta in georeferenciranje ima na vrednost σ majhen vpliv, saj se s tem ne spreminja geometrija oblaka točk. Na osnovi grafov lahko trdimo, da ne glede na velikost kota od nadirja je vrednost σ podobna, saj je regresijska premica spet dokaj vodoravna. Na obeh grafih so točke pri travnikih veliko bolj razpršene, od 1 pa do skoraj 4 centimetrov, kot pa pri asfaltu, kjer segajo od 0,5 pa do 1,4 centimetra, razlog je spet razgibanosti odbojne površine in

prisotnost vegetacije. Na obeh grafih sta izrisani tudi liniji za vrednost σ pri 2 centimetrih, njena pojasnitev pa je podana že v podpoglavju 6.1. Iz obeh grafov je razvidno, da je z večanjem velikosti kota od nadirja natančnost slabša, tako v primeru travnikov kot tudi asfaltnih površin.



Slika 19: Odvisnosti σ od kota od nadirja: travnik in asfalt – združen georeferenciran oblak

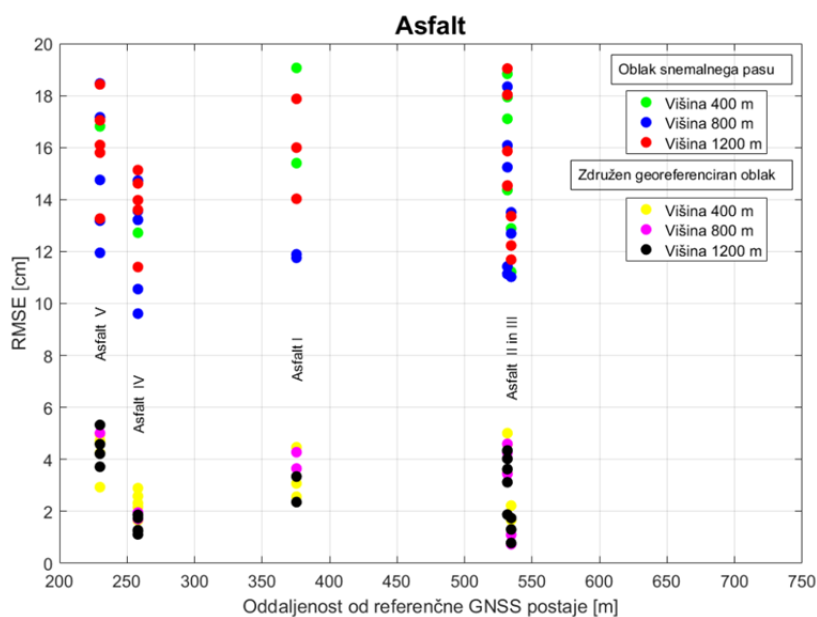


Slika 20: Odvisnosti σ od kota od nadirja: travnik in asfalt – oblak snemalnega pasu

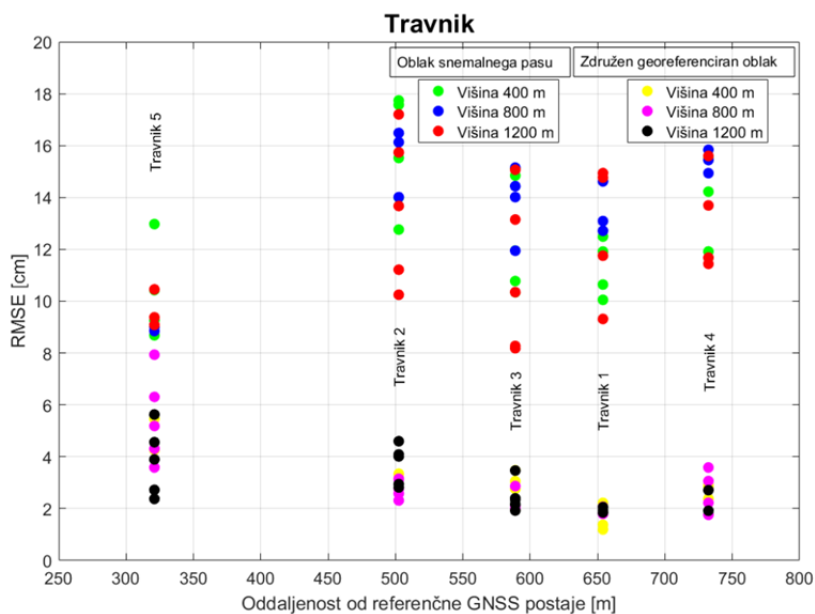
6.3 Vpliv oddaljenosti od referenčne GNSS postaje

Kot zadnji geometrijski vpliv smo obravnavali oddaljenost območja od referenčne GNSS postaje v Radovljici. Grafa na slikah 21 in 22 predstavljata za vsako posamično območje vrednost RMSE, in sicer v odvisnosti od oddaljenosti od referenčne GNSS postaje, posebej za asfalt in travnik.

Dodatno so podatki razdeljeni na oblak snemalnih pasov in združene georeferencirane oblake, točke znotraj tega pa so obarvane glede na višino leta, kakor je podano v legendi.



Slika 21: Odvisnosti RMSE od oddaljenosti od referenčne GNSS postaje: asfalt



Slika 22: Odvisnosti RMSE od oddaljenosti od referenčne GNSS postaje: travnik

Iz obeh grafov je razvidno, da višina leta, tako pri združenih georeferenciranih oblakih kot tudi oblakih snemalnih pasov, ni imela velikega vpliva, saj so točke neenakomerno ne glede na barvo razporejene poljubno. Opazimo lahko, da je razlika v vrednosti RMSE med oblaki snemalnih pasov in združenih georeferenciranih oblakih, za vsa območja skoraj enaka. Pri vseh se izvede dokaj velik premik, največji se je zgodil pri asfaltni površini 3 za skoraj 15 centimetrov, najmanjši

pa pri travniku 5 za 5 centimetrov. V kolikor želimo ugotoviti vpliv oddaljenosti referenčne GNSS postaje od posameznega območja na točnost določitve položajev točk, lahko trdimo, da pri tako kratkih razdaljah, kot so v obravnavanem primeru, ta nima skoraj nikakršnega vpliva, saj so ne glede na oddaljenost vrednosti RMSE poljubne.

7 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo analizirali različne vplive na natančnost višin DMR-ja, ki je izdelan iz oblaka laserskega skeniranja. Obravnavali smo geometrijske značilnosti laserskega skeniranja, kot je višina leta nad terenom, kot od nadirja in oddaljenost od referenčne GNSS postaje, in ugotovili, da ti parametri vplivajo na natančnost in točnost določitve višin. Ti vplivi so dokaj majhni, in sicer v velikosti nekaj centimetrov. To je bilo pričakovano, saj se je lasersko skeniranje izvedlo z zelo kvalitetnim laserskim skenerjem, ki zagotavlja kakovostno določitve točk na zemeljskem površju.

Izmed vseh obravnavanih vplivov je relativno največjega imela višina leta nad terenom, kjer se je z večanjem višine leta nad terenom povečevala razpršenost podatkov oziroma variacijski razmik. Z večanjem velikosti kota od nadirja so se za oba tipa površin natančnosti oziroma σ malenkost poslabšali, zato lahko povzamemo, da so točke pri večjih kotih malenkost manj natančno določene kot te pod nadirjem. Sama oddaljenost od referenčne GNSS postaje je dala najbolj enolične rezultate, kjer razlike v oddaljenosti niso vplivale na točnost določitve položajev. Same koordinate GNSS postaje so izjemno dobro določene, prav tako je uporabljena kakovostna GNSS antena na snemalni platformi, ki ob uporabi diferencialnega GNSS omogoča, da se vektor med njima določi prav tako kakovostno, zato razlik v rezultatih točnosti zaradi oddaljenosti skorajda ni.

S postopkom izvedene analize oblaka točk in izdelanega DMR-ja smo prišli do naslednjih ugotovitev glede natančnosti in točnosti določitve višin visokokakovostnih DMR-jev, ki so zraven geometrijskih vplivov vezane tudi na ostale vplive:

- Natančnost DMR-ja je odvisna od tipa podlage (odbojne površine) in njenih specifikacij, saj je mesto odboja oziroma merjena razdalja določena kot utežena vsota vrednosti znotraj odtisa laserskega žarka. Pri asfaltnih površinah je odbojna ploskev manj razgibana, medtem ko je dejanski odboj žarka v primeru travnikov lahko rezultat odbojev od travnih bilk ter tal. Na velikost σ tako vpliva prisotnost vegetacije ter njena velikost, kjer je največji σ lahko tudi štirikratnik najmanjšega. Višine točk DMR-jev na asfaltnih površinah so bile bolj natančno določene kot višine točk na območjih travnikov.
- Postopek usklajevanja oblakov točk iz različnih trajektorij leta (postopek registracije) ter uporaba oslonilnih točk zelo pripomorejo k izboljšanju točnosti podatkov, saj se vrednosti RMSE znatno zmanjšajo, medtem ko vrednosti σ , kot mere za natančnost, ostanejo približno enake. Geometrija samega oblaka točk v postopku se skoraj nič ne spremeni zato se tudi σ ne spreminjajo veliko. σ pri oceni kakovosti DMR-jev iz združenih

georeferenciranih oblakov točk imajo v vseh obravnavanih primerih manjšo vrednost od σ DMR-jev iz točk oblakov snemalnih pasov.

- Mogoče je doseganje boljše natančnosti od tiste, ki jo podaja proizvajalec laserskega skenerja, tudi do štirikrat. To je mogoče, kadar obravnavamo oblake točk z zelo veliko gostoto. V našem primeru smo kot vhodni podatek za izdelavo DMR-jev uporabili oblake točk s povprečnimi gostotami 8 točk/m² za višino skeniranja 1200 metrov, 10 točk/m² za višino skeniranja 800 metrov in 18 točk/m² za višino skeniranja 400 metrov. K natančnosti veliko pripomore tudi upoštevanje parametrov kalibracije sistema v postopku združevanja in georeferenciranja delnih oblakov točk.
- Uporaba kontrolnih točk, izmerjenih s trigonometričnim višinomerstvom z navezavo na obstoječo geodetsko mrežo, se izkaže kot dobra osnova za izvedbo tovrstnih analiz, ker je sama natančnost in točnost koordinat teh točk veliko boljša od točk laserskega skeniranja, in sicer za vsaj trikrat.

Zaključimo lahko, da je bil postopek, s katerim smo ugotavljali vplive na kakovost DMR-ja, zelo učinkovit, prav tako so bili podatki, vključeni v obdelavo, zelo kvalitetni ter so omogočali ugotavljanje posameznih geometrijskih vplivov. V prihodnje bi bilo zanimivo primerjati še rezultate takšne obdelave za več različnih tipov površin in med seboj različnih specifikacij. Med drugim bi lahko za primerjavo obravnavali še kakšen drug vreden podatek, kot je recimo oblak točk, ki je rezultat državnega laserskega skeniranja, kjer so bili uporabljeni drugačni parametri laserskega skeniranja površja, pri tem pa je različna predvsem gostota točk. Zanimivo bi bilo poleg geometrijskih vplivov laserskega skeniranja na višinsko komponento obravnavati še horizontalno komponento položaja. Vsekakor ima izveden postopek analize, obdelave in načina prikaza podatkov še mnogo priložnosti za ugotavljanje tako geometrijskih kot tudi drugih vplivov na kakovost določitve DMR-ja.

VIRI

Drobne, S. 2009. Statistika, vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 181 str.

FugroViewer. 2016. Leidschendam, Fugro Geospatial Services.
www.fugroviewer.com (Pridobljeno 15. 3. 2016.)

Höhle, J., Potuckova, M. 2011. EuroSDR No. 60: Assessment of the Quality of Digital Terrain Models. Frankfurt, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG): 85 str.
http://www.euroedr.net/sites/default/files/uploaded_files/60_0.pdf (Pridobljeno 15. 3. 2016.)

Kocijančič, L. 2013. Kalibracija sistema za aerolasersko skeniranje. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Kocijančič): 44 str.

Kraus, K. 2007. Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans. Berlin, Walter de Gruyter: 459 str.

Ozmeč, T. 2015. Vzpostavitev geodetske mreže za potrebe ocenjevanja kakovosti oblakov točk aerolaserskega skeniranja. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Ozmeč): 49 str.

Pavlovčič Prešeren, P., Korošec, M., Grigillo, D. 2015. Problematika geodetskih terenskih meritev z GNSS in simulacije vodostaja na podlagi DMR na delu Cerknškega jezera. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2014: 73–80.

RIEGL. 2015. Datasheet RIEGL LMS-Q780. Riegl Laser Measurement System GmbH: 8 str.
http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/DataSheet_LMS-Q780_2015-03-24.pdf
(Pridobljeno 15. 3. 2016.)

LAStools. 2015. Gilching, rapidlasso GmbH.
www.rapidlasso.com/lastools (Pridobljeno 15. 3. 2016.)

Triglav Čekada, M. 2009. Optimizacija metodologije obdelave in analiza natančnosti letalskega laserskega skeniranja pri zajemu geodetskih podatkov za lokalno prostorsko planiranje. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Triglav Čekada): 202 str.

Vosselman, G., Maas, H.-G. 2010. Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Dunbeath, Whittles Publishing: 318 str.