

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Geodezija,
smer Geodezija

Kandidatka:

Elizabeta Miklavčič

**Analiza uporabe širine odbojnega vala v
podatkih aero laserskega skeniranja za
ekstrakcijo zunanjih robov stavb**

Diplomska naloga št.: 861

Mentor:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Somentor:

prof. dr. Norbert Pfeifer

Ljubljana, 21. 6. 2011

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana Elizabeta Miklavčič izjavljam, da sem avtorica magistrskega dela z naslovom »Analiza uporabe širine odbojnega vala v podatkih aerolaserskega skeniranja za ekstrakcijo zunanjih robov stavb«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 6. 6. 2011

Elizabeta Miklavčič

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624:611.013.31(043.2)
Avtor:	ELIZABETA MIKLAVČIČ
Mentor:	doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
Somentor:	prof. dr. Norbert Pfeifer (TU Dunaj)
Naslov:	ANALIZA UPORABE ŠIRINE ODBOJNEGA VALA V PODATKIH AEROLASERSKEGA SKENIRANJA ZA EKSTRAKCIJO ZUNANJIH ROBOV STAVB
Obseg in oprema:	69 str., 2 pregl., 36 slik
Ključne besede:	aerolasersko skeniranje, polnovalovni zapis, širina odbojnega vala, ekstrakcija zunanlega roba stavb, segmentacija.

Izvleček

Aerolasersko skeniranje omogoča zajemanje množice podatkov v obliki oblaka točk, umeščenih v prostor. Točke, ki so zajete s tehniko polnovalovnega zapisa, pa vsebujejo tudi informacije o parametru širina odbojnega vala, ki je glavni predmet obravnave v diplomski nalogi. Samodejna in enostavna klasifikacija laserskih točk, ki predstavljajo stavbe, je zaenkrat težko dosegljiva, saj je v večini postopkov, ki se ukvarjajo z modeliranjem stavb, še vedno veliko korakov odvisnih od človekove presoje. Diplomsko delo obravnava odbojno širino vala kot možnost za pridobitev boljših rezultatov pri ekstrakciji stavbe oz. njenega zunanlega roba – oboda. Delo je potekalo na Dunaju, na Inštitutu za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje, kjer smo pridobili vse potrebne podatke ter prav tako tudi končne rezultate. Analiza je sestavljena iz dveh delov: prvi je raziskava parametra in izbor primernih točk za nadaljnjo obdelavo, drugi pa je postopek segmentacije. Slednji nam daje pozitivne rezultate, saj smo na koncu iz izbranih točk pridobili segmente, ki predstavljajo zunanje stene dveh predhodno izbranih stanovanjskih hiš. Čeprav je osnovna motivacija dela iskanje bolj preprostih in samodejnih postopkov, je analiza skoraj v celoti temeljila na osebni presoji in ročnemu delu. Kljub temu pa je bil glavni cilj dosežen – ekstrakcija zunanlega roba dveh stavb. Poleg tega delo bolj natančno predstavlja in opisuje odbojno širino vala, saj na njej temelji celotna analiza. Kot zanimivost je na koncu dodana tudi primerjava končnih rezultatov s katastrskimi podatki za obravnavani dve stavbi.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC:	624:611.013.31(043.2)
Author:	ELIZABETA MIKLAVČIČ
Mentor:	Assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph D.
Supervisor:	Prof. Norbert Pfeifer (TU Vienna), Ph.D.
Title:	ANALYSIS OF ECHO WIDTH IN AIRBORNE LASER SCANNING DATA FOR THE EXTRACTON OF BUILDINGS OUTLINE
Notes:	69 p., 2 tab., 36 fig.
Key words:	airborne laser scanning, full-waveform, echo width, extraction of building outline, segmentation,

Abstract

Airborne laser scanning provides a huge amount of data in the form of point cloud located in space. A full-waveform laser scanners generate informations such as amplitude, backscatter cross section and echo width. The latter is the main subject of the thesis. Automatic and simple classification of laser points is still a major challenge, especially in specific tasks such as buildings modelling. Many procedures for buildings modelling are still very dependent on human judgement. This problem encourages us to analyse echo width as a possibility for the extraction of the buildings outline. Practical work presented in the thesis was accomplished in Vienna, at the Institute of Photogrametry and Remote Sensing. All required data, professional help and all final results were gained during my research at this Institution. Analysis includes two parts: the first one presents a research on the echo width and the selection of the points adequate for further process, the second one process of segmentation. A slope adaptive neighbourhood system was used and the segments acquired which represent buildings outlines of two selected houses. Main motivation for the work was a quest for more simple and automatic procedures; yet, this analysis is still based on personal judgement and not automatic work. Nevertheless, the main goal has been achieved: the extraction of the buildings outline. The thesis presents and describes an echo width in great detail. At the end a comparison between laser data results and cadastral data is also presented. A comparison of both is included as an interesting detail but is not relevant for evaluating of the data.

ZAHVALA

Najlepše se zahvaljujem mentorici dr. Mojci Kosmatin Fras, ki mi je nudila pomoč in podporo pri idejah ter mi svetovala pri nastajanju in oblikovanju diplomskega dela.

Posebna zahvala gre somentorju dr. Norbertu Pfeiferju in pomočniku Wernerju Mückeju za strokovno vodenje in pomoč pri ustvarjanju praktičnega dela diplomske naloge na Dunaju.

Hvala vam, moji najdražji domači, za podporo in zgled, da je najpomembnejše biti ustvarjalen ter vedno odprt za dobro.

Hvala bratu Lojzetu za zgled in za dobre strokovne pogovore.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
2 AEROLASERSKO SKENIRANJE	3
2.1 Osnovne značilnosti in sestavni deli	3
2.2 Metoda merjenja	9
2.3 Analiza polnovalovnega zapisa podatkov – FWF analiza	11
2.3.1 Gaussova dekompozicija	13
2.3.2 Funkcija srednje vrednosti kvadrata razlike – ASDF	15
2.4 Širina odbojnega vala	17
3 SEGMENTACIJA OBLAKA TOČK	19
3.1 Segmentacija z uporabo naklonsko prilagodljive okolice	20
3.1.1 Grupiranje na osnovi entitet	21
3.1.2 Naklonsko prilagodljiva okolica	22
3.1.3 Postopek segmentacije	25
3.1.4 Dodatno filtriranje oz. očiščenje površine	26
4 PRAKTIČNI DEL NALOGE	28
4.1 Metodologija dela	28
4.2 Področje obravnave in podatki	31
4.2.1 Laserski podatki	31
4.2.2 Ortofoto	34
4.2.3 Katastrski podatki	36
4.3 Vrednosti širine odbojnega vala	38
4.4 Dvorazsežni (2D) prikazi	40
4.4.1 Priprava in obdelava podatkov	40
4.4.2 Prvi vmesni rezultat	40
4.5 Trirazsežni (3D) prikazi	44
4.5.1 Priprava in obdelava podatkov	44
4.5.2 Drugi vmesni rezultat	45

4.6 Segmentacija stavb iz ruralnega območja	48
4.6.1 Priprava podatkov za obdelavo	48
4.6.2 Potek segmentacije	48
5 KONČNI REZULTATI	51
5.1. Segmenti za ekstrakcijo zunanjih robov stavb	51
5.2. Primerjava rezultatov s katastrskimi podatki	55
6 RAZPRAVA	59
7 ZAKLJUČEK	62
VIRI	64

KAZALO PREGLEDNIC

Tabela 1: Osnovne značilnosti laserskega skenerja RIEGL LMS-Q560	8
Tabela 2: Osnovne značilnosti projekta laserskega skeniranja mesta Dunaj	31

KAZALO SLIK

Slika 1: Osnovni princip ALS-ja	3
Slika 2: Presek in značilnosti poti laserskega žarka	5
Slika 3: Osnovne tri koordinatne osi letala	6
Slika 4: Vzporedni vzorec skeniranja	7
Slika 5: Polnovalovni princip	10
Slika 6: Digitalizacija odbojnega signala	11
Slika 7: Presek odbojnega valovanja	12
Slika 8: Primerjava obdelanega in neobdelanega signala	14
Slika 9: Gaussova krivulja	15
Slika 10: Funkcija srednje vrednosti kvadrata razlike	16
Slika 11: Postopek določitve števila odbojnih valov z uporabo ASDF	17
Slika 12: Naklonsko prilagodljiva okolica – določitev sosednjih točk za hišo	23
Slika 13: Kriterij cilindra za izbor sosednjih točk	24
Slika 14: Shema metodologije dela v tem okviru pike raje zbrši, niso celi stavki	29
Slika 15: Letali Diamond z večnamensko platformo: DA42-MPP IN HK36-MPP	32
Slika 16: Izsek ortofota iz urbanega območja 108081	35
Slika 17: Izsek ortofota iz ruralnega območja 117098	35
Slika 18: Izsek katastrskih podatkov, list 117098	37
Slika 19: Histogram urbanega območja za vrednosti odbojne širine.	38
Slika 20: Histogram ruralnega območja za vrednosti odbojne širine	39
Slika 21: Barvna lestvica za urbano območje [ns]	40
Slika 22: Izsek urbanega območja, snemalni pas 0671	41
Slika 23: Izsek urbanega območja, snemalni pas 0672	41
Slika 24: Izsek urbanega območja, snemalni pas 0673	42
Slika 25: Simbolni prikaz leta letala čez izsek urbanega območja	43
Slika 26: Barvna lestvica za urbano in ruralno območje [ns]	44
Slika 27: Barvna lestvica za ruralno območje [ns]	44
Slika 28: 3D-prikaz izbranega dela urbanega območja	45
Slika 29: 3D-prikaz izbranega dela ruralnega območja	46
Slika 30: Prečni profil dela ruralnega območja	47
Slika 31: Rezultat segmentacije ID1 – osnovne nastavitve	52
Slika 32: Rezultat segmentacije ID1 – kriterij »split distance« vrednosti 3	53

Slika 33: Rezultat segmentacije ID2 – osnovne nastavitve	54
Slika 34: Rezultat segmentacije ID2 – kriterij split_distance vrednosti 3	55
Slika 35: Primerjava ID1 s katastrskimi podatki DKM	56
Slika 36: Primerjava ID2 s katastrskimi podatki DKM	57

SEZNAM KRATIC

AGL	angl. Above ground level (nad nivojem tal)
ALS	angl. Airborne laser scanning (aerolasersko skeniranje)
ASDF	angl. Averaged square distance function (funkcija srednje vrednosti kvadrata razlike)
BCS	angl. Backscatter cross section (preseki odbojnega valovanja)
BEV	nem. Bundesamt Für Eich- und Vermessungswesen
DKM	nem. Digital Kataster Map (digitalni katastrski načrt)
DMR	digitalni model reliefa
DN	angl. Digital number (digitalno število)
EW	angl. Echo width (širina odbojnega vala)
FOV	angl. Field of view (območje zajema)
FWF	angl. Full-waveform (polnovalovni zapis)
GNSS	angl. Global navigation satellite system (globalni navigacijski satelitski sistem)
GPS	angl. Global Positioning System (globalni položajni sistem)
GIS	Geografski informacijski sistem
IMU	angl. Inertial measurement unit (inercialne merilne enote)
LIDAR	angl. Light detection and ranging
NIR	angl. Near infrared (bližnja infrardeča)
POS	angl. Position and Orientation System (poločajni in orientacijski sistem)
PRR	angl. Pulse repetition rate (frekvenca skeniranja)

1 UVOD

V diplomski nalogi bomo podrobneje raziskali in analizirali podatke, pridobljene z aerolaserskim skeniranjem, ki je ena izmed metod zajemanja Zemeljskega površja v geodeziji. Metoda omogoča upodobitev stvarnosti v obliki oblaka laserskih točk, katerih položaj je določen preko globalnega navigacijskega satelitskega sistema (GNSS). Tako dobimo ogromno število točk, s katerimi lahko ustvarimo številne informacije o površju, vendar je potrebno oblak točk primerno obdelati. V praksi je kot primer zelo uporaben in že uveljavljen izdelek digitalni model reliefa, ki opisuje višinsko razgibanost površja Zemlje. Točke pa se klasificira še za mnoge druge namene, kot so: klasifikacija električnih vodov, stavb; izdelava načrtov večjih meril za podrobni prostorski plan ali za kakšne druge posege v okolje; izdelava trirazsežnih modelov stavb ali nekega območja; vizualizacije itd. Aerolasersko skeniranje je prešlo v široko uporabo, kljub temu pa še zmeraj velja za novost, saj zna malo strokovnjakov za geodezijo kvalitetno in učinkovito obdelovati laserske podatke.

Pretekle izkušnje in delo na tem področju so nas spodbudile k odločitvi za osnovno temo diplomskega dela, ki jo usmerjajo tri osnovne ideje:

- Problem avtomatske klasifikacije laserskega oblaka točk močno podaljša postopek obdelave podatkov, ki tako pretežno sloni na ročni obdelavi in še bolj na človeški presoji.
- Poseben problem je ločevanje stavb od drugih objektov v naravi, predvsem vegetacije. Z avtomatično obdelavo se izredno težko zadovoljivo loči vegetacijo od bližnjih stavbnih objektov.
- Edina možnost obetavnega iskanja novih rešitev je uporaba podatkov s polnovalovnim zapisom (angl. FWF).

Polnovalovni zapis ponuja tudi različne parametre, s katerimi ga lahko opišemo, vendar se bomo osredotočili le na odbojno širino vala, ker je ta parameter še dokaj neraziskan. Širina odbojnega vala (angl. echo width, EW) je parameter aerolaserskega skeniranja, ki ga je mogoče dobiti samo ob uporabi tehnike polnovalovnega zapisa. O njem je malo napisanega in znanega, saj je tehnika polnovalovnega zapisa prišla v uporabo šele pred nekaj leti.

Začetne tri osnovne smernice nam pomagajo oblikovati natančno določen cilj, ki ga predstavljata naslednji dve hipotezi:

1. *Hipoteza:*

Možno je najti način in izpeljati postopek, s katerim je mogoče hitreje ter z večjo stopnjo samodejnosti ločiti laserske točke, ki predstavljajo zunanji rob stavbe, od vsega preostalega oblaka laserskih točk.

2. *Hipoteza:*

Metoda je lahko uspešna, tudi če v analizi uporabimo samo parameter odbojna širina vala.

Ti dve hipotezi zajemata bistvo nadaljnjega dela, postavljata pa tudi pogoje, ki zahtevajo določene tehnične specifikacije. To so predvsem podatki, zajeti z laserskim skenerjem, ki uporablja tehniko polnovalovnega zapisa.

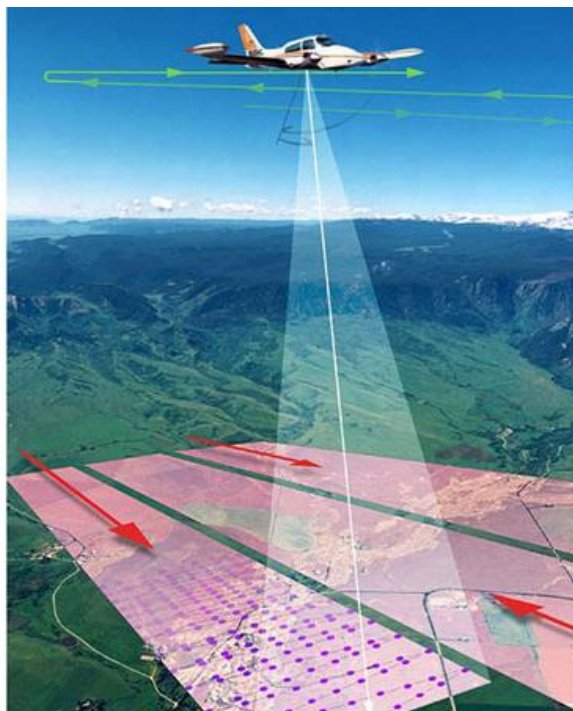
Diplomsko delo je bilo izdelano v sodelovanju z Dunajsko tehniško univerzo, in sicer z Inštitutom za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje, kjer sem bila na polletni študentski izmenjavi po programu Erasmus. Na Dunaju sem opravila celotno praktično delo, za katerega so mi nudili vse v diplomski nalogi uporabljene podatke, s katerimi sem opravila vse analize in dobila končne rezultate. Brez strokovnega vodstva dr. Norberta Pfeiferja in pomočnika Wernerja Muckeja ter ostalih sodelavcev, ki so nam vselej ponudili pomoč, delo ne bi potekalo tako tekoče in uspešno. Odločitev za ta inštitut je bila jasna, saj imajo visoko kvalificiran kader; njihove raziskave pa temeljijo na treh področjih: fotogrametriji, daljinskem zaznavanju in laserskem skeniranju. Slednje je dobro zastopano, saj na tem področju izvajajo številne raziskave in projekte, ki pomembno oblikujejo razvoj stroke v geodeziji.

Diplomska naloga je sestavljena iz treh osnovnih delov: teoretični in praktični del ter predstavitev končnih rezultatov. V 2. in 3. poglavju so razložene teoretične osnove aerolaserskega skeniranja ter postopka segmentacije. Pri obeh so predstavljeni postopki, metode in merila, ki smo jih praktično uporabili v analizi za pridobitev končnih rezultatov. Sledi 4. poglavje, ki v celoti opisuje praktični del diplome. Razdeljen je na tri podpoglavja: dvorazsežni prikazi, trirazsežni prikazi in segmentacija. V njih so opisani vsi delni rezultati in način priprave podatkov za segmentacijo. V 5. poglavju so predstavljeni končni rezultati, ki vsebujejo tudi primerjavo s katastrskimi podatki. Na koncu 6. poglavja je razprava, v kateri ovrednotimo in ocenimo dobljene rezultate.

2 AEROLASERSKO SKENIRANJE

2.1 Osnovne značilnosti in sestavni deli

Aerolasersko skeniranje (ALS) je tehnika zajemanja podatkov o površju Zemlje, kot so relief, vegetacija, stavbe ter drugi objekti stvarnosti. Skener je instrument, pritrjen na letalo ali helikopter, ki zajame množico detajlov na površju oz. vso odbito lasersko svetlobo, ki se vrne nazaj v instrument. Z osnovnim načinom snemanja (slika 1) dobimo ogromno število točk (več milijonov), ki jih laserski žarek ustvarja ob stiku z vsem obstoječim na površju Zemlje. Letalo ob skrbno načrtovani poti leta na tleh niza snemalne pasove. Pot leta imenujemo trajektorija, ki je bistvenega pomena za kvaliteten zajem podatkov. Pri nadaljnji obdelavi trajektorijo smiselno razdelimo glede na velikost zajetega območja. Podrobnost zajema in nadaljnja obdelava pa sta odvisni predvsem od namena uporabe in potreb po informacijah o nekem delu stvarnosti.



Slika 1: Osnovni princip ALS-ja
(Gunderson D., 2008)

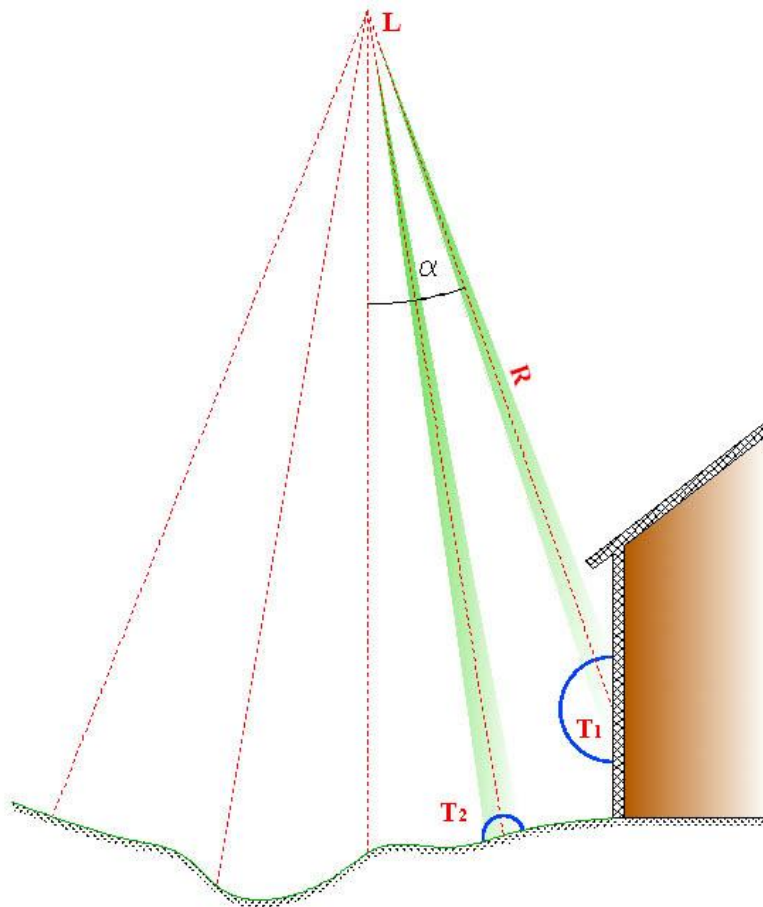
Zelena črta prikazuje trajektorijo, na tleh so snemalni pasovi, ki vsebujejo množico točk. Te ustvarja snop laserskih žarkov, katerih območje simbolično prikazuje bel stožec.

Instrument, ki ga imenujemo laserski skener, posname del površja in ga kot rezultat poda v obliki oblaka točk, ki so umeščene v prostor. Večina instrumentov ALS uporablja impulzni laser, ki oddaja kratke laserske pulze v vidni oziroma infrardeči svetlobi elektromagnetnega valovanja. Skener nato zazna oz. registrira s senzorjem nekatere nam znane lastnosti odbite laserske svetlobe (energije), da lahko pridobimo osnovne in potrebne podatke¹ o oddaljeni tarči. Laserski žarek pod določenim kotom skenira površje in pri tem naleti na različne tarče (slika 2). Ta kot se med merjenjem spreminja, določen pa je največji možni kot, ki ga določi proizvajalec. Da bi posneli in zajeli čim več možnih detajlov, ki bi jih bilo mogoče kakor koli razvrstiti, je prav maksimalni kot bistvenega pomena, saj pri približno navpično usmerjenih žarkih dobimo bolj vrhnje površine različnih elementov stvarnosti. Pri poševno oddanih žarkih se zaznavanje podrobnosti mnogo bolj poveča, s tem pa pridobimo veliko podatkov, ki lahko zelo izboljšajo rezultate obdelave, saj nam ponudijo več detajlov, ki jih drugače ne bi mogli prikazati.

Slika 2 simbolično prikazuje tudi območje odboja laserskega žarka s tarčo. Območje je označeno z modrim polkrogom in ga imenujemo laserski odtis, ki zavzema neko površino z določenim polmerom, saj ima laserski žarek obliko stožca z vrhom v senzorju. Odtisa na tarči T1 in T2 se med seboj razlikujeta zaradi drugačne oblike in površine tarč ter tudi zaradi različne oddaljenosti od senzorja. V večini primerov imamo nepopolne odtise, ki ne tvorijo celotnega odtisa laserskega žarka, vendar le del njega. To seveda ne pomeni, da ne pride do odboja laserskega pulza. Celoten presek stožca in odbita laserska energija pa predstavljata presek odbojnega valovanja² (BCS).

¹ Vsebinska laserskih podatkov je natančneje razložena v 4.2 poglavju: Področje obravnave in podatki.

² V angleščini uveljavljen izraz za presek odbojnega valovanja je backscatter cross section (BCS).



Slika 2: Presek in značilnosti poti laserskega žarka

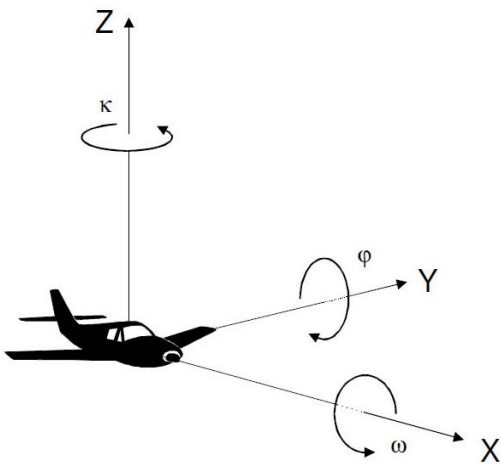
R (Razdalja) – oddaljenost laserske naprave od tarče; L – laserski skener (izvor laserskega žarka); T_1 , T_2 – primer dveh tarč; α – največji kot zajemanja laserskega skenerja. Modro označeni polkrog prikazuje območje odboja laserskega žarka s tarčo, na površini katere se izriše odtis laserja¹. Zeleni stožec z odbito lasersko energijo simbolizira presek odbojnega valovanja.

Za uporabo podatkov je potreben celoten sistem ALS-ja, ki ga sestavljajo naslednje komponente:

1. POS – položajni in orientacijski sistem,
2. laserski merilni sistem,
3. kontrolni in podatkovno-pomnilniški sistem.

¹ V angleščini uveljavljen izraz za odtis laserja je footprint.

POS je sestavljen iz globalnega položajnega sistema (GPS) in inercialnih merilnih enot (IMU). Položaj letala ali helikopterja je med letom stalno nadzorovano z GPS-jem, ki nam zagotavlja podatke o položaju, hitrosti in času leta. Inercialne merilne enote tvorijo merilniki zasukov, ki beležijo premike treh osnovnih osi letala, in merilniki pospeškov. Merilni sistemi na letalu morajo biti med seboj povezani z natančno določenimi položajnimi odnosi. Potrebujemo jih za umestitev pridobljenih oz. merjenih podatkov v prostor, v referenčni koordinatni sistem.



Slika 3: Osnovne tri koordinatne osi letala

Rotacije letala opišemo s tremi osnovnimi rotacijami (nagib, naklon, zasuk) okoli treh koordinatnih osi letala. Rotacije so: ω , φ , κ (Aerofotosnemanje poročilo, 2006, str. 13).

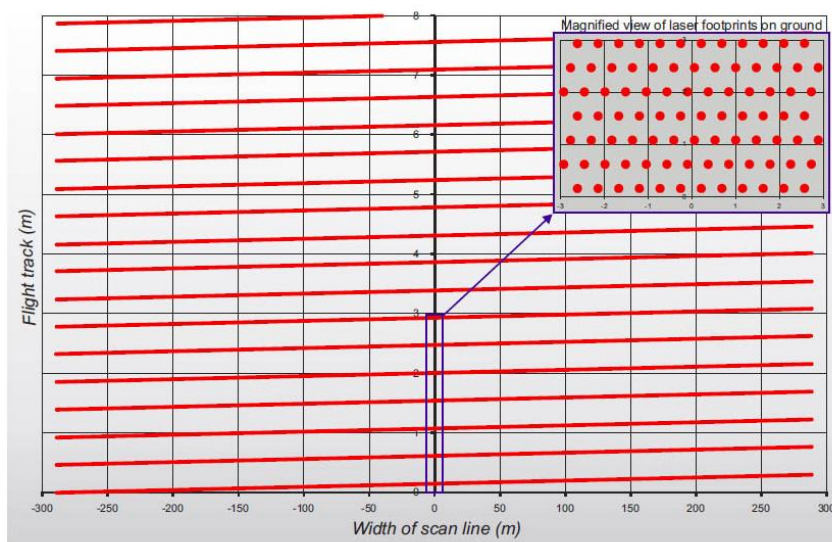
Laserska merilna naprava je nameščena fiksno na letalo (oz. njegovo krilo) ali na helikopter. Večina skenerjev deluje na valovni dolžini od 1064 nm do 1550 nm, to je bližnja infrardeča svetloba (NIR), ki ni nevarna za oči. Vendar pa ima slab preboj skozi vodo, ki dobro absorbira rdečo svetlobo. Merjenje podvodnega reliefa je zato z NIR-om neprimerna in nezanesljiva. Za podvodni relief obalnih območij se uporablja zelena laserska svetloba, ki ima območje valovne dolžine približno 532 nm. Prodornost zelene laserske svetlobe skozi vodo je odvisna od kalnosti in gibanja vode. Na splošno pa je omejena na okoli 50 m, če upoštevamo fizikalne lastnosti vode (OPTECH Inc., 2007 in Vosselman G., Maas H.-G., 2010).

Zaenkrat obstaja več različnih postopkov laserskega skeniranja zemeljskega površja. Delimo jih glede na vzorec skeniranja in odklon laserskega žarka.

Skener z rotirajočo oz. vrtljivo prizmo:

Vrtljiva prizma ustvarja na tleh vzporedne črte, saj je hitrost vrtenja prizme enakomerna. Napake zaradi različnih pospeškov se ne pojavljajo, zato se kot laserskega žarka kontrolirano in enakomerno spreminja med skeniranjem površja. Pri določenem delu meritev vrtljiva prizma ni usmerjena v tla, temveč zrcali laserski žarek v ohišje naprave.

Slika 4 prikazuje primer vzorca, zajetega z laserskim skenerjem Riegl LMS-Q560, ki ima vrtljivo prizmo. Linije so vzporedne in med seboj z določeno razdaljo ločene. V desnem kotu zgoraj je primer laserskega odtisa na tleh, ki se kaže v pikah oziroma točkah z različnim premerom – ta je odvisen od odbojne površine (v tem primeru so to ravna tla), od odklonskega kota laserskega žarka ter tudi od višine leta letala oz. helikopterja.



Slika 4: Vzporedni vzorec skeniranja

Podatki: Frekvenca skeniranja (PRR^1) = 200 kHz, 120 scans/s², Območje zajema (FOV^3) = 60 stopinj, višina leta = 500 m, hitrost leta = 200 km/h. Rezultat skeniranega vzorca na tleh: razdalja med točkami na liniji = 0.47 m (srednja vrednost), širina linije = 577 m, razdalja med zaporednimi, sledečimi si linijami = 0.46 m, količina laserskih meritev na kvadratni meter = 4.2 točk/m² (RIEGL LMS-Q560, 2009, str. 5).

¹ Angleška kratica za frekvenco skeniranja PRR – Pulse Repetition Rate.

² Enota scans/s je enota za frekvenco skeniranja, ki jo izražamo v Hz – število hercov je enako številu nihajev na sekundo.

³ Angleška kratica za območje zajema FOV – Field Of View.

Skener z nihajočim zrcalom:

Zrcalo se vrti naprej in nazaj ter tako ustvarja na površju linije v obliki črke Z. Zrcalo je vselej usmerjeno v tla, kar ne velja za vrtljivo prizmo. Ker se hitrost in pospešek stalno spreminjata, se med zrcalom in senzorjem pojavlja torzija, ki otežuje ugotavljanje odklonskega kota. Slabost so tudi neenakomerno razporejene točke na tleh.

Skener s povešenim zrcalom (angl. Nutating/ Palmer mirror):

Pri tem zrcalu laserski žarek oriše na tleh linije v obliki elips. Površje je skenirano dvakrat iz dveh različnih smeri, kar je sicer prednost, vendar prav tako postopek zaplete, saj imamo tako za eno točko dve meritvi pod različnim odklonskim kotom.

Skener z optičnimi vlakni:

Laserski žarek je usmerjen preko optičnih vlaken na površje Zemlje pod stalnim kotom. Skener je prav zaradi malo premičnih delov pridobil na veljavi, vendar ima zaradi nefleksibilnosti veliko manjše območje zajema kot skenerja z nihajočim zrcalom in vrtljivo prizmo. Edina spremenljiva količina je višina leta.

V tabeli 1 so osnovne značilnosti laserskega skenerja RIEGL LMS – Q560. To je dvorazsežni (2D) laserski skener, ki uporablja digitalno procesiranje signala – omogoča analizo polnovalovnega zapisa, kar je razloženo v nadaljevanju. S to napravo so bili zajeti vsi laserski podatki, ki smo jih uporabili pri diplomski nalogi.

Tabela 1: Osnovne značilnosti laserskega skenerja RIEGL LMS-Q560

Značilnosti laserskega pulza	
Valovna dolžina	Bližnja infrardeča oz. 1550 nm
Divergenca signala oz. žarka	≤ 0.5 mrad
Širina signala na polovici maksimuma	4 ns [nanosekunda]
Tip / laserski razred	Razred 1 (Class 1)
Natančnost (stopnja ustreznosti merjene količine glede na njeno pravo vrednost)	20 mm
Točnost (stopnja enakosti nadaljnjih oz. kasnejših meritev)	10 mm

Metodologija snemanja	
Mehanizem skeniranja	Vrtljivo večkotno ogledalo (angl. rotate polygon mirror)
Vzorec skeniranja	Vzporedne linije skeniranja
Frekvenca skeniranja (uporabniško nastavljiva)	Do 120 kHz pri skeniranju pod kotom 30° Do 160 kHz pri skeniranju pod kotom 60°
Frekvenca signala	Do 240 000 Hz
Največji možni kot skeniranja	$\pm 30^\circ = 60^\circ$
Meritev intenzitete je mogoča	16-bitna
Resolucija oz. ločljivost	
Višina snemanja	Od 30 m do 1800 m
Velikost sledi laserskega žarka	1.0 m na višini 1000m
Število odbojev na oddan signal	Neomejeno (omejeno z RIEGL Data Recorder, torej z zmožnostjo zapisa v pomnilnik)

2.2 Metoda merjenja

Poznamo dve metodi zapisa odbojnega signala:

- diskretna določitev odbojnega signala
- polnovalovna (FWF) digitalizacija (digitalizacija polnovalovnega zapisa)

Sodobni diskretni laserski skenerji imajo tudi analogne detektorje, ki poleg prvega in zadnjega odbojnega signala registrirajo tudi dva vmesna odbojna signala. Za razliko od diskretnih zmorejo polnovalovni skenerji zajeti in digitalizirati vso odbito lasersko energijo oddanega signala. Obe metodi sta pri zaznavanju vmesnih odbitih signalov odvisni od ločljivosti razdalje, ki je podana z enačbo:

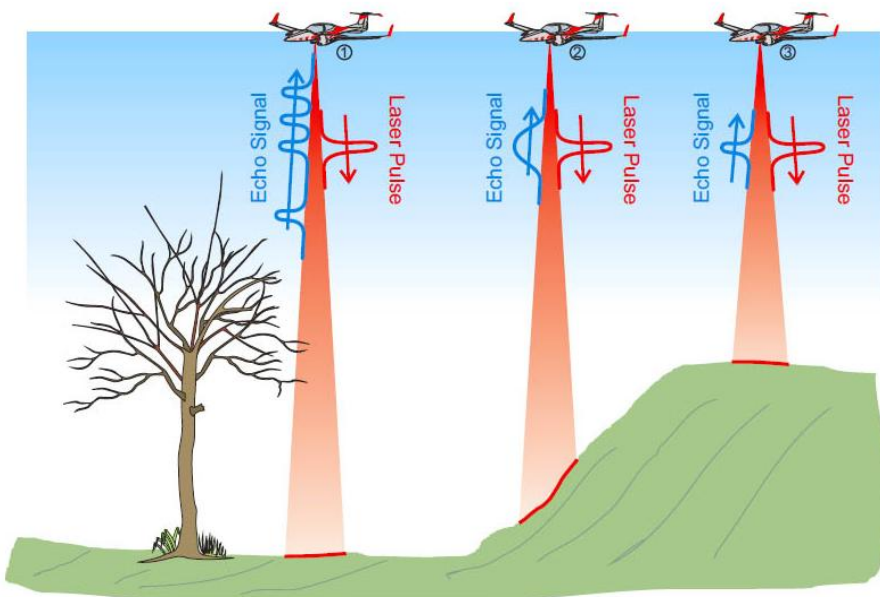
$$\Delta\rho = \frac{v_g \cdot \Delta\tau}{2}, \quad (1)$$

kjer je $\Delta\rho$... resolucija oddaljenosti (angl. range resolution) [m]

v_g ... skupna hitrost signala [ms^{-1}]

$\Delta\tau$... dolžina signala [m]

Slika 5 prikazuje način delovanja polnovalovne metode. Poznamo tri okoliščine snemanja terena z laserskim skenerjem, zraven pa je simbolno prikazan način branja odbojnega signala. V prvi situaciji snop laserskih žarkov skenira površje zemeljskega pasu, pri tem pa naleti na različne vrste tarč – v tem primeru so to veje drevesa ter tla. Na desni strani prvega stanja rdeči signal simbolizira oddani laserski pulz, ki potuje proti tarči. Ko le-ta pride v stik s površino tarče, se odbije in razprši na vse strani, delno pa se oddani signal odbije tudi nazaj proti laserski napravi, kar je prikazano z modrim odbitim signalom na levi strani. Trije odbiti signali jasno prikazujejo reakcijo oddanega signala s tremi vejami drevesa; zadnji odbiti signal pa so običajno tla. Na podoben način sta prikazani tudi drugi dve okoliščini.

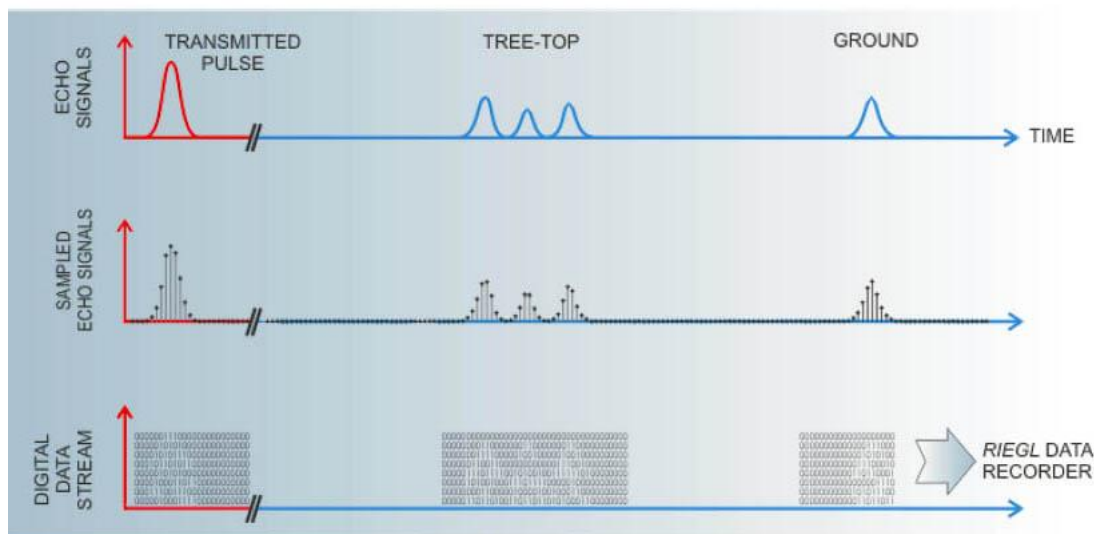


Slika 5: Polnovalovni princip

Osnovna ponazoritev delovanja laserja s polnovalovnim zapisom (RIEGL LMS-Q560).

Pri diskretni metodi ne bi dobili odbojev od vseh treh vej drevesa, temveč bi običajno razpolagali le z dvema odbitima signaloma, to sta prvi in zadnji. Polnovalovna metoda pa nam zaradi registriranja teoretično neomejenega števila odbojev na oddan signal ponuja popoln pregled nad odbito lasersko svetlobo. Ta se zabeleži in shrani v pomnilniško enoto skenerja.

Potek FWF digitalizacije je podan s sliko 6, kjer je nazorno prikazana pot pridobivanja podatkov. Prvi rdeči val je oddani laserski signal, naslednji trije pa odgovarjajo odboju signala od vej in tal (vali modre barve). V prvem diagramu so izrisani analogni signali, v drugem so ti vzorčeni po nekem konstantnem časovnem intervalu, v tretjem diagramu pa s pomočjo pretvarjanja vrednosti dobimo digitalno obliko podatkov. Ti so shranjeni v pomnilniku laserske naprave in jih je mogoče kasneje dodatno obdelati, oblikovati in spremeniti. To je ena izmed bistvenih in pomembnih prednosti polnovalovne metode.



Slika 6: Digitalizacija odbojnega signala
(RIEGL LMS-Q560)

2.3 Analiza polnovalovnega zapisa podatkov – FWF analiza

Začetek analize se začne z določitvijo oblike odbojnega valovanja. Ta je v osnovi določen s parametri laserskega senzorja (to so oblika laserskega signala, sprejemna funkcija impulza in parametri, ki opisujejo širjenje signala) ter odbojnimi lastnostmi tarče. Tarča je opisana z diferencialnim presekom odbojnega valovanja $\sigma(t)$, kjer je t čas, ki preteče od trenutka oddaje začetnega signala v senzorju do tarče in nazaj.

Celotna registrirana laserska energija $P_r(t)$ je torej rezultat prepletanja dveh osnovnih količin, ki se pojavita pri zaznavanju:

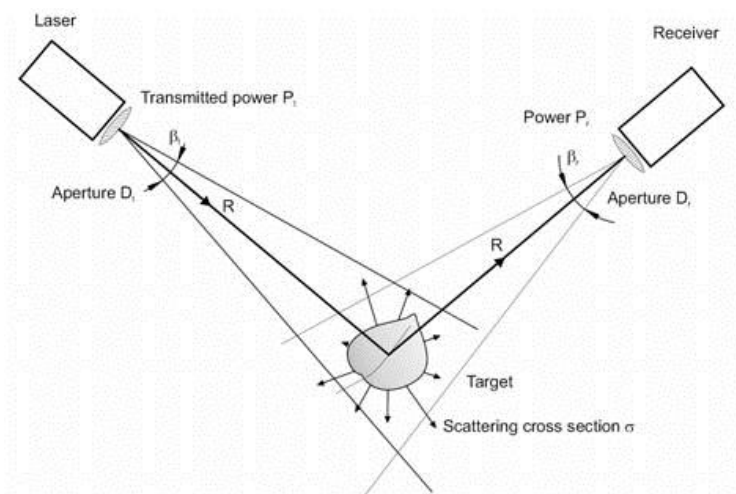
- sistemsko ALS-odbito valovanje $S(t)$, ki ga opisujeta oblika laserskega signala in vpliv sprejemnika ter ostale računalniške komponente nanj;
- $\sigma(t)$ – presek odbojnega valovanja, kot jo opisuje slika 7: to je območje trčenja laserskega žarka in tarče, pri čemer moramo upoštevati obliko razpršenega odboja od tarče (dA), odbojnost (ρ) ter naklon vpadnega in odbojnega vala ($4\pi/\Omega$):

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega} \cdot \rho \cdot dA, \quad (2)$$

kjer je Ω ... prostorski kot;

ρ ... koeficient odbojnosti;

dA ... oblika oz. velikost tarče.



Slika 7: Presek odbojnega valovanja

Geometrija posameznega razpršenega odboja je simbolična, saj sta oddajnik in sprejemnik signala narisana precej narazen, v napravi pa sta nameščena blizu drug drugega (Wagner et al., 2006).

Z modeliranjem zaznane laserske energije $P_r(t)$ (enačba 3) lahko nazorno predstavimo odbojni presek $\sigma(t)$ in njegovo pravo obliko, hkrati pa postane tudi uporaben. Modeliranje se nanaša na dobro opredeljene osnovne funkcije, te pa na odbojni presek $\sigma(t)$ posameznih razpršenih odbojev na različnih oddaljenostih R (Wagner et al., 2007):

$$P_r(t) = \sum_{i=1}^N \frac{D_r^2}{4\pi R_i^4 \beta_t^2} \eta_{sys} \eta_{atm} S(t) * \sigma_i(t), \quad (3)$$

kjer je N ... število tarč;

D_r ... premer sprejemnikove zaslonke [m];

R_i ... oddaljenost med senzorjem in tarčo i [m];

η_{sys} ... sistemski faktor prenosa [-];

η_{atm} ... atmosferski faktor prenosa [-];

β_i ... divergenca oddanega žarka [rad];

$S(t)$... sistemsko ALS-odbito valovanje [DN];

σ_i ... diferencialni presek odbojnega valovanja BCS [m²].

2.3.1 Gaussova dekompozicija

Metoda za procesiranje valovnega zapisa je dobro poznana in se v praksi splošno uporablja. Sprejeti signal analiziramo in razčlenimo v posamične Gaussove krivulje, pri tem upoštevamo enačbo 4. Dobimo Gaussovo krivuljo, s katero zadovoljivo opišemo presek odbojnega valovanja in oddani laserski signal. Dekompozicija deluje z izračunom nelinearnih prilagoditev modela v opazovanem valovnem zapisu:

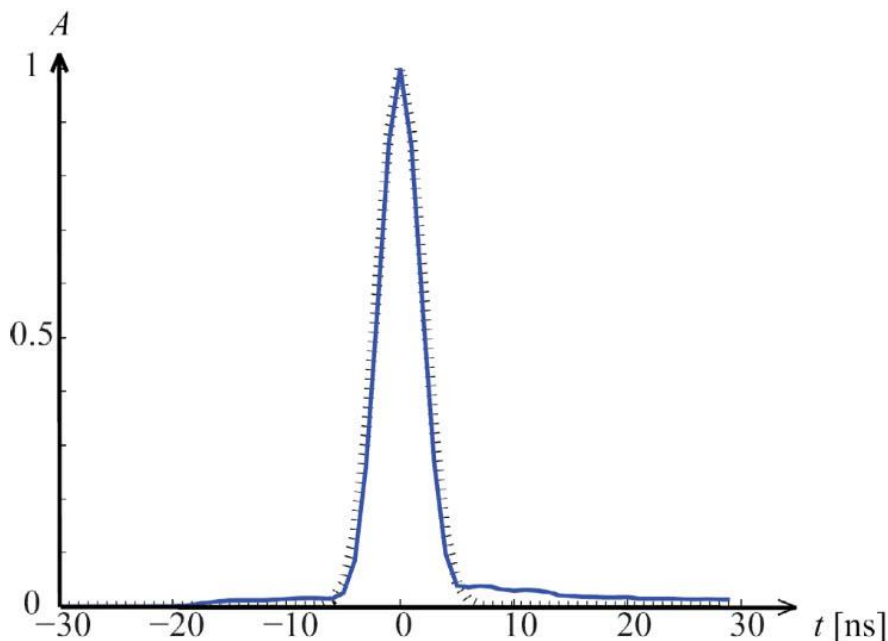
$$P_r(t) = \sum_{i=1}^N \hat{P}_i e^{-\frac{(t-t_i)^2}{2s_{p,i}^2}}, \quad (4)$$

kjer je \hat{P}_i ... amplituda odbojnega vala;

$s_{p,i}$... širina odbojnega vala;

t_i ... krožni čas od senzorja do tarče i in nazaj.

Potek Gaussove dekompozicije: S tem ko najdemo lokalne maksimume znotraj registriranega odbojnega signala, določimo celotno število odbojnih valov; prav tako določimo tudi približen položaj maksimuma amplitude za vsak odbojni val. Glede na vse te približke naredimo prilagajajoči model za valovni zapis (WF) – zmanjšamo razliko med Gaussovimi modeli (enačba 4) in merjenim oz. registriranim signalom (Mücke, 2008).



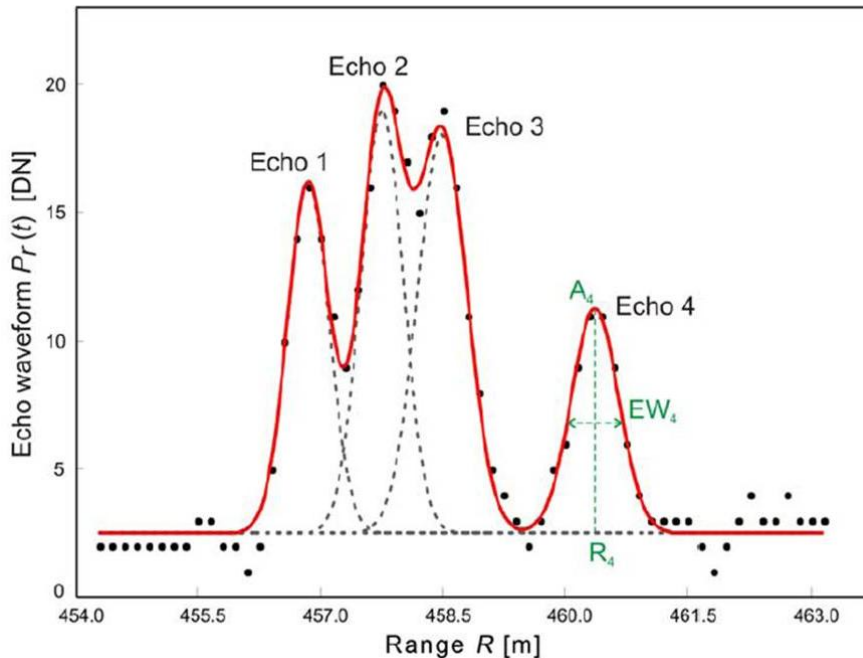
Slika 8: Primerjava obdelanega in neobdelanega signala

Odbojni signal, obdelan z Gaussovo dekompozicijo, je prikazan z linijo črnih pik, neobdelan signal iz merilnega sistema Riegl LMS-Q560 pa je prikazan z modro neprekinjeno linijo (Roncat et al., 2008).

Slika 8 prikazuje primerjavo med Gaussovim modelom signala in neobdelanim signalom merilnega sistema RIEGL LMS-Q560. Razlika med njima je manj kot $\pm 2\%$ v amplitudi vala, kar nakazuje na primernost Gaussove krivulje pri procesu modeliranja. Slika 9 pa lepo ponazarja Gaussovo krivuljo, ki jo dobimo z modeliranjem valovnega zapisa s pomočjo Gaussove dekompozicije. Razvidne so tudi druge pomembne značilnosti polnovalovnega zapisa – izpeljemo lahko maksimalno vrednost amplitude A_i in širino odbojnega vala EW_i . Parameter širina odbojnega vala je v splošnem opisan kot širina na polovici maksimuma krivulje (Wagner et al., 2006).

Vendar določitev števila odbojnih valov pri postopku dekompozicije ni tako preprosta, kot se sprva zdi. Problem nastane pri bolj kompleksnih oblikah valovnega zapisa in pri šibkih odbojnih signalih, ki so v primerjavi z motečimi šumi iz okolja slabi. Zato bomo v nadaljevanju podrobneje razložili tehniko izračuna s časovno zakasnitvijo, ki jo imenujemo

funkcija srednje vrednosti kvadrata razlike (ASDF¹) in je primerna za rešitev problema – to je določitev celega števila odbojnih valov.



Slika 9: Gaussova krivulja

Razlaga slike: Črne pike predstavljajo odbojni val, modeliran z Gaussovo dekompozicijo; rdeča linija je skupek Gaussovih krivulj; črna črtkana linija je posamezna Gaussova krivulja za vsak odbojni val posebej; A_i je amplituda odbojnega vala; EW_i je širina odbojnega vala (Mücke, 2008).

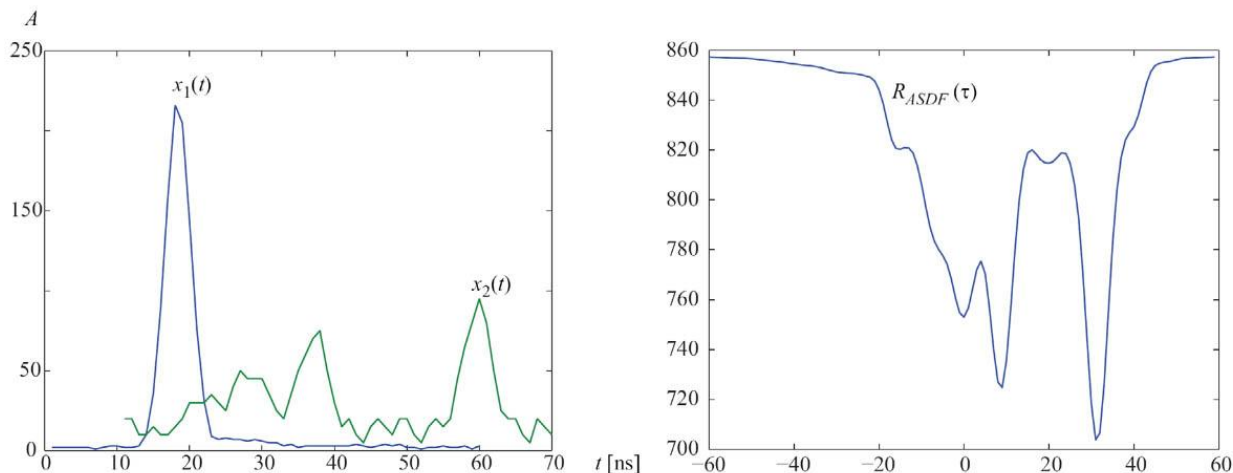
2.3.2 Funkcija srednje vrednosti kvadrata razlike – ASDF

Tehnika izračuna s časovno zakasnitvijo temelji na korelaciji referenčnega signala $x_1(t)$ (to je oddani laserski pulz) in merjenega signala $x_2(t)$ (to je registrirani odbojni signal). Ustrezno vrednost R_{ASDF} uporabimo za opis razlike med tema dvema signaloma:

$$R_{ASDF}(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x_1(kT) - x_2(kT + \tau)]^2 . \quad (5)$$

¹ Angleška kratica ASDF – average square difference function

Kjer je T vzorčni primer intervala, $(n - 1)T$ pa izračunana dolžina časovnega intervala. Slika 10 prikazuje značilen primer polnovalovnega zapisa $R_{ASDF}(\tau)$.



Slika 10: Funkcija srednje vrednosti kvadrata razlike

Levo je z modro linijo predstavljeno oddano valovanje v času $x_1(t)$ ter z zeleno barvo odbito valovanje $x_2(t)$. Desno je njuna ASDF (Roncat et al., 2008).

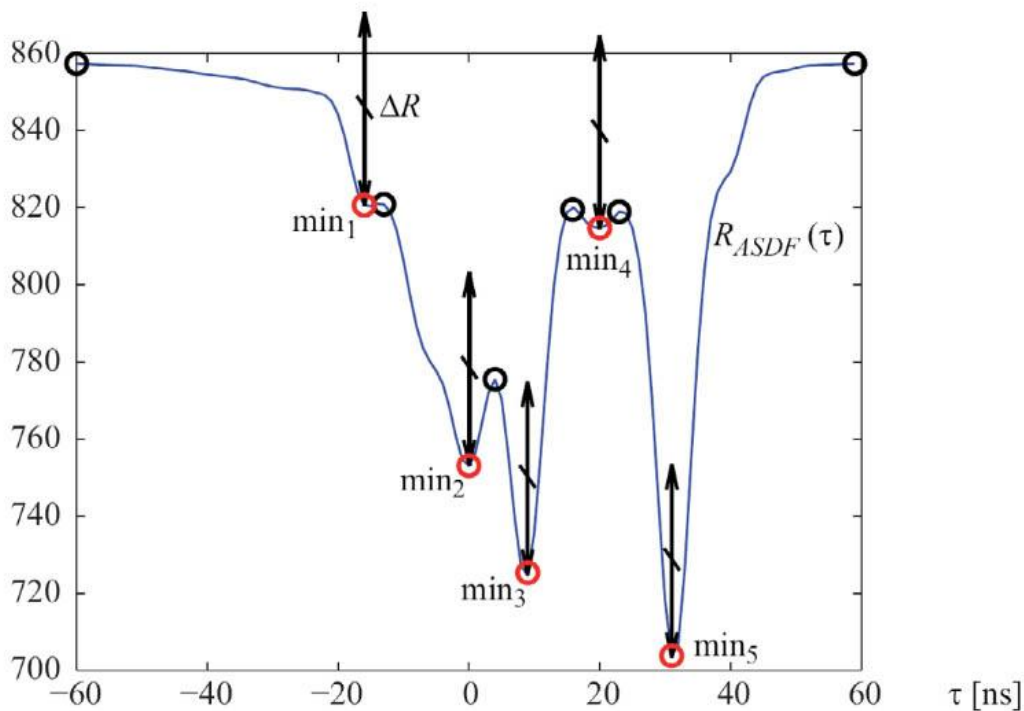
V analizi polnovalovnega zapisa, kakor omenja Wagner et al. (2007), se lahko v posamezni nalogi zahteva različne oblike referenčnega signala $x_1(t)$:

- oddani laserski signal sam po sebi,
- signal, izračunan po Gaussovi metodi,
- neobdelan signal iz merilnega sistema, kot ga določa izvorni laserski skener.

Izračun časovne zakasnitve Δt izbranega testnega vala je vrednost τ , ki odgovarja minimalni vrednosti $R_{ASDF}(\tau)$. Torej lahko na teh vrednostih pričakujemo posamezne položaje testnih valov pripadajočega odbojnega vala. Pri polnovalovnem zapisu je smiselno pričakovati sestavljene, večdelne odbojne vale, ki izhajajo iz enega samega laserskega pulza. Zato moramo upoštevati poleg globalnih minimumov tudi lokalne maksimume vrednosti R_{ASDF} , saj so lokalni maksimumi iskanih valov locirani med njimi (slika 11). Za ločitev pravih testnih valov od šuma iz okolja, moramo najprej ločiti med seboj njihove lokalne minimume. To naredimo z določitvijo minimalne razdalje ΔR_{\min} . S tem le grobo določimo dimenzije vzorčnega intervala T , v katerem nato določimo položaj posameznih valov – izračunamo

prilegajočo se parabolo, ki s svojim vrhom Δt_{fine} (enačba 6) določi točno lokacijo posameznega vala (Wagner et al., 2007).

$$\Delta t_{fine} = -\frac{T}{2} \frac{R_{ASDF}(\Delta t + T) - R_{ASDF}(\Delta t - T)}{R_{ASDF}(\Delta t + T) - 2R_{ASDF}(\Delta t) + R_{ASDF}(\Delta t - T)} + \Delta t. \quad (6)$$



Slika 11: Postopek določitve števila odbojnih valov z uporabo ASDF

Črni krogi predstavljajo lokalne maksimume, v katerih se določi lokalne maksimume odbojnega vala. Rdeči krogi predstavljajo lokalne minimume vrednosti R_{ASDF} (Roncat et al., 2008).

2.4 Širina odbojnega vala

Odbojna širina vala je grafično predstavljena s sliko 9, kjer je v nanosekundah izražena širina vala na polovici maksimuma odbojnega vala, ki je opisan z Gaussovo krivuljo. Dobimo pa jo le pri skenerjih s polnovalovnim zapisom odbite laserske energije in je del osnovnih

podatkov, ki jo proizvajalec takšnega skenerja ponuja. Oddani laserski pulz skenerja Riegl LMS-Q560 ima 4 ns dolgo širino odbojnega vala na polovici maksimuma amplitude (omenjeno v tabeli 1).

Odbojna širina vala je zanimiva pri pridobitvi informacij o hrapavosti¹ površja, ki opisuje majhne spremembe na odbojni površini: trava na travnikih, strešniki na strehi in drugi podobni majhni odmiki na površju. O hrapavosti govorimo, kadar so odmiki manjši od valovne dolžine signala. Laserske točke s svojim položajem v prostoru hrapavosti ne opisujejo kot nek element stvarnosti, temveč jo opisujejo posredno s svojimi parametri. Odbojna širina je pokazatelj za hrapavost in za naklon tarče. Večje vrednosti odbojne širine se pojavljajo pri odbojih, ki imajo laserske odtise na bolj navpično usmerjenih tarčah. Nakazujejo večjo terensko hrapavost – prisotnost naklonsko razgibanih laserskih odtisov (povzeto iz Hollaus in Höfle, 2010).

Na širino vala oz. na večanje širine vala vplivajo naslednji trije dejavniki: hrapavost površja, kot odboja² ter naklon površja. Ti faktorji pa tudi vplivajo drug na drugega. V povezavi z amplitudo odbitega valovanja je širina vala bolj stabilna pri večjih vrednostih amplitude. Pri nizkih amplitudah dobimo izredno široke vale ali, nasprotno, izredno ozke vale. To je običajno za šibke pulze, kjer šum laže pokvari opazovanja in ta potem niso uporabna. Glede na hrapavost odbojnega površja (kot navaja Yu-Ching et al., 2010) poznamo naslednje značilnosti širine vala: pri gladkem površju (asfalt in pokošena trava) je odbojna širina blizu širine oddanega laserskega pulza; grobo površje (nizko rastje) ima odbojno širino nekoliko večjo; pri površju z nizko vegetacijo (visoka trava in grmovje) je odbojna širina vala nesimetrična ter konstantno večja od širine oddanega pulza; krošnje dreves pa so zastopane z najbolj širokimi odbojnimi vali, vendar pa med njimi najdemo tudi manjše širine, kot jo ima oddani pulz.

Vpliv hrapavosti na širino odbojnega vala jasno kaže na pomembnost naklona odbojne površine. Iz tega sklepamo, kakšne so potencialne možnosti pri uporabi širine vala na stavbah zaradi njihovih vertikalnih sten.

¹ V angleščini uveljavljen izraz za hrapavost je roughness.

² Kot odboja je kot med vpadno smerjo laserskega žarka ter odbojno površino.

3 SEGMENTACIJA OBLAKA TOČK

Segmentacija je pomemben postopek pridobivanja informacij iz 3D-oblaka točk s pomočjo različnih algoritmov, ki na podlagi kriterijev razvrščajo točke v manjše segmente. Najbolj splošni postopki segmentacije slonijo na izbiri točk, ki pripadajo isti ravnini, cilindru ali gladkemu površju (Vosselman in Mass, 2010, str. 63). Takšni segmenti so lahko uporabljeni za različne namene in potrebe. Za nas so zanimivi segmenti, ki so določeni s pogojem ravnine, saj so najbolj primerni za modeliranje stavb.

V uporabi je veliko metod segmentacije, saj se recimo za prepoznavanje stavb uporablja drugačne postopke kot za pridobitev DMR-ja. Postopek segmentacije lahko v grobem razdelimo na dva glavna postopka: modelno vodena in podatkovno vodena segmentacija.

Pri modelno vodeni segmentaciji so segmenti pridobljeni s pomočjo osnovnih geometrijskih površin, kot so ravnina, valj ali kroglja. Postopek se v glavnem izvede v objektnem prostoru, kjer so uporabljene samo koordinate točk. Uporablja se postopek rast regij iz semen (angl. seeded region growing), ki upošteva sosednje točke. Postopek rast regij na osnovi določenih pogojev rasti združuje manjša območja v večja, začne pa se z nizom točk, ki jih imenujemo seme (Grigillo, 2010, str. 58). V postopku rasti se semenu na podlagi kriterijev podobnosti priključujejo sosednja območja. V segmentaciji, opisani v poglavju 3.1, ta postopek ni uporabljen.

Podatkovno vodena segmentacija za razliko od modelno vodene operira s skupinami, kjer se upošteva prostorske odnose med točkami ter pojave, ki dodatno opisujejo značilnosti podatkov (to so recimo intenziteta, višina točke nad tlemi ali normalni vektor). Te vrste postopki so pogosto narejeni tako, da podpirajo 3D-informacije ALS-podatkov, zato so primerni za določevanje bolj kompleksnih površin. Metoda poteka v pojavnem in objektnem prostoru.

V diplomski nalogi smo uporabili postopek segmentacije, kot jo opisujeta Filin in Pfeifer (2006), temelji pa na določitvi kvalitete pojavov, ki jih uporabljamo za ločevanje točk. Predstavljen je sistem sosedstva, ki ga imenujemo naklonsko prilagodljiva okolica. Celoten postopek omenjene segmentacije pa je opisan v podpoglavju 3.1.

V nadaljevanju so omenjeni nekateri pojmi, katerih pomen naj za lažje razumevanje podrobneje razložimo. Pojavni prostor se uporablja za opis določenih značilnosti podatkov (entitete). Je osnovni prostor, s pomočjo katerega se opravi prvi izbor točk za strogi postopek segmentacije. Od pojavnega prostora je mogoče ločiti položajne koordinate, ki jih pojavni prostor prav tako vsebuje. Pojavni vektor je določen na podlagi izračuna normalnega vektorja, ki ga potrebujemo za določitev kakršne koli ravnine v prostoru. Za pridobitev končnih segmentov je določitev ravnine, ki jo določajo izbrane točke, ključnega pomena. Zato je normalni vektor izbran za pojavni vektor. Ko ločimo položajne koordinate od pojavnega prostora, dobimo znakovni prostor, kjer se na podlagi atributov znova naredi izbor skupin. Te so v nadaljevanju obravnavane v objektnem prostoru, v katerem imamo tudi pojavni vektor in v katerem je izpeljan zadnji izbor skupin – to so segmenti.

Pogosto se postopka segmentacije ne ločuje od postopka izbire skupin, ki temelji na podobnih pojavnih vektorjih v pojavnem prostoru. Stroga segmentacija pa je rezultat ločevanja v objektnem prostoru. Celoten postopek poenoteno imenujemo segmentacija.

3.1 Segmentacija z uporabo naklonsko prilagodljive okolice

Na začetku naj poudarimo, da je večina obstoječih postopkov segmentacije za ekstrakcijo stavb osredotočenih na pridobivanje ravnih površin, ki skupaj tvorijo streho stavbe. Zunanji zidovi stavb so pri iskanju ravnin iz segmentov točk pri aerolaserskih tipih podatkov nemalokrat zanemarjeni, saj je težko zagotoviti dovolj veliko količino točk, ki bi zadovoljivo predstavljale vertikalne stene. Pri modeliranju stavb običajno prav streha v večji meri določa model v celoti. Najbolj natančen in realen obod oz. zunanjo linijo stavbe pa dobimo z določitvijo njenih zunanjih sten – fasad, kar je bistveno za našo analizo.

Segmentacija, uporabljena v diplomski nalogi, upošteva karakteristike laserskega skeniranja¹, podpira 3D-podatke ter kompleksne površine. Metoda temelji na analizi geometričnih entitet (angl. feature-based) ter je osnovana z analizo grupiranja (angl. cluster analysis). Z analizo entitet (v obliki pojavnega vektorja) lahko integriramo posamezne lastnosti, kar je mnogo boljše, kot če bi analizirali vsako lastnost posebej. Pomembna je kakovostna določitev entitet,

¹ Z upoštevanjem pojavov laserskih podatkov je mogoče pridobiti informacije, ki so običajno spregledane.

kar zagotavlja njihovo zanesljivost. Metodologija grupiranja pa je dokaj splošna in prilagodljiva, saj omogoča v prostoru prilagodljive odnose med točkami in atributi. Z analizo grupiranja najprej izberemo primerne podatke – vsem točkam določimo lastnosti, s pomočjo katerih nato združimo podatke v posamezno skupino (povzeto po Filin in Pfeifer, 2006).

V nadaljevanju je celotna metoda segmentacije predstavljena po naslednjih točkah:

- grupiranje na osnovi entitet,
- naklonsko prilagodljiva okolica in vpliv na obstoječe pojave,
- postopek segmentacije,
- dodatno filtriranje oz. čiščenje.

3.1.1 Grupiranje na osnovi entitet

Entitete temeljijo na:

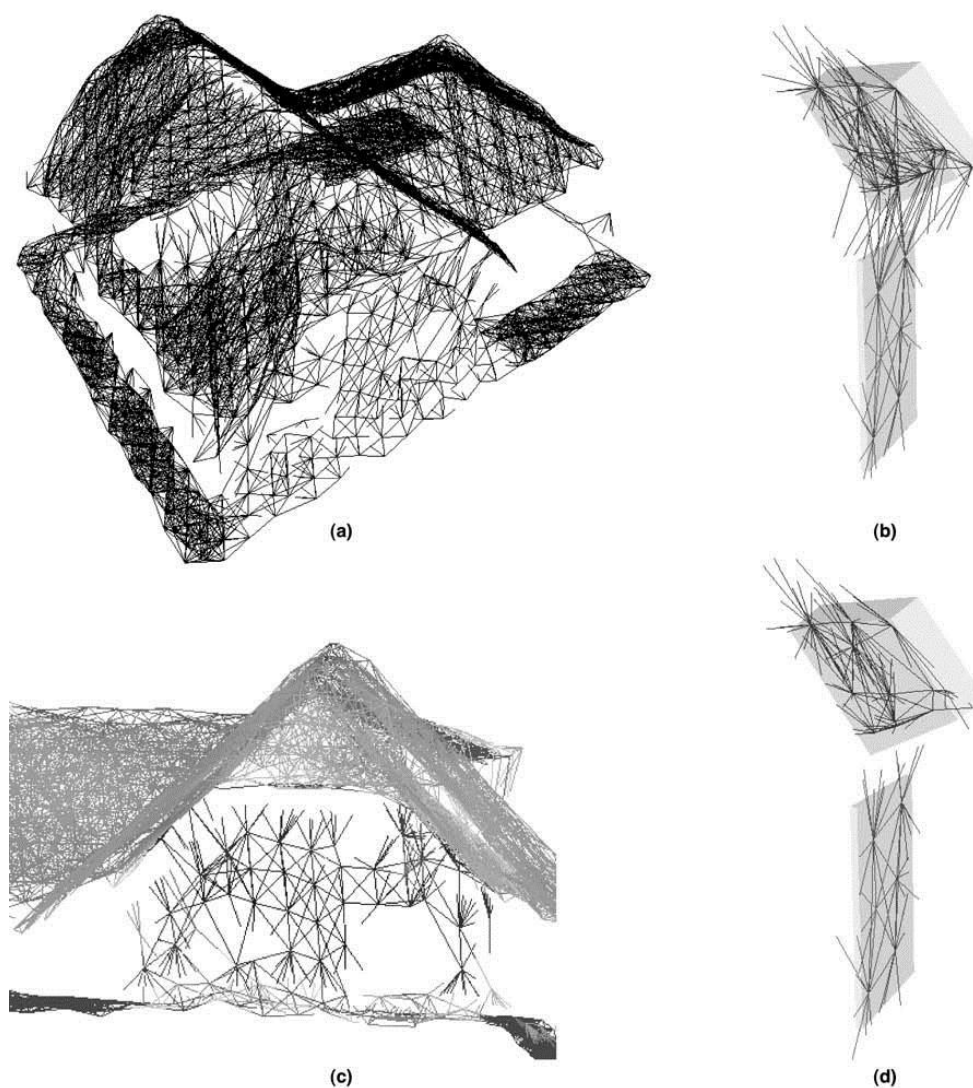
- položaju točk ter meritvah za teksturo površja,
- parametrih tangentne ravnine v odnosu do točke,
- višinskih razlikah določene točke do sosednjih točk.

Ti pogoji pomembno vplivajo na ločevanje med skupinami. S položajem določimo sosedstvo med točkami ter zagotovimo, da so točke ene skupine zbrane v objektnem prostoru. Višinske razlike izražajo lokalne variacije in lažje zaznavanje večjih višinskih skokov (angl. step edges) – z njimi bolje določimo meje med skupinami in poskrbimo za primerno opozorilo, če obstaja visoka vegetacija. Tangentne ravnine, ki jih izračunamo s pomočjo normale na površino ter položaja ravnine, prve zaznajo nezveznost in modelirajo obstoj ukrivljenosti (angl. crease edges). S tem izboljšamo razmejevanje med površinami različnih naklonov ter ločevanje vegetacije od stavb, ko so si v neposredni bližini. Konstanta tangentne ravnine omogoča ločevanje med površinami podobnih nagibov, kot je recimo ločevanje med tlemi in ploskvijo horizontalne strehe stavbe. Normalni vektor pa določa koordinate točke v pojavnem prostoru (povzeto po Filin in Pfeifer, 2006).

3.1.2 Naklonsko prilagodljiva okolica

Kakor že omenjata Filin in Pfeifer (2006), sta zanesljivost in kakovost entitet v pojavnem prostoru bistveni za uspeh algoritmov grupiranja. Izračun entitet je pomemben zaradi možnosti obstoja zunanjih točk (zanesljivost) ter zaradi natančnosti entitet (kakovost). To je osnovno vodilo pri snovanju algoritmov segmentacije. Povezanost med točkami ima ogromen vpliv, kajti povezava z zunaj ležečo točko vpliva na slabšo določitev entitet in zaplete segmentacijo. Nasprotno pa povezava, ki ne zadeva zunanjih točk, povečuje natančnost entitet in pospeši segmentacijo. Vezi med točkami so rezultat določevanja okolice: obravnavani točki se izbere sosed, nato pa entitete izbranih sosed. Pri nepravilno razporejenih laserskih točkah se običajno povezave med njimi vzpostavi z Delaunayjevo triangulacijo. Modeliranje s TIN¹ že v osnovi ni primerno zaradi 3D-objektov, kot so stavbe, ter zaradi neprilagodljivosti pri gostoti točk. Nobena od omenjenih triangulacij, ki sta v praksi dobro poznani, ne ustreza zahtevam laserskega oblaka točk ter izračunu normalnega vektorja na ravnino. Zato je uporabljen sistem naklonsko prilagodljive okolice, ki teh pomanjkljivosti nima, obenem pa ostaja preprost in učinkovit. Slika 12 prikazuje omenjeni sistem na primeru hiše (Filin in Pfeifer, 2005). Zraven pa je tudi podan detajl strehe in zidu, kjer sta prikazana dva različna postopka povezovanja točk. Pri prvem (slika 12b) so točke povezane samo na osnovi cilindričnega sistema, pri drugem (slika 12d) pa so točke povezane na osnovi že omenjenega sistema naklonsko prilagodljive okolice. Cilindrični sistem je sicer podoben prilagodljivemu sistemu, kar zadeva kriterij cilindra, vendar pri tem ne uporablja vseh pogojev, opisanih z enačbo (7).

¹ TIN (angl. Triangulated Irregular Network) je angleška kratica za mrežo nepravilnih trikotnikov.



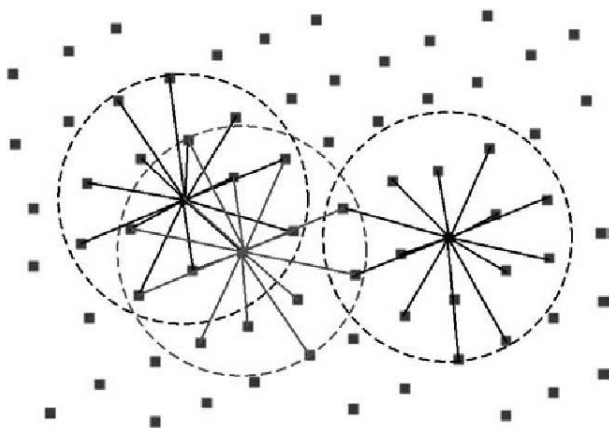
Slika 12: Naklonsko prilagodljiva okolica – določitev sosednjih točk za hišo

Sosedstvo točk prikazane hiše – (a) in (b) – je določeno na osnovi sistema naklonsko prilagodljive okolice. Sliki (b) in (d) prikazujeta detajl zidu in nadstreška, pri tem je pri (b) uporabljen cilindrični sistem, pri (d) pa sistem naklonsko prilagodljive okolice (Filin in Pfeifer, 2005).

Naklonsko prilagodljiva okolica:

Predlagan sistem, kot ga opisujeta Filin in Pfeifer (2006), temelji na kriteriju razdalje in geometričnih značilnostih podatkov. Te karakteristike je treba upoštevati pri izboru točk za sosedstvo, ki poteka po naslednjih korakih:

- Srednja točka osi omejenega vertikalnega valja je centrirana v točki obravnave. Valj tvori prostornino, znotraj katere so vse točke vzete kot potencialne kandidatke obravnavane točke (slika 13).
- Sledi prilagoditev lokalnim naklonom/nagibom. Kandidatke morajo biti pod maksimalno razdaljo: to je razdalja med izračunano lokalno tangentno ravnino točke obravnave in poljubno točko znotraj valja. Te točke so vzete kot okolica obravnavane točke in tvorijo sosedstvo.



Slika 13: Kriterij cilindra za izbor sosednjih točk

Črni krogi prikazujejo radij valja in njegov obseg, ki določa sosednje točke glede na središčno točko obravnave (Filin in Pfeifer, 2005).

Naj bo R množica laserskih točk in N naklonsko prilagodljiva okolica točke obravnave; $p = (p_x, p_y, p_z)$:

$$N_{(p)} = \left\{ q \in R \mid \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2} \leq r \wedge \|p_z - q_z\| \leq h \wedge \|(p - q)^T \cdot n\| \leq d \right\}, \quad (7)$$

kjer r ... radij valja [m];

$2h$... višina valja [m];

n ... normalni vektor tangentne ravnine v točki p z $\|n\| = 1$;

d ... največja dovoljena razdalja od točke do tangentne ravnine, s pogojem $d < h$.

Vektor n (to je orientacija tangentne ravnine) je izračunan iz množice točk znotraj valja. Na splošno velja, da sosedstvo in lokalna povezanost definirata okolico tako, da se točke na isti ravnini povežejo. Že prej smo omenili in tudi iz enačbe se lepo vidi, da so radij in višina valja

ter razdalja od tangentne ravnine do točke pomembni parametri. Za določitev radija valja se lahko uporabi naslednje kriterije (Filin in Pfeifer, 2005):

- Karakteristike senzorja: predpiše se minimalno vrednost razdalje med točkami (to ni razdalja d iz enačbe 7), ki je odvisna od gostote točk in velikosti odtisa laserskega žarka. Ni namreč smiselno, da je razdalja manjša, kot je razmik med točkami, saj bomo dobili prazno sosedsko množico; kadar pa se laserski odtisi med seboj prekrivajo, bomo dobili le najbližje točke, ki pa ne bodo zagotavljale prostorske predstavnosti.
- Karakteristike izračuna: nanaša se na izračun lokalnih ploskovnih parametrov ter na zahteve pri določitvi in definiranju le-teh – za izračun normale na ploskev se namreč zahteva več kot tri točke.
- Karakteristike uporabe: nanaša se na določeno stopnjo spremenljivosti: kadar ni dovolj zadovoljivih podatkov ali pa z njimi ni mogoče modelirati, mora biti sosedstvo dovolj široko, da se te vplive izloči.

Višina valja je določena na podlagi stopnje ločenosti med sloji v samih podatkih. Parameter je predvsem odvisen od namena uporabe, saj so zgornje in spodnje meje izbrane glede na višinske skoke med različnimi objekti in terenom – to pa se od primera do primera razlikuje.

Pri določitvi razdalje od tangentne ravnine do točke se mora upoštevati karakteristike površja in določeno stopnjo pričakovanega šuma – točke, ki do neke mere popačeno predstavljajo stvarnost.

3.1.3 Postopek segmentacije

Pojavni vektor vsebuje informacije o položaju točke in njenih parametrih tangentne ravnine. Za poenostavitev iskanja grup in povečanje zmogljivosti algoritma je potrebno ločiti položajne koordinate od pojavnega vektorja. Tako dobimo znakovni prostor (angl. attribute space), ki ne vsebuje več podatkov o položaju. Sedaj lahko členimo algoritem grupiranja na dva dela:

- Najprej se v znakovnem prostoru poišče skupine točk, ki so primerne za nadaljnjo določanje površine – nastanejo razredi. Ustvarjanje razredov poteka neodvisno od položaja točk. Pomembni so atributi, ki jih vsebuje znakovni prostor.

- V drugem koraku se laserske točke, ki so del določenega razreda, grupira naprej v objektni prostor. Pri tem se upošteva njihove sosedske vezi. V objektnem prostoru točka vsebuje položajne koordinate, ki pa skupaj z njenim normalnim vektorjem popolnoma definirajo tangentno ravnino (Vosselman et al., 2004). Uporaba normalnega vektorja zmanjša tveganje pri odkrivanju ploskev v objektnem prostoru.

Povezava med grupo enega in drugega prostora (znakovni in objektni) ni vselej »ena na ena«. Skupine izbranih točk v objektnem prostoru so določene na podlagi atributov in njihovih medsebojnih vezi. S tem dobimo edinstven izbor skupine točk v objektnem prostoru, ki jih imenujemo segmenti. Tako lahko nekatere točke iz znakovnega polja izpadejo iz izbora za segmente v objektnem prostoru, ker ne izpolnjujejo vseh pogojev.

V pojavnem prostoru vsako točko predstavlja njen pojavni vektor. Vrednosti tega vektorja določajo koordinate laserske točke v tem prostoru. Skupine so identificirane na podlagi medsebojne bližine točk v pojavnem prostoru. Z izbranimi entitetami in grupiranjem v pojavnem prostoru določimo gladke površine. Vegetacije in vegetaciji podobne objekte pa ne uvrščamo mednje zaradi spreminjajoče se normale na površino. S segmentacijo s pomočjo grupiranja izberemo samo tiste točke, ki si delijo isto tangentno ravnino (povzeto po Filin in Pfeifer, 2006).

Če povzamemo: Z grupiranjem, za katerega uporabljamo postopek naklonsko prilagodljive okolice, izračunamo entitete (kot je normalni vektor) ter določimo razrede, ki postanejo segmenti, če so izpolnjeni vsi pogoji – pripadnost ravnini, na kateri imajo točke isto orientacijo. Orientacijo ravnine določa normalni vektor, z njim pa je postal celoten izračun bolj zanesljiv in točen, saj se vpliv zunaj ležečih točk močno zmanjša (Filin in Pfeifer, 2006).

3.1.4 Dodatno filtriranje oz. očiščenje površine

Ko smo izločili oz. pridobili ter tudi preverili posamezne skupine točk ter pridobili segmente, sledi faza čiščenja. Preverjamo naslednje stvari:

- Ali se lahko posamezna skupina raztegne – možnost razširitve?
- Ali sosednje skupine delijo z njo skupne attribute?

- Ali je to izmerljivo?

Glede na sosednje točke preverimo obseg segmenta s testiranjem: ali točka pripada isti porazdelitvi kot sam segment. Testiramo se s t-statistiko, pri kateri preverjam podobnost izračunanih parametrov in standardnih deviacij v skupini. Običajno je ta test primeren za površine, ki so ravne – preverja se možnost tvorjenja ene skupne ravnine. Če test ni uspešen, se preveri s F-testom možnost pripadanja dveh različnih površin eni gladko ukrivljeni površini.

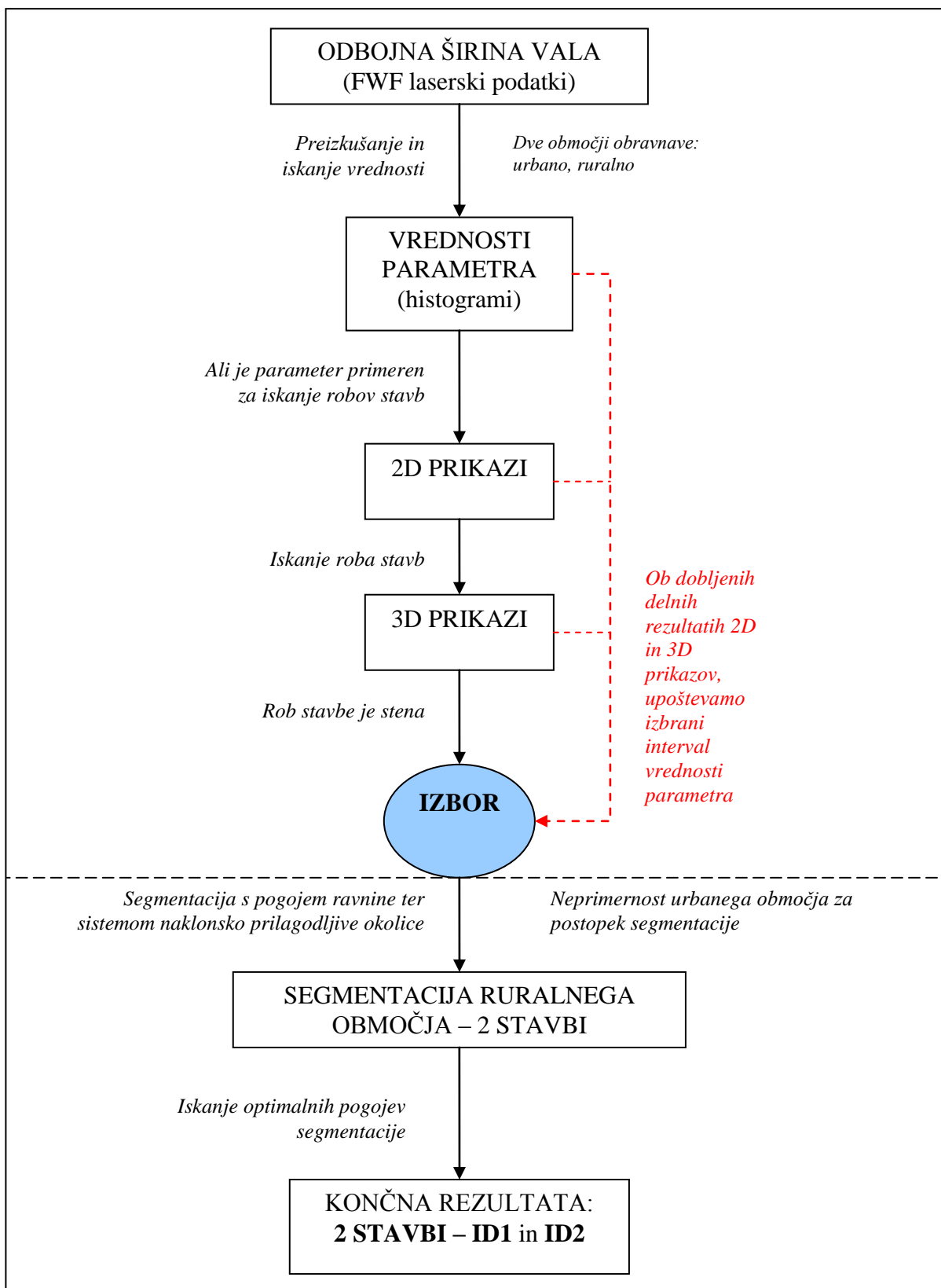
4 PRAKTIČNI DEL NALOGE

4.1 Metodologija dela

Glede na začetne usmeritve, predstavljene v uvodu, se je naše delo usmerilo v podrobno analizo in raziskavo širine odbojnega vala, saj je pridobivanje podatkov s polnovalovnim zapisom odprlo nove možnosti pri obdelavi in pridobivanju informacij o površju Zemlje. Širina odbojnega vala je za praktično uporabo precej neraziskana količina. Prav zaradi tega smo se lotili podrobnejše obravnave in preučitve možnosti, ki jih ta parameter ponuja.

Delo je temeljilo na postopkovnem analiziranju rezultatov in ugotovitev, ki smo jih pri tem dobivali. Zaradi sprotnega ugotavljanja, kaj nam dobljeni rezultati ponujajo in omogočajo, kakšne so nadaljnje možnosti analize ter kam postopek vodi, bi lahko rekli, da je delo temeljilo predvsem na raziskovalnem načelu. Za lažjo predstavo o poteku in načinu dela nam shema (slika 14) bolj nazorno prikazuje potek praktičnega dela.

Na začetku smo si postavili le nekaj osnovnih smernic, ki so kot hipoteze predstavljene že v uvodu. Na podlagi zastavljenih osnovnih vodil smo se najprej lotili osnovnega proučevanja nekaterih parametrov, ki jih vsebujejo laserski podatki za vsako posamezno točko v laserskem oblaku. Kmalu smo se osredotočili le na odbojno širino vala, saj nam je bil ta parameter od vseh največja neznanka, torej zanimiv za obravnavo. Delo je od tu naprej temeljilo samo na preizkušanju: kaj parameter sploh je, kaj ponuja in opisuje ter kaj je o njem znanega. Ob vsem tem pa se nismo oddaljili od osnovnih smernic: ali je mogoče ločiti stavbe od ostalih zajetih elementov stvarnosti na podlagi izbranega parametra odbojna širina vala. Z analizami smo pridobili uporaben interval tega parametra, ki je spodbudno nakazoval na možnost nadaljnje obdelave podatkov. Na tej točki smo imeli le dobre obete, vendar ne še povsem zadovoljivih rezultatov.



Slika 14: Shema metodologije dela

Zaradi dobrih začetnih rezultatov smo se odločili za postopek segmentacije, ki je zahteval, da dotedanje delo postavimo na novo. Prej omenjeno preizkušanje je naenkrat dobilo okvir, kar nas je vrnilo na začetek, saj smo morali na novo izbrati območje obravnave. Izseki, na katerih smo analizirali parameter, niso bili primerni za segmentacijo, zato smo na podlagi pridobljenih spoznanj in ugotovitev postavili nov okvir z novimi območji obravnave: izbrali smo dve območji, ruralno in urbano, ki sta v nadaljevanju tudi predstavljeni. Med postopkom segmentacije pa se je urbano območje izkazalo za neprimerno. Delo se je tako usmerilo le na ruralno območje, kjer smo uspešno zaključili postopek, dobili želene segmente in jih v končni fazi primerjali s katastrskimi podatki istega območja.

Na začetku je bilo delo zastavljeno precej široko, zato smo kasneje močno zožili potencialne poti raziskovanja in tako tudi zmanjšali verjetnost uspešno pridobljenega končnega rezultata. V nadaljevanju ni predstavljeno celotno delo, ki je bilo na začetku namenjeno predvsem preizkušanju in raziskovanju, temveč je opisan le tisti del, ki se je izkazal za uporabnega. Prav tako ni predstavljen rezultat segmentacije urbanega območja, saj nismo pridobili uporabnih segmentov.

Pri obdelavi laserskih podatkov smo uporabili naslednje računalniške programe:

- Matlab R2008a: Bistveni del naloge smo opravili z Matlabom, ki smo ga uporabljali pri selekciji in zožitvi prvotnega oblaka laserskih točk na manjša območja, lažja za obdelavo. Pri nadaljnji obdelavi pa je bila bistvena vizualizacija izbranih območji glede na značilnosti določenih parametrov laserskega valovanja. Na podlagi dobljenih grafov smo lahko analizirali rezultate.
- Building Generator: S programom za segmentacijo, ki ga je sestavil Peter Dorninger s sodelavci, smo si pomagali pri zadnji in najbolj pomembni selekciji točk – postopku segmentacije, ki je pokazal možnost uporabe širine odbojnega vala za ekstrakcijo oboda stavb.
- SCOP GVE: SCOP je predvsem program za interpoliranje, urejanje, vizualiziranje in uporabo DMR-ja (angl. digital terrain model – DTM). GVE je programska razširitev, ki ima orodja za zagotavljanje kvalitete DMR-ja, vizualizacije, numerično preverjanje podatkov ter upravljanje z različnimi vrstami podatkov, kot so: XYZ, DXF, Winput, LAS, ArcGIS Shapefile, ArcGIS ASCII Grid, TIFF, BIL,

FLT itd. Za nas so bili pomembni predvsem laserska vrsta podatkov (LAS), Winput (poligoni) ter TIFF (raster).

4.2 Področje obravnave in podatki

Vsem podatkom je skupna delitev na liste, to so območja kvadratne oblike, velikosti 500 m x 500 m. V diplomski nalogi smo obravnavali 2 lista v merilu 1 : 1000. Vse podatke smo dobili na Tehniški univerzi Dunaj, Inštitutu za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje.

4.2.1 Laserski podatki

Mesto Dunaj je bilo leta 2007 v celoti posneto z laserskim skenerjem zaradi potreb po boljšem načrtovanju, saj prebivalstvo stalno narašča, ter zaradi popisa pomembnih zgodovinskih stavb, nadzora pri načrtovanju gradnje in evakuacijskega načrta v primeru katastrof. Celoten projekt je bil izveden z laserskim skenerjem RIEGL LMS-Q560, ki zagotavlja zahtevano gostoto točk. Tabela 2 podaja osnovne specifikacije laserskega skeniranja za ta projekt.

Tabela 2: Osnovne značilnosti projekta laserskega skeniranja mesta Dunaj

Projekt laserskega skeniranja mesta Dunaj leta 2007	
Površina	454 km ²
Število trajektorij	648
Število točk	10·10 ⁹
Gostota točk na ³ / ₄ obravnavanega območja	20 točk/m ²
Absolutna natančnost meritev	11 cm
Višina	450 – 500 m AGL
Laserska naprava	RIEGL LMS-Q560
Frekvenca skeniranja	200 kHz

Narejenih je bilo več kot 600 letov nad izbranim območjem z več kot 50 % bočnim prekrivanjem na višini od 450 do 500 metrov nad nivojem tal (angl. AGL – above ground level) in hitrostjo 80 vozlov (to je navtična milja/uro ali 1.852 km/h).

Podatki so bili kasneje obdelani v treh pomembnih korakih:

- procesiranje položaja in višine za doseganje največje natančnosti;
- Analiziranje polnovalovnega zapisa laserskih podatkov, upoštevajoč položaj in višino ter izvoz trajektorij - vse v WGS84 (ETRF89) koordinatnem sistemu;
- transformacija iz WGS84 (ETRF89) v lokalni avstrijski Gauss-Kruegerjev koordinatni sistem. Poudariti moramo, da ima mesto Dunaj višinski sistem prirejen, saj je višinsko izhodišče Dunaja postavljeno na 156,680 metrov nad izhodiščem, ki je določen z normalnim reperjem v Trstu in predstavlja srednji nivo morja v določenem časovnem trenutku (višinski datum).

Končni rezultat snemanja je približno 10 bilijonov merjenih točk, ki sestavljajo na treh četrtinah celotnega območja skupaj povprečno gostoto 20 točk/m². Položajna natančnost je bila določena s standardno deviacijo 11 cm.

Slika 15 prikazuje letali, uporabljeni za snemanje pri projektu laserskega snemanja Dunaja.



Slika 15: Letali Diamond z večnamensko platformo: DA42-MPP IN HK36-MPP
(internet: http://www.geoconnexion.com/uploads/vienna_intv7i5.pdf, 23.4.2009)

Na Dunaju smo imeli na voljo dvoje vrst podatkov:

- urbano območje: list 108081, 3 pasovi (angl. strips) zemljišča,
- ruralno oziroma primestno območje: list 117098, 10 pasov zemljišča.

Vsak list je pokrit z določenim številom pasov laserskega snemanja terena. Če hočemo imeti neko območje v celoti pokrito oziroma zajeto z meritvami laserskega skenerja, je med zajetimi pasovi potrebno zagotoviti določeno prekrivanje. Večkrat ko neko območje posnamemo, bolj podrobno ponazoritev stvarnosti lahko dobimo. Pri tem je potrebno poudariti, da je tudi večkratna prekritost smiselna le do neke mere. To je odvisno od namena uporabe. V našem primeru smo potrebovali zelo dobro prekritost, boljšo kot je potrebna za osnovno klasifikacijo laserskih točk (kot je določitev modela terena). Urbano območje so prekrivali 3 pasovi zemeljskega površja, ruralno pa 10 pasov. Med njima je torej glavna razlika v prekritosti, kar je bistveno vplivalo na kasnejšo obdelavo, ko smo uporabili le list 117098 (ruralno območje).

Predstavljen je izsek dela iz datoteke *117098_0557.fwf*, ki vsebuje zaznane odbojne laserske signale:

X	Y	Z	GPS	A	EW		
8784.830	349035.380	7.820	50641.040279	16.00	4.40	1	3
8784.940	349035.630	6.900	50641.040279	19.00	5.70	2	3
8785.140	349036.080	5.230	50641.040279	30.00	4.70	3	3
8784.700	349035.400	9.340	50641.040284	14.00	4.00	1	4
8784.870	349035.780	7.950	50641.040284	23.00	6.00	2	4
8784.930	349035.920	7.450	50641.040284	28.00	6.50	3	4
8785.190	349036.530	5.190	50641.040284	20.00	4.00	4	4
8784.890	349036.150	8.170	50641.040289	32.00	6.40	1	2

Vsebina izseka datoteke je razložena po stolpcih: prvi trije stolpci so 3D-koordinate xyz [m], sledi GPS čas [s], amplituda odbojnega signala [DN], EW – širina odbojnega signala [ns], tip odbojnega signala (prvi od mnogih, vmesni, zadnji od mnogih, zadnji in edini), število odbojnih signalov.

Velika količina in velikost podatkov bi lahko zelo oteževala delo, zato je bilo treba za hitrejšo obdelavo in analizo področje obravnave zelo zožiti. V nadaljevanju (poglavje 4.2.2 Ortofoto) bomo s pomočjo ortofota predstavili posamezna območja, ki so bila vključena v analizo.

4.2.2 Ortofoto

Podobno kakor laserski tip podatkov se tudi ortofoto deli na dva dela:

- urbano območje: list 108081,
- ruralno oziroma primestno območje: list 117098.

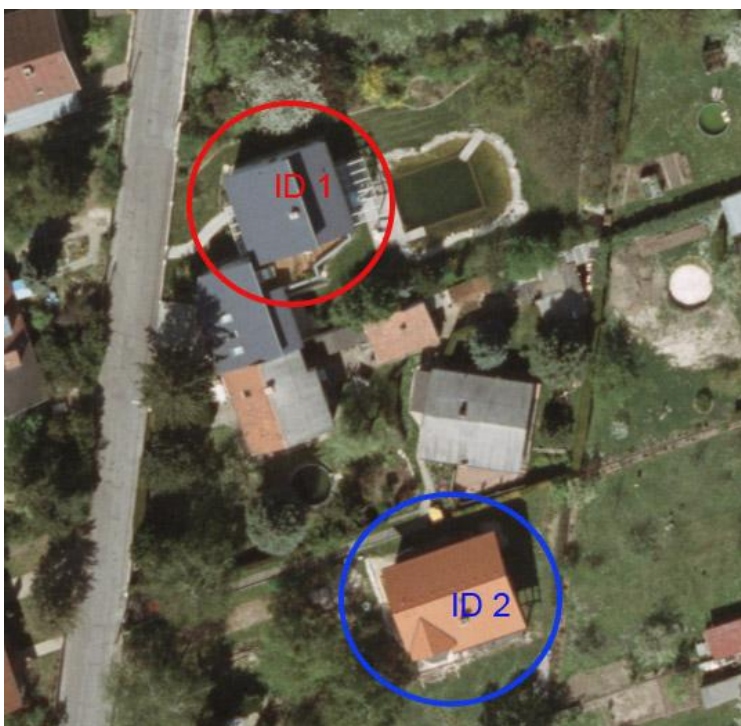
Ortofoto je aeroposnetek, ki je ustrezno transformiran ter postavljen v prostor – v državni koordinatni sistem. Uporablja se v geografskih informacijskih sistemih (GIS) kot podlaga za druge prostorske podatke ali pa za različne prostorske analize. Ortofoto načrti, ki se uporabljajo v grafičnem merilu 1 : 1000, imajo slikovni element 0,1 m.

Potrebovali smo ga za natančnejšo opredelitev območja, kjer so pomembne podrobnosti in posebnosti površja. Izbira je potekala na osnovi prisotnosti ovir v okolju – to so predvsem drevesa. Ortofoto smo uporabili tudi pri kasnejši obdelavi, ko smo z njegovo pomočjo iskali vzroke in odgovore pri interpretaciji določenih vmesnih rezultatov (poglavji 4.4.2 in 4.5.2).

Na sliki 16 vidimo izsek urbanega območja, ki smo ga najprej analizirali ter dobili prve koristne rezultate. Slika 17 pa prikazuje izsek ruralnega območja, na katerem sta označeni dve hiši: v zgornjem rdečem krogu je prva stavba, ki smo jo poimenovali ID1; v spodnjem modrem krogu pa je druga stavba, ki smo jo poimenovali ID2. Obe stavbi sta stanovanjski hiši v predmestju Dunaja in sta predmet obdelave.



Slika 16: Izsek ortofota iz urbanega območja 108081



Slika 17: Izsek ortofota iz ruralnega območja 117098

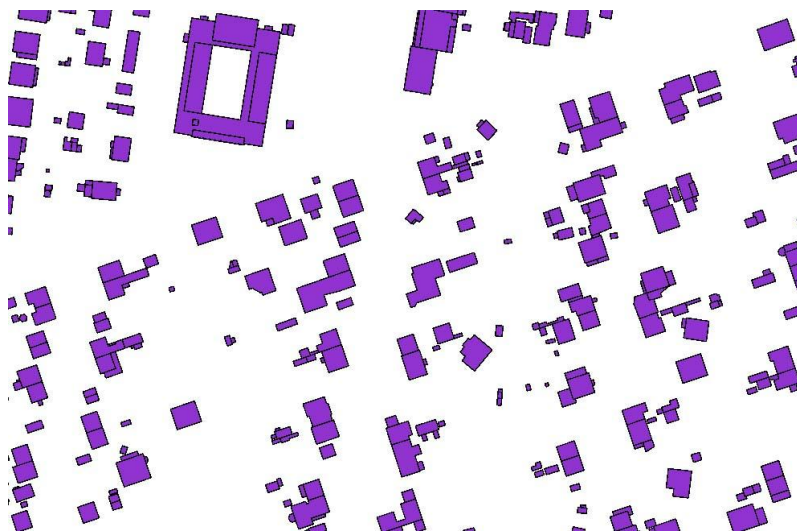
Obkroženi stavbi sta poimenovani z oznakama ID1 in ID2 ter predstavljata končni izbor za obdelavo laserskih podatkov v postopku segmentacije. Urbani izsek območja (slika 15) predstavlja izbor območja laserskih točk pri vmesnih rezultatih, medtem ko ruralni izsek (slika 16), ki vključuje le obkroženi stavbi, predstavlja izbor območja laserskih točk pri končnih rezultatih.

4.2.3 Katastrski podatki

Kataster ima v Avstriji že zelo dolgo tradicijo, del katere je bila tudi Slovenija za časa avstro-ogrske monarhije. V začetku 19. stoletja so izvedli prve geodetske meritve, ki so jih kasneje ponavljali zaradi sprememb v lastništvu, rabi in velikosti zemljišč. Kakor navaja Navratil G. et al. (2010), se je v tem času originalna katastrska geodezija izvajala na osnovi različnih ravninskih koordinatnih sistemov, zaradi česar se je v začetku dvajsetega stoletja že obstoječa BEV (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen) odločila, da se preide na boljši enotni koordinatni sistem. Uporabili so Gauss-Kruegerjevo projekcijo s tremi conami s središčem v 28° , 31° in 34° zahodno od Ferrarjevega kroga. Karte so bile sprva narejene na papir, kasneje so uporabljali plastične plošče, ker so bile manj občutljive. Zaradi pogostih sprememb mej so se karte vedno znova kopirale oz. izrisovale na nove plošče. Spremenilo se je tudi merilo, staro od 1 : 720 do 1 : 5760 v bolj preprosto novo merilo 1 : 500 do 1 : 5000. Zaradi vseh teh sprememb skozi čas so nastala majhna odstopanja od prvotnih podatkov. Stari sistem je temeljil na mejah, določenih na terenu z mejnimi znamenji oz. kamni (grafični kataster), novi sistem pa temelji na Gauss-Kruegerjevih koordinatah, s katerimi so določene mejne točke. Konec osemdesetih let 20. stoletja se je začel proces ustvarjanja digitalnega katastrskega načrta (DKM oz. digital cadastral map), da bi vzpostavili enotno bazo katastrskih podatkov. Pri tem so se soočili s problemi zaradi nepopolnih že obstoječih načrtov, v katerih so bile linije mej med različnimi rabami nezaključene, stavbe so bile pogosto nevidne, poleg tega pa se tudi meje med različnimi občinami niso koordinatno povsem ujemale. Kataster so delno izboljšali z množičnim preverjanjem zaključenosti stavb, delno pa zaradi prakse v drugi polovici 20. stoletja, ko v katastru niso več uporabljali lokalnih koordinatnih sistemov, temveč so se navezovali na mrežo kontrolnih točk, ki so jih vzdrževali in ohranjali pri BEV. Z uporabo teh koordinat se je v celoti izboljšala geometrija in kakovost katastrskih načrtov. Kljub temu

še danes velja, da je DKM sicer res dobro določen in definiran, kar velja za točke, določene s koordinatnim sistemom; to pa ne velja za točke, definirane v starem katastru. Pri tem ne smemo pozabiti na pojav GPS-tehnologije v 90. letih prejšnjega stoletja, saj se GPS-izmera od tedaj uporablja skoraj na vseh področjih geodezije, tudi v katastru. Digitalizacija katastrskih podatkov se je v celotni Avstriji zaključila leta 2005. Kadar govorimo o kakovosti podatkov, je običajno pomembna celotna zgodovina ustvarjanja in pridobivanja le-teh. Tako so v katastru ključnega pomena spremembe skozi različna obdobja zgodovine, za nas pa je pomembno, da to vemo, saj smo na koncu primerjali rezultate s katastrskimi podatki.

Kakor že omenjeni laserski podatki in ortofoto se tudi katastrski podatki podobno delijo na liste, vendar pa smo potrebovali le list ruralnega območja 117098, saj smo podatke potrebovali le na koncu pri primerjavi z rezultati iz laserskih podatkov, ko segmentacija za urbani del območja ni dala pričakovanih in zadovoljivih rezultatov. Dobili smo jih v formatu shape, kar prikazuje slika 18: zaključeni poligoni sestavljajo tlorise stavb.



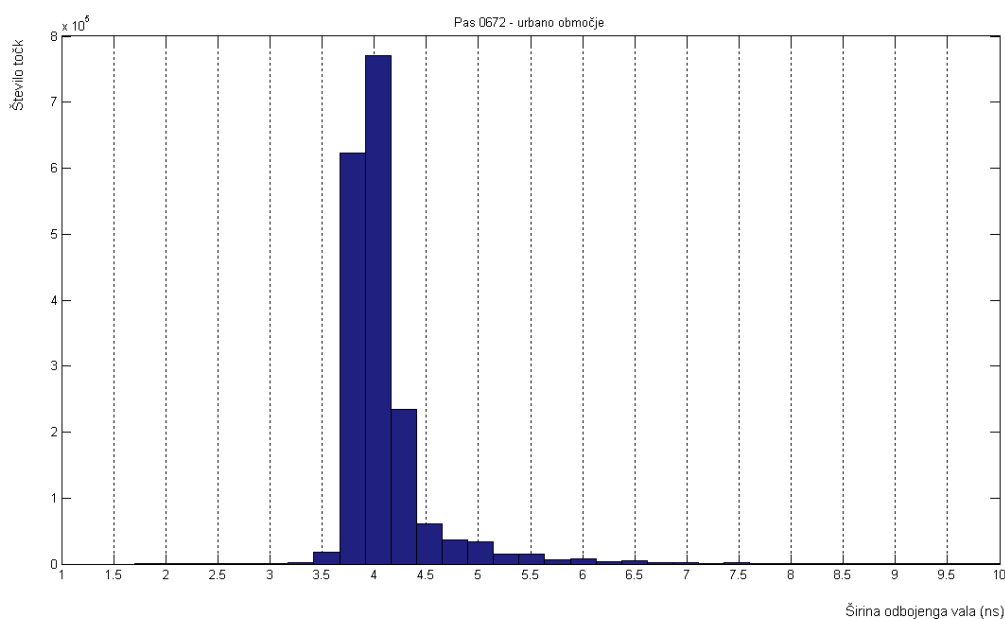
Slika 18: Izsek katastrskih podatkov, list 117098

Iz celotnega lista smo za primerjavo vzeli le dva poligona – za že omenjeni izbrani hiši ID1 in ID2.

4.3 Vrednosti širine odbojnega vala

Kakšne vrednosti zavzema širina odbojnega vala na izbranih dveh območjih, smo ugotovili s pomočjo histogramov, ki prikazujejo količino točk na določenih vrednostih parametra. Kljub temu da imamo opravka z več snemalnimi pasovi za urbano in ruralno območje posebej, smo z vsakega območja predstavili le en pas. Vrednosti so si namreč med snemalnimi pasovi podobne. Minimalne razlike, ki pa obstajajo, pravzaprav ne vplivajo na nadaljnjo obdelavo in doseganje iskanih rezultatov. Histogrami, narejeni tudi iz drugih snemalnih pasov, imajo podobne vrednosti kot izbrana in predstavljena histograma z vsakega območja (slika 19 in slika 20).

Za oba histograma velja, da os x predstavlja vrednosti širine odbojnega vala v nanosekundah, os y pa število laserskih točk, ki se štejejo v intervalih po $100000 = 10^5$ (sto tisoč).

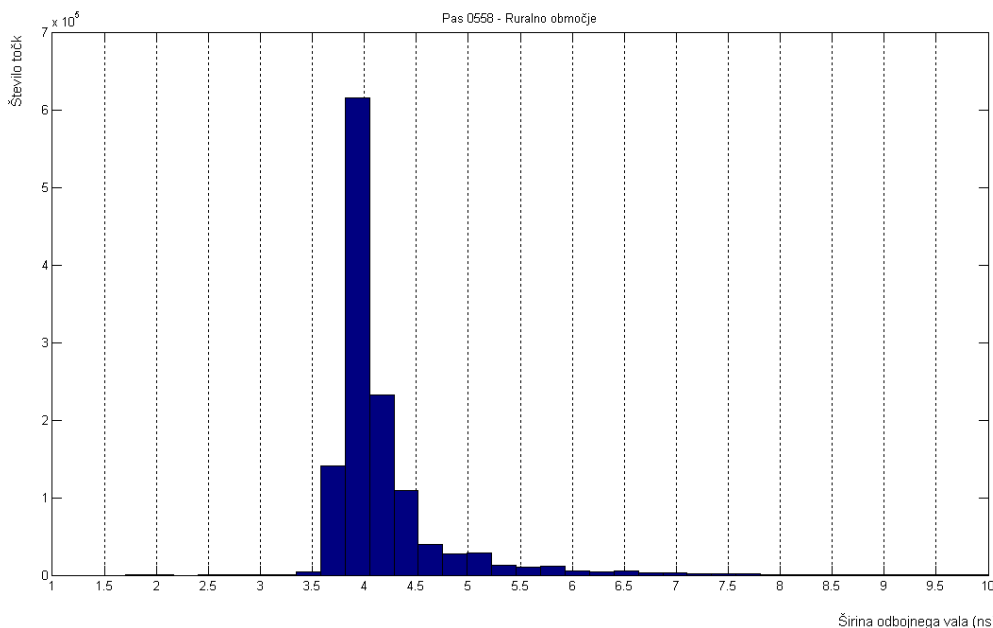


Slika 19: Histogram urbanega območja za vrednosti odbojne širine.

Razlaga histograma, ki pripada pasu zemljišča 0672:

V intervalu 3,5 – 5,5 [ns] se nahaja večina vseh točk urbanega območja 108081.

V intervalu 3,8 – 4,2 [ns] se nahaja maksimalno število točk urbanega območja.



Slika 20: Histogram ruralnega območja za vrednosti odbojne širine

Razlaga histograma, ki pripada pasu zemljišča 0558:

V intervalu 3,5 – 5,3 [ns] se nahaja večina vseh točk ruralnega območja 117098.

V okolici vrednosti 4 ns se nahaja največje število točk ruralnega območja.

Histogramoma se razlikujeta predvsem po količini točk in ne toliko po vrednosti odbojne širine, ki je pri obeh precej podobna. Kot je razvidno, imamo na urbanem območju očitno večjo količino točk kot v ruralnem. Vzrok za to večja gostota točk v oblaku urbanega območja. S pomočjo histogramov se zelo dobro vidi osnovno porazdelitev točk (kako so točke količinsko porazdeljene po vrednostih), kar nam je v nadaljnji obdelavi pomagalo pri izločanju nepomembnih točk.

4.4 Dvorazsežni (2D) prikazi

4.4.1 Priprava in obdelava podatkov

Pri nadaljnji obdelavi podatkov smo zaradi velikosti posameznih datotek zožili prvotno območje na manjši izsek (podpoglavje 4.2.2). Izsek smo izbrali predvsem na podlagi motečih elementov v okolici stavb, to je vegetacija, ki je pri obdelavi laserskih podatkov med težje določljivimi elementi v stvarnosti, saj ima izredno spremenljivo obliko v času in prostoru. Na novo izbrani izsek je tako vseboval stavbe s posameznimi drevesi v njihovi neposredni bližini. Dvorazsežnemu (2D) grafu izbranega izseka, ki vsebuje oblak točk v ravnini, smo z izbrano barvno lestvico (slika 21) določili posamezne vrednosti širine vala posamezne točke. Bistvenega pomena so dobro določeni barvni intervali, ki poudarijo robove stavb ter izločijo del okolice.

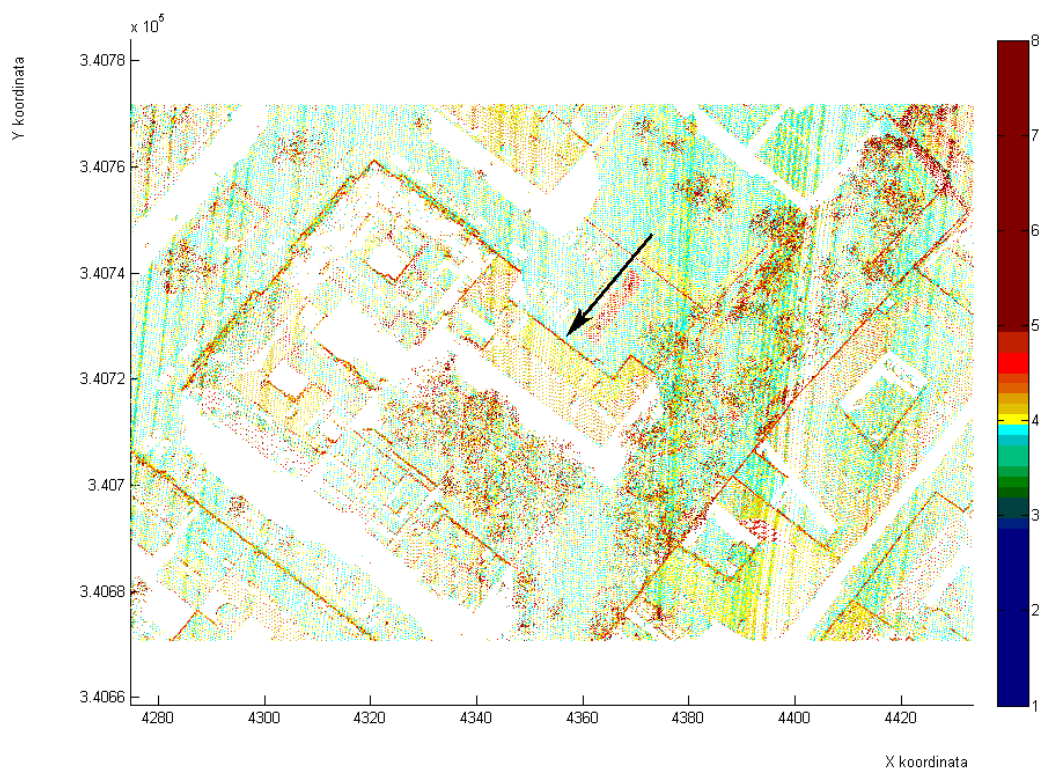


Slika 21: Barvna lestvica za urbano območje [ns]

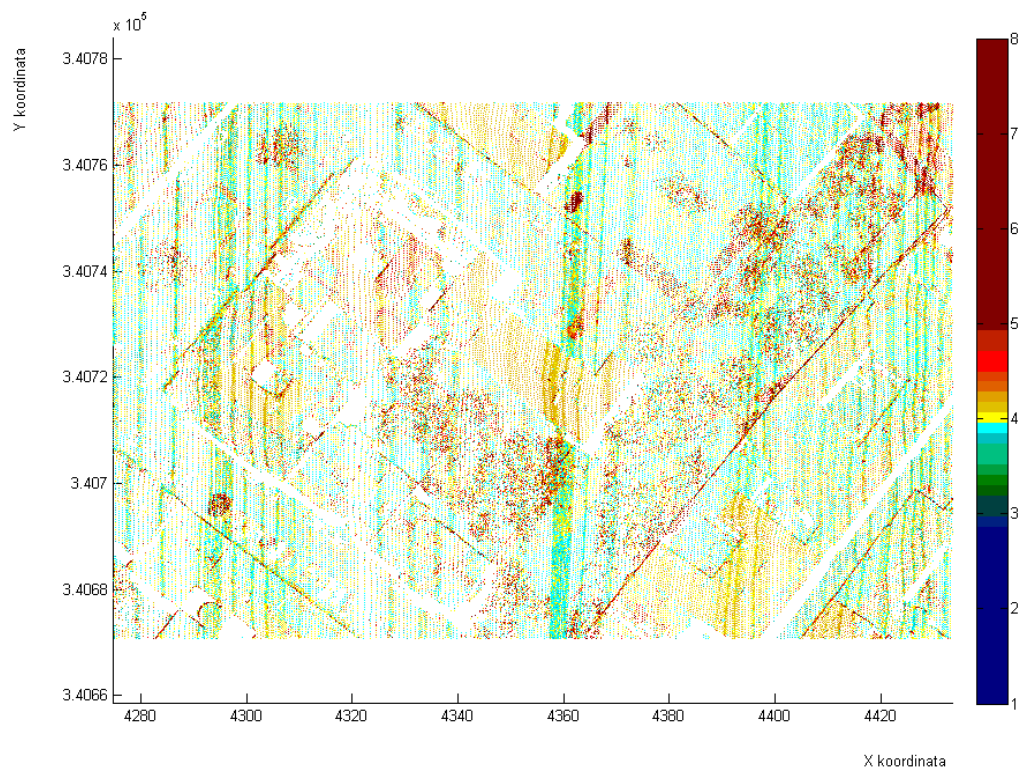
Bistveni del barvne lestvice je na intervalu od malo manj kot 4 do 5 nanosekund.

4.4.2 Prvi vmesni rezultat

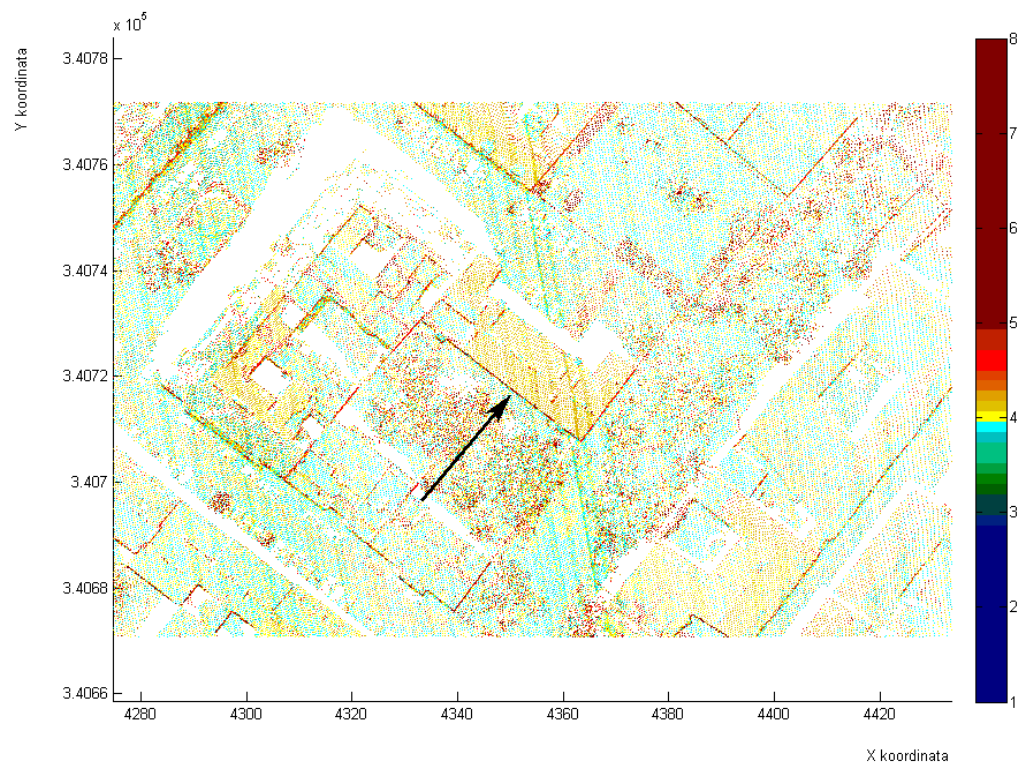
V naslednjih treh slikah (slika 22, 23 ter 24) je prikazan rezultat omenjene barvne lestvice. Na slikah prevladujejo tri barve: rumena, rdeča ter turkizna. Še posebej nas zanima rdeča barva, ki predstavlja del roba stavbe. Delno je rdeča prav tako zajeta tudi v vegetaciji, ki pa zavzema skoraj vse vrednosti širine vala in je ni bilo mogoče povsem izločiti. Na vseh slikah predstavljata abscisna in ordinatna os vrednosti x-a in y-a, kot ju dobimo neposredno iz laserskih podatkov ter nista deležni nobenih dodatnih transformacij. Širina odbojnega vala je na slikah vzeta kot atribut vsake točke posebej in je določena z barvno lestvico.



Slika 22: Izsek urbanega območja, snemalni pas 0671



Slika 23: Izsek urbanega območja, snemalni pas 0672



Slika 24: Izsek urbanega območja, snemalni pas 0673

Slike si sledijo po vrstnem redu, kakor si sledijo snemalni pasovi, ki so oštevilčeni: 0671, 0672, 0673. Zaradi tega je isti izsek oblaka točk na vseh treh slikah kljub enaki barvni lestvici različno obarvan oziroma klasificiran. Na sliki 22 je na osrednji stavbi rdeče obarvan zgornji označeni rob; na sliki 23 ni obarvan noben rob, saj je pot letala približno nad samo stavbo; na zadnji, sliki 24 pa je obarvan spodnji označeni rob osrednje stavbe. Tudi ostali robovi stavb so na vseh slikah različno poudarjeni oz. nepoudarjeni. Razlog za to sta pozicija in lega letala v času snemanja, saj pot leta poteka glede na slike iz levega konca k desnemu ali v nasprotni smeri. Pomembna je torej smer gibanja, ki je glede na izsek slik vporedna z absciso, ter premik med snemalnimi pasovi, ki poteka vzporedno z ordinato, kakor nakazuje slika 25.

0671



0673

Slika 25: Simbolni prikaz leta letala čez izsek urbanega območja

Vse tri linije so trajektorije – pot leta letala; rdeča linija 0671 je pot letala pri prvem vmesnem rezultatu (slika 22); modra linija 0672 je pot leta letala pri drugem vmesnem rezultatu (slika 23) ter zadnja zelena linija 0673 je pot leta letala pri tretji vmesnem rezultatu (slika 24).

Iz 2D-prikazov smo lahko postavili naslednje ugotovitve ter izsledke:

1. Izbrana barvna lestvica vrednosti odbojne širine poda jasne intervale, ki posamezne dele stvarnosti loči med seboj. To je prvi nivo izločitve točk, ko se v največji meri izloči teren in delno vegetacija. Prav tako pa se količinsko zmanjša celoten oblak točk.
2. Iz sosledja slik istega dela stvarnosti smo ugotovili, da je pot leta bistvena pri ekstrakciji roba stavbe.
3. Zastavimo si vprašanje, ki pomembno določa smer analize: Kaj pravzaprav predstavlja poudarjeni rob stavb – stene, žlebovi oz. rob strehe ali oboje?

4.5 Trirazsežni (3D) prikazi

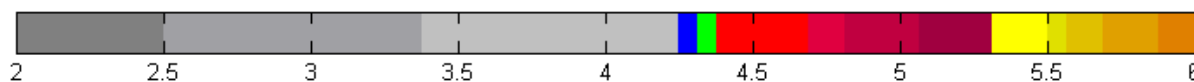
Zadnje vprašanje podpoglavja 4.4.2 podaja iztočnico za nove možnosti obdelave podatkov, ki bi nam lahko odgovorile na vprašanje. Odgovor smo poiskali v 3D-prikazih posameznih stavb. Pri tem smo delali po podobnem postopku kot pri 2D-prikazih: v prvem koraku smo najprej dodatno zožili območje obravnave, saj smo se osredotočili na prerez poljubno izbranih stavb; v drugem koraku pa smo na novo določili barvno lestvico in njene intervale, ki še bolj podrobno razčlenijo ter razvrstijo točke po vrednosti širine odbojnega vala.

4.5.1 Priprava in obdelava podatkov

Sestavili smo dve barvni lestvici, in sicer za urbano in ruralno območje posebej. Med njima ni večjih razlik, le v zgornjem delu lestvice za ruralno območje je dodatno postavljen interval, ki zoži možnosti ter izključi točke iz obravnave. Sliki 26 in 27 prikazujeta novo določitev intervalov.



Slika 26: Barvna lestvica za urbano in ruralno območje [ns]



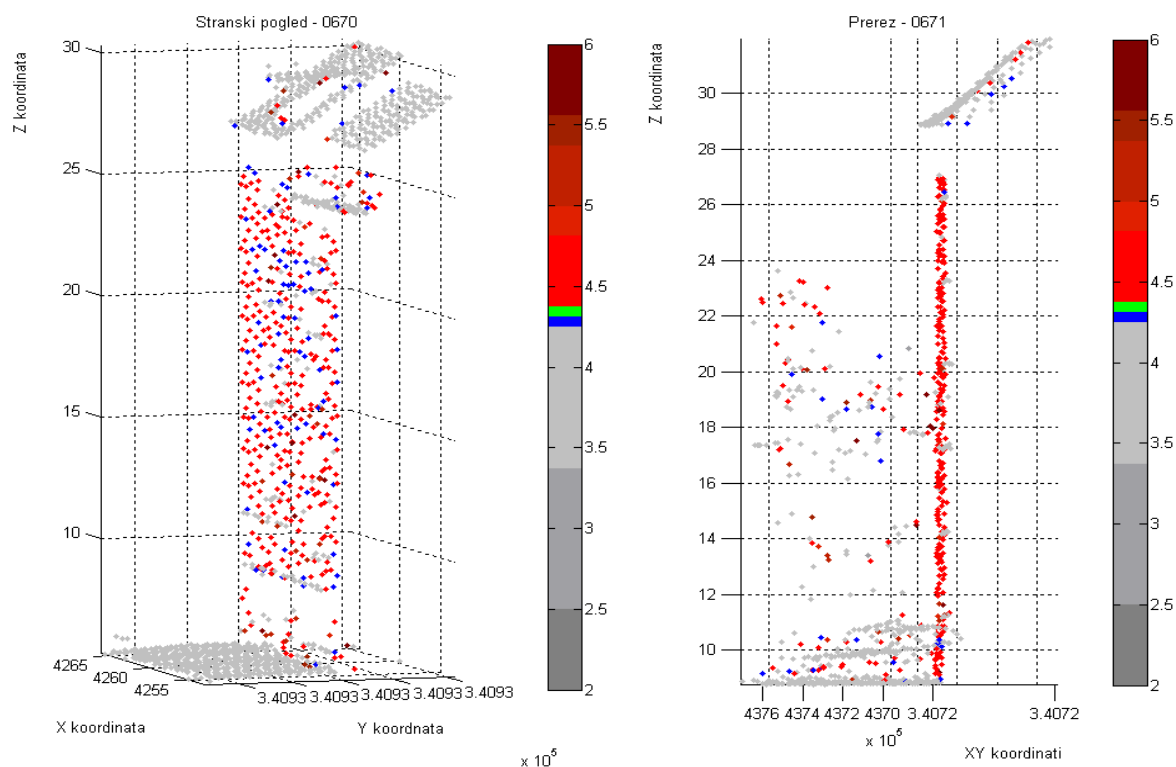
Slika 27: Barvna lestvica za ruralno območje [ns]

Območje obravnave se skrči na interval med 4,375 ns in 5,3125 ns. Pri obeh lestvicah nas zanimajo točke v rdečem intervalu. Na prvi pogled je videti druga lestvica za ruralno območje mnogo bolj selektivna pri rdečem intervalu. Vendar ne smemo pozabiti, da se večina vseh točk nahaja med vrednostmi 3,5 ns ter 5,5 ns. Spodnje vrednosti so pri obeh lestvicah enako omejene: pri vrednosti 4,375 ns se začne rdeči interval. Zgornja meja je pri ruralni lestvici 5,3125 ns, pri urbani pa 5,4375 ns. Meje so določene na podlagi skale, ki vsebuje 8 enot

znotraj intervala po 0,5 ns. Enoto izračunamo po enačbi: $enota = \frac{0,5}{8} = 0,0625$. Zgornja meja urbane in ruralne lestvice se razlikujeta za dve enoti. Na podlagi že omenjenih histogramov (slika 19 in slika 20) smo določili brez strogega barvnega ločevanja tudi zgornjo mejo urbane lestvice.

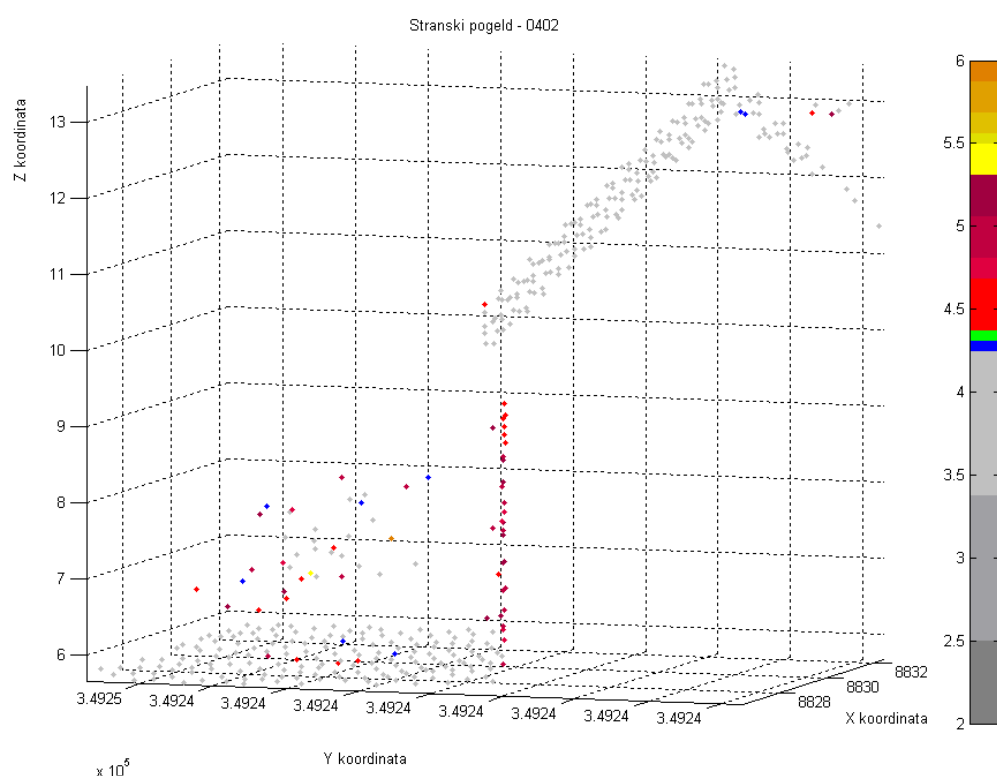
4.5.2 Drugi vmesni rezultat

Rezultat omenjenih omejitev so slike 28, 29 in 30, ki prikazujejo prereze ter trirazsežnostne poglede na določeno stavbo. Podobno kot pri 2D-prikazih predstavljajo tudi tu vse tri osi na sliki x, y in z vrednosti iz datotek laserskih podatkov. Parameter širina odbojnega vala pa je atribut, ki je določen po omenjenih barvnih lestvicah.



Slika 28: 3D-prikaz izbranega dela urbanega območja

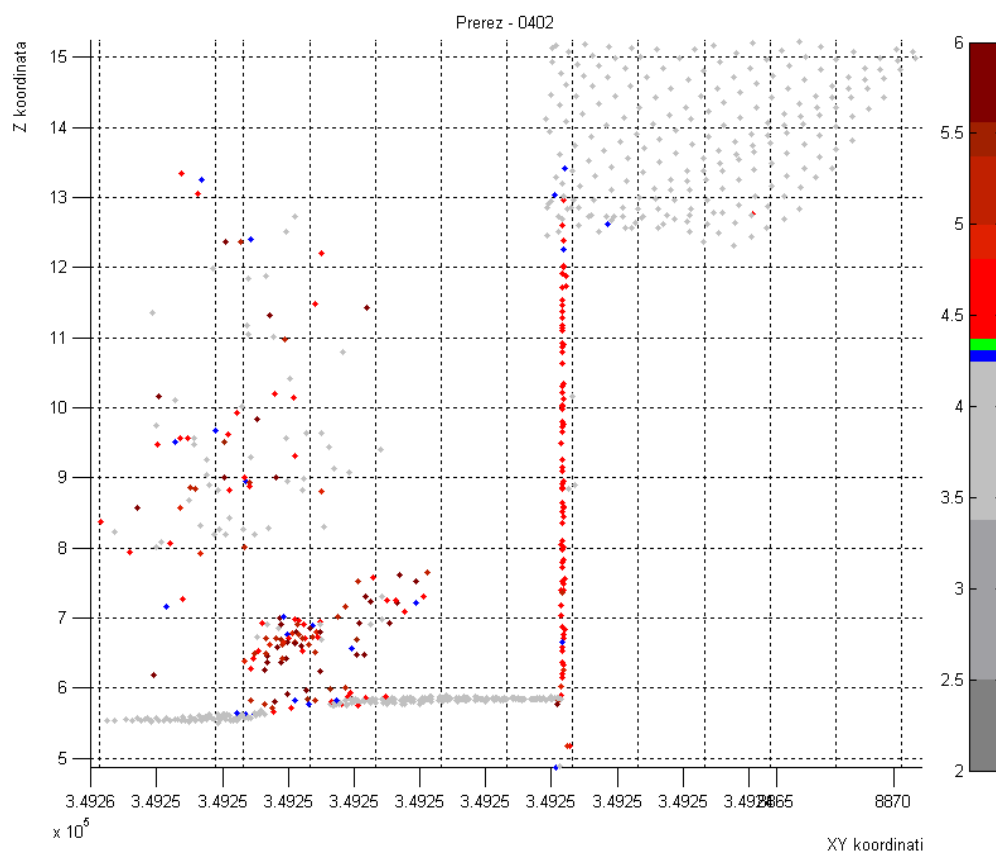
Na levi strani slike 28 je stranski pogled na petnadstropno stavbo, desno je profil izseka druge stavbe iz urbanega dela, v katerega neposredni bližini je rastje. Vegetacija nastopa v vseh barvnih intervalih. Podobno situacijo imamo v urbanem območju, kakor prikazujeta sliki 29 in 30 – razen stene in vegetacije so ostali elementi v okolici nepoudarjeni oz. se nahajajo v sivem intervalu.



Slika 29: 3D-prikaz izbranega dela ruralnega območja

Iz podanih slik se odgovor na zastavljeno vprašanje ponuja kar sam: Rob stavb, ki ga z ravninskim pogledom (koordinat xy) na situacijo ni bilo mogoče določiti, je zunanja stena posamezne strani stavbe. Ta ugotovitev in odgovor nam odpre nove možnosti pri določitvi oboda oziroma roba stavbe. Pomembno je dejstvo, da se stene v vsakem primeru dotikajo tal in s tem najbolj natančno določajo mejo med stavbo in terenom. Na sliki 2 (podpoglavje 2.1) se vidi, kako so prišle stene na podlagi osnovnih značilnosti aerolaserskega skeniranja do izraza. Stena stavbe je bolj ali manj vselej navpično usmerjena glede na dani teren, zato je težko zadovoljivo zajeti vse stene določene stavbe. Potrebno je večkratno snemanje istega

delu stvarnosti ob upoštevanju značilnosti terena, da lahko zadovoljivo zajamemo steno določene stavbe. Pomembna sta pot snemanja in višina, ki določa frekvenco oddanega signala kot tudi kot snemanja.



Slika 30: Prečni profil dela ruralnega območja

Ugotovitve in izsledki na podlagi 3D-prikazov:

1. Širina odbojnega vala je pri svojih višjih vrednostih primerna za ekstrakcijo roba stavbe.
2. Orisan rob na 2D-slikah predstavlja steno posamezne stavbe.

4.6 Segmentacija stavb iz ruralnega območja

4.6.1 Priprava podatkov za obdelavo

Na podlagi prejšnjega poglavja smo glede na dobljene rezultate naredili še zadnji ter najpomembnejši izbor: barvna lestvica določa interval, ki najbolje zajame točke na steni stavb. Že omenjena rdeča intervala sta tako določala vrednosti, znotraj katerih so točke še sprejemljive, ostale pa odpadejo. Drugi pomembni pogoj je bila dovolj dobra pokritost izbranega območja s snemalnimi pasovi. Po tej lastnosti sta se ruralno in urbano območje močno razlikovala, saj je, kot smo že omenili (podpoglavje 4.2.1), urbano območje zajeto s tremi, ruralno pa z desetimi snemalnimi pasovi. Pri postopku segmentacije se urbano območje kljub večji gostoti točk ni obneslo, zato smo ga na tej stopnji obdelave izločili iz analize. Vzrok za slabo izvedeno segmentacijo urbanega območja je delno slaba pokritost s trajektorijami, delno pa morda sama arhitektura stavb. Dunaj ima v centru ter okoliških predelih veliko stavb s pet in več nadstropji, tako kot proučevana stavba urbanega območja. To otežuje dobro zajemanje podatkov, saj laserski žarek teže posname navpične stene visokih stavb, ki so med seboj ločene le s cestami. Zaradi tega je program za segmentacijo teže našel dovolj veliko število točk, ki bi predstavljale ravno zaključeno ploskev. Za program je bila verjetno težava tudi sama velikost stavbe, saj so le te v sklopih in niso samostojno stoječe stavbe, temveč tvorijo bloke posameznih stavb v eni celoti. Zunanje stene sestavljajo velike površine navidezno enotne ravnine, vendar pa pri tovrstnih zgradbah pogosto enotne stene niso povsem ravne ali vsaj približno ravne. S tem je onemogočena pridobitev segmentov s postopkom segmentacije. Ena stena, ki jo sestavlja več povezanih stavb, je tako sestavljena iz več ravnin, ki se medsebojno prekrivajo in zlivajo druga v drugo. Zelo verjetno zaradi tega problema v urbanem območju nismo dobili zadovoljivih rezultatov.

4.6.2 Potek segmentacije

Delali smo z oblakom točk ruralnega območja, ki imajo vrednosti parametra širina vala na intervalu od 4,375 ns do 5,3125 ns. Na ruralnem območju smo izbrali dve stanovanjski hiši in

ju poimenovali ID1 ter ID2 (kot že omenjeno v podpoglavju 4.2.2), njune točke pa smo s programom Building generator zagnali skozi postopek segmentacije.

Segmentacija je precej avtomatičen postopek, pri katerem je zaznavanje ravnin osnovano na normalnih vektorjih tangentne ravnine. Kakor smo omenili že v teoretičnem delu, je izrednega pomena sosedstvo med točkami in njihova okolica, zato je pomembna predhodna selekcija točk, ki so uporabne v samem postopku. V podpoglavjih 4.4 in 4.5 (2D- in 3D-prikazi) predstavljamo predvsem intervale ter izločevanje primernih oz. neprimernih točk. Zoženje števila obravnavanih točk je omogočilo bolj zanesljivo segmentacijo. Prav tako smo izločili tudi nekatere primerne kandidatke in na koncu dobili dokaj osiromašen oblak točk, kar bi nam lahko povzročalo težave, saj je potrebno zagotoviti minimalno število točk, kar posledično vpliva na povezljivost med njimi. Če imamo premalo točk in so te med seboj preveč oddaljene, ima program težave z iskanjem sosednjih točk, ki naj bi pripadale isti ravnini kot obravnavana točka. S tem zgubimo odločilni kriterij povezljivosti, na podlagi katere se tvorijo segmenti kot rezultat postopka. Vendar laserski podatki nudijo zares veliko število točk, s katerimi je mogoče prav zaradi njihove številnosti zelo dobro manipulirati. V našem primeru velja, da je manj več, saj smo izločili tisto, kar je nepotrebno, da smo lahko pridobili zadovoljive rezultate, kljub temu da smo izgubili tudi nekatere dobre točke.

Za izvedbo programa potrebujemo dve vhodni datoteki: tekstovno datoteko s koordinatami točk ter datoteko winput (*.wnp), ki ima podobno vlogo kot datoteke shape. Vsebuje poligone, ki določajo zaključeno območje okoli neke stavbe. Znotraj teh poligonov se nato izvede postopek segmentacije na uvoženih točkah. Poligone sami ročno določimo. Konfiguracija programa omogoča spreminjanje določenih kriterijev, ki vplivajo na izvedbo postopka ter s tem tudi na končni rezultat. Do njega smo podobno kot že prej prišli s preizkušanjem in spreminjanjem obstoječih kriterijev ter tako ustvarili različne pogoje za izvedbo postopka. Spreminjali smo več kriterijev, navedli pa smo le tiste, ki so pozitivno vplivali na končne rezultate. Posamezni kriteriji so opisani, omenjene pa so tudi začetne osnovne vrednosti ter spremenjene vrednosti. Spremembe smo navedli, vendar jih nismo ovrednotili v povezavi s končnimi rezultati. Kriterija, ki sta pomembno vplivala na rezultat, sta:

- NNCOUNT (izračun normal)

Razlaga kriterija: število najbližjih sosednjih točk za filter vegetacije.

Osnovna vrednost: 10.

Spremenjena vrednost: 8. Pridobimo en segment več ter različno število točk v posameznih segmentih.

- **SPLIT DISTANCE**

Razlaga kriterija: razdalja za analizo povezanih komponent. Pri vrednosti 0 ni narejena nobena ločitev.

Osnovna vrednost: 2.

Spremenjena vrednost: 3. Območje prve obravnave (stavba z oznako ID1) ima manj segmentov in različno število točk v segmentih. Pri drugem območju (ID2) dobimo večje število segmentov in različno število točk v posameznih segmentih.

Spremenjena vrednost: 4. Enako kot pri vrednosti 3, le da je pri drugem območju pridobimo še več segmentov.

Poleg omenjenih dveh kriterijev smo preizkusili tudi naslednje: `MINIMUM_HEIGHT_ABOVE_DTM`, `POINT_SIGMA`, `POINT_PLANE_THRESHOLD`, `ALPHA_SHAPE_FACTOR`. Ker spremembe v njihovih nastavitvah niso prinesle pozitivnih novih sprememb, jih ne bomo podrobneje razlagali.

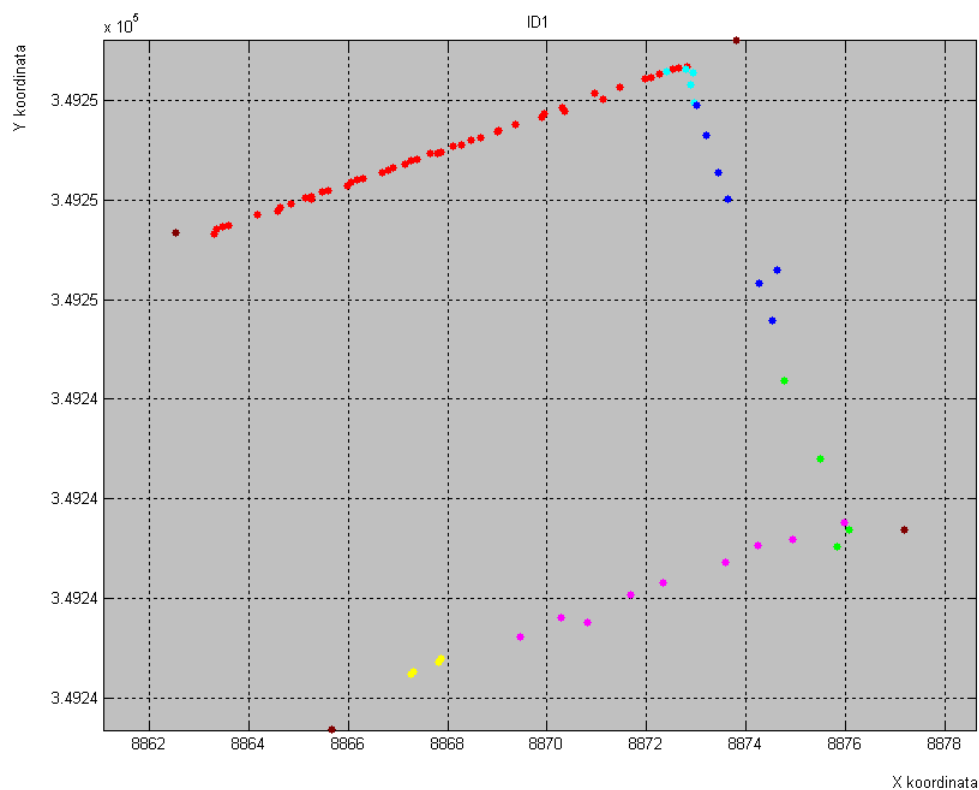
5 KONČNI REZULTATI

Celotno praktično delo smo sklenili s končnimi rezultati, s katerimi smo posredno predstavili možnost uporabe parametra širina odbojnega vala, ki nakazuje ekstrakcijo zunanjih robov stavb. Končni rezultati so dobljeni segmenti zadnjega postopka obdelave – segmentacije. Poleg tega smo rezultate primerjali tudi s katastrskimi podatki, kjer so opazne rahle razlike v orientaciji ter premiku.

5.1. Segmenti za ekstrakcijo zunanjih robov stavb

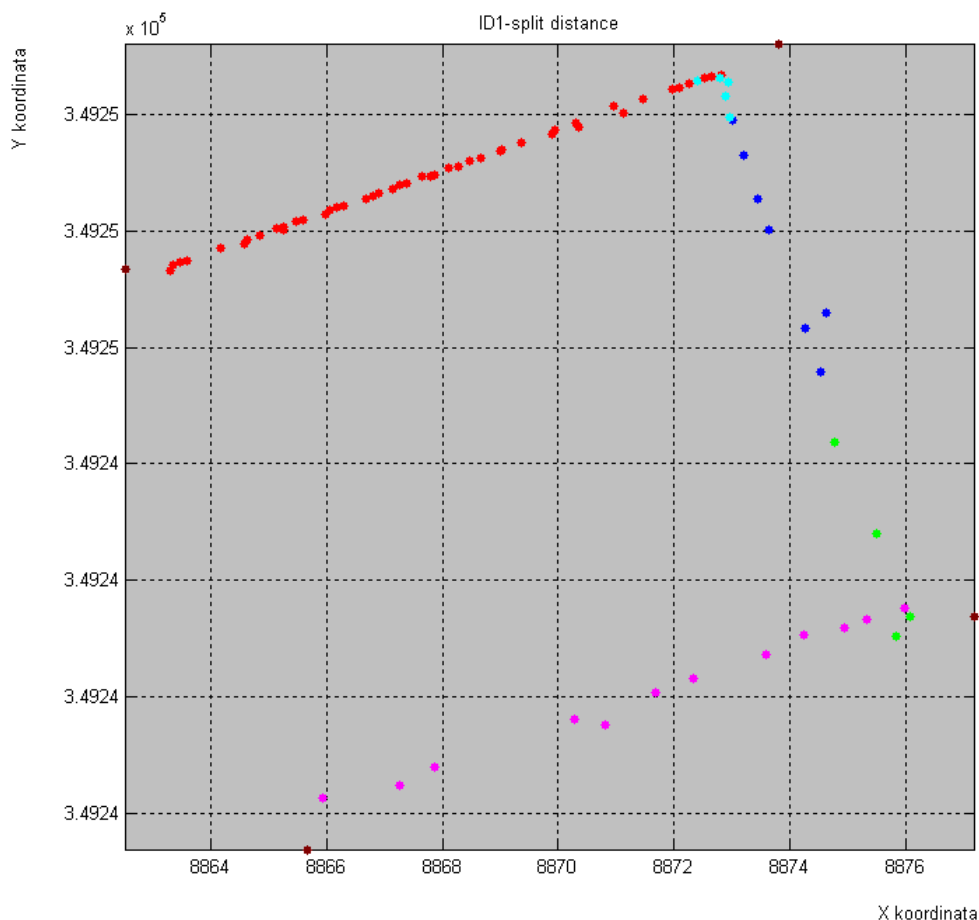
V zadnjem postopku obdelave podatkov smo območje obravnave zožili na ruralno območje, kjer smo izbrali dve stanovanjski hiši in ju poimenovali ID1 ter ID2. Na njima smo izvedli postopek segmentacije, v katerem smo dobili štiri končne rezultate, ki se med seboj rahlo razlikujejo.

Pri prvem območju ID1 smo z osnovnimi nastavitvami dobili 7 segmentov, ki prikazujejo robove stavbe (slika 31). Segmenti so na sliki vidni kot skupine točk iste barve: rdeče, cian, modre, zelene, roza, rumene ter temno rdeče. Zadnja barva, temno rdeča, je manj opazna, saj predstavlja vogale poligona, ki smo ga kot vhodni podatek vpeljali v postopek segmentacije. Rob stavbe je le delno predstavljen, saj so prikazane tri od štirih sten, poleg tega so nekatere stene predstavljene z več segmenti, čeprav obravnavamo preprosto gradnjo hiše s kvadratnim tlorisom in naj bi ena stena predstavljala eno skupno ravnino. Vendar segmenti, ki so določeni prav na osnovi zaznavanja pripadnosti točke neki skupni ravnini, bolj razdrobljeno zastopajo posamezne stene stavbe.



Slika 31: Rezultat segmentacije ID1 – osnovne nastavitve

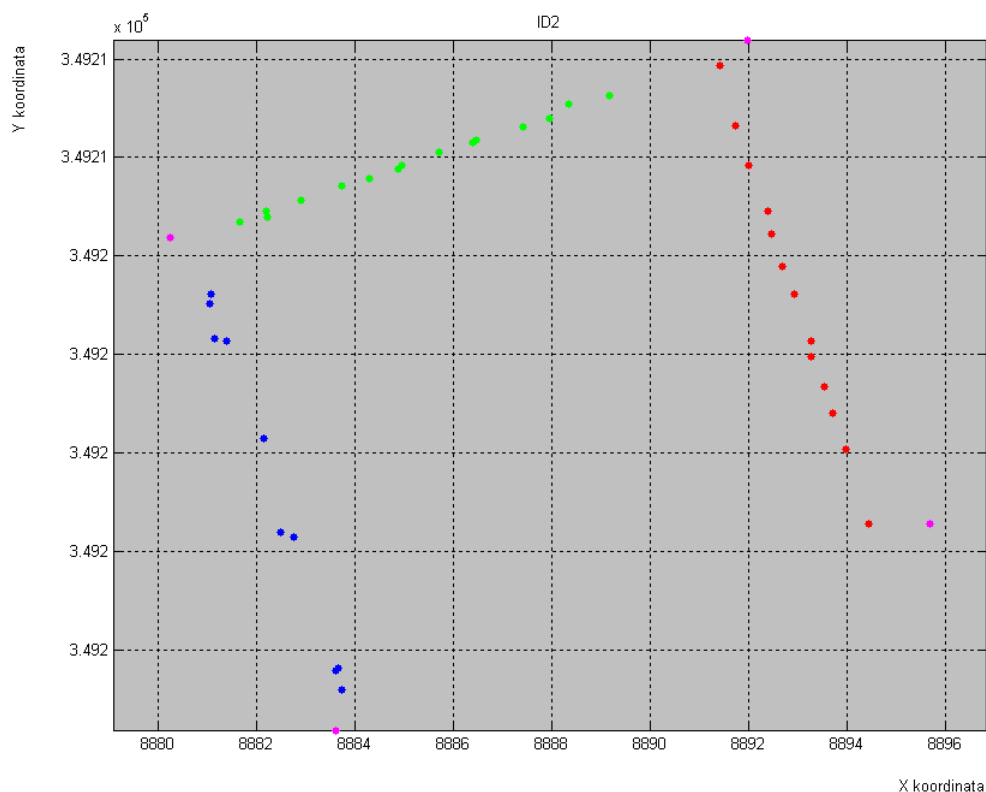
Pri drugem rezultatu prvega območja (slika 32) smo spremenili kriterij »split distance« z osnovne vrednosti 2 na 3. Posledica je manj segmentov, saj so se le-ti združili in predstavljajo stene oz. robove prve hiše bolj enotno.



Slika 32: Rezultat segmentacije ID1 – kriterij »split distance« vrednosti 3

Spodnji rob je v primerjavi s prejšnjo sliko bolj enotno predstavljen, saj ni razdeljen na dva segmenta (rumeni in roza segment), temveč je rob v celoti zastopan z enim segmentom. Razlika v enotnem roza obarvanem segmentu nastopi le v številu točk, ki jih je manj in so tudi nekoliko drugače razporejene. Pri drugih dveh robovih ne pride do sprememb: rdeči segment zelo jasno in enotno zastopa zgornji rob stavbe, desni rob hiše pa je sestavljen iz treh različnih segmentov.

Na drugem območju ID 2, kjer smo imeli podobno kot pri prvem območju stanovanjsko hišo, smo pri osnovnih nastavitvah dobili le 4 segmente, vsak je predstavljen s svojo barvo (slika 33). Že v osnovi je njihova razporeditev bolj celostna in manj razdrobljena.

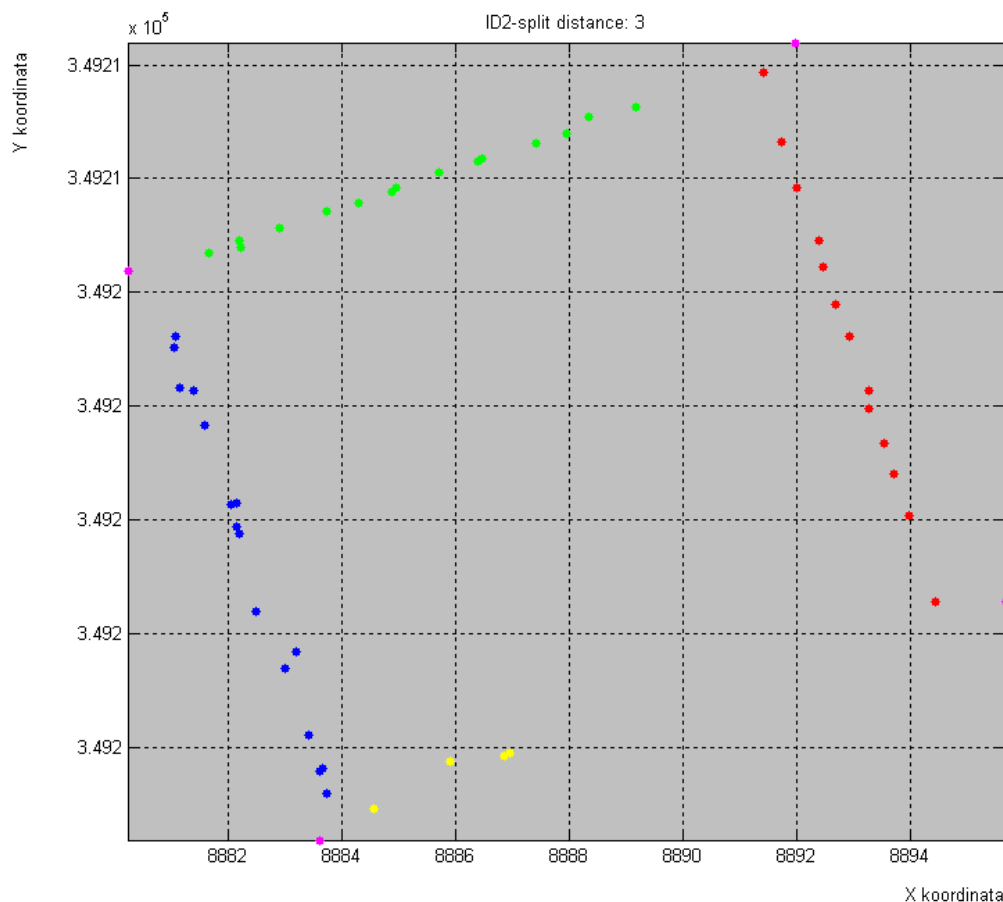


Slika 33: Rezultat segmentacije ID2 – osnovne nastavitve

Če pa še upoštevamo, da pripada en segment (točke roza barve) že v osnovi robovom poligona, ki je uvožen kot vhodna datoteka, vidimo, da preostali trije segmenti v celoti zastopajo tri robove stavbe. Točke so v posameznih segmentih bolj enakomerno razporejene, manj je tudi takih, ki se bolj očitno ne prilegajo osnovni navidezni liniji roba stavbe, ki ga ustvarja segment.

Slika 34 predstavlja zadnji in najboljši rezultat celotne obdelave ter analize laserskih podatkov. Kriteriju »split distance« smo spremenili vrednost na 3¹, s tem pa dobili popolnoma nov segment, ki zastopa zadnjo manjkajočo četrto steno stavbe. Novi segment zastopajo točke rumene barve; čeprav jih je malo, dovolj dobro in jasno nakazujejo na obstoj roba in linije stavbe. Dobimo celoten okvir stanovanjske hiše, s tem pa tudi mnogo boljše pogoje za ekstrakcijo zunanega roba stavbe.

¹ Tudi pri vrednosti parametra split distance 4 smo dobili skoraj identične rezultate. Pri višjih vrednostih parametra se začnejo pojavljati segmenti, ki ne predstavljajo več roba stavbe, zato jih nismo predstavili.



Slika 34: Rezultat segmentacije ID2 – kriterij split_distance vrednosti 3

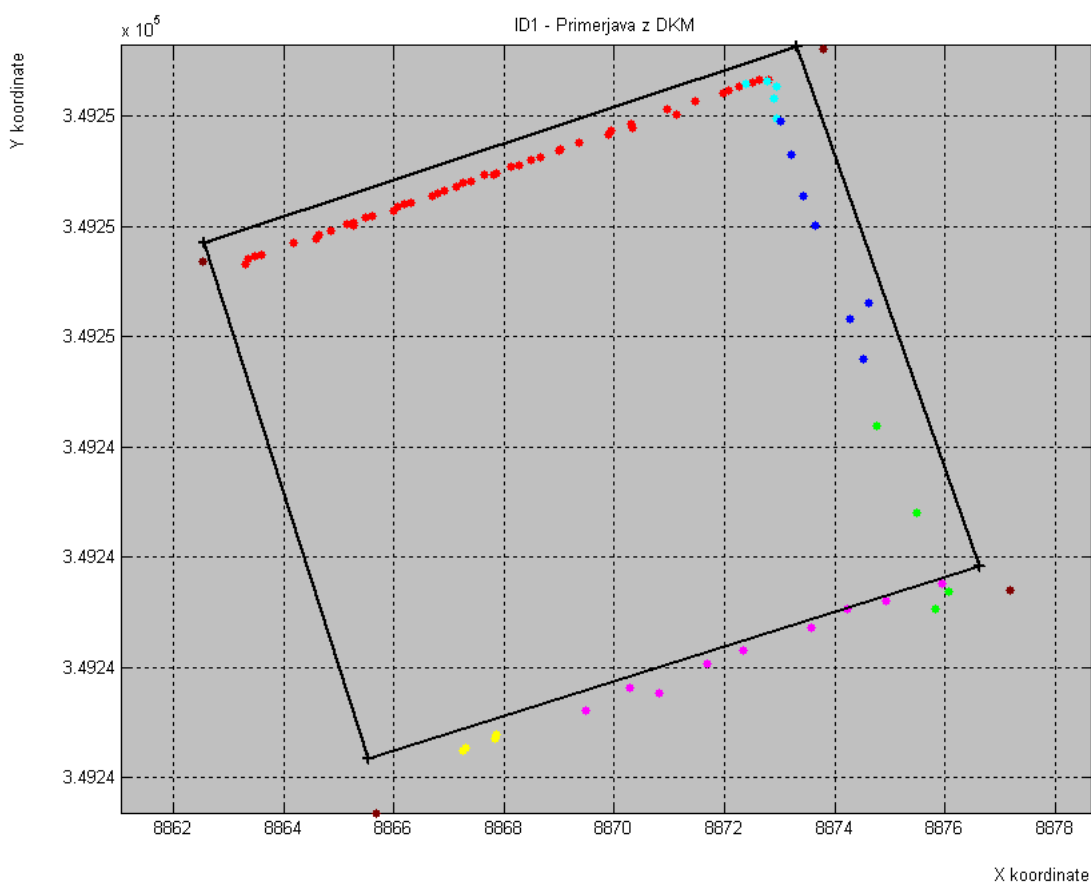
Manjše spremembe so vidne tudi pri ostalih segmentih, predvsem pri modrih točkah, ki jih je bistveno več kot pri segmentaciji z osnovnimi nastavitvami. Razporeditev točk se ne spremeni (izboljša ali poslabša), saj posamezne skupine lepo oblikujejo navidezno linijo, kot je rob obravnavane stavbe.

5.2. Primerjava rezultatov s katastrskimi podatki

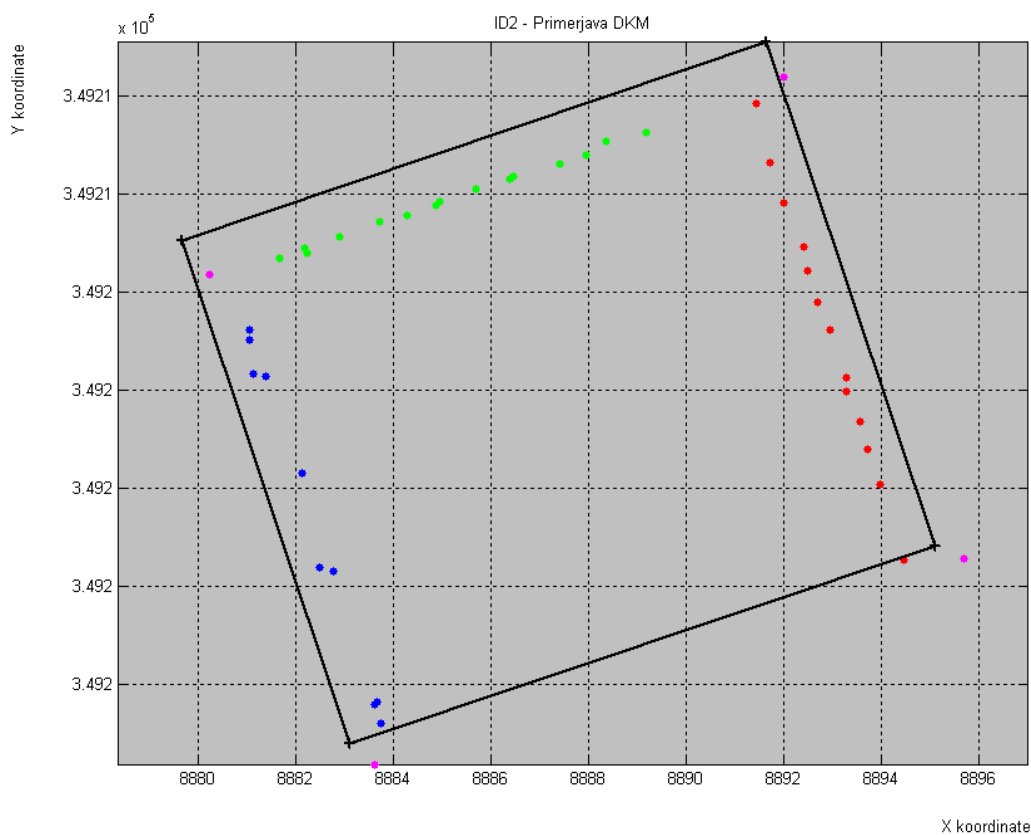
Celotno diplomsko delo se v osnovi ukvarja z analizo aerolaserskih podatkov, katerih položaj temelji na globalnem položajnem sistemu WGS84, ki je bil naknadno transformiran v Gauss-Kruegerjev koordinatni sistem, kar smo podrobneje že razložili v podpoglavju 4.2. Prav tako smo tudi omenili katastrske podatke, katerih zgodovina seže v začetek 19. stoletja, način

pridobivanja pa se je s časom spreminjal. Primerjava torej temelji na dveh med seboj zelo različnih tipih podatkov, kar je dovolj dober razlog, da se dobljene rezultate delno tudi preveri, kako dobro se ujemajo z obstoječim avstrijskim katastrskim sistemom.

Primerjava temelji na dobljenih rezultatih dveh območjih, poimenovanih ID1 in ID2, kakor kažeta sliki 35 in 36. Nastavitve postopka segmentacije laserskih podatkov so osnovne. Črna polna sklenjena črta pa so digitalni katastrski podatki oz. DKM (nem. Digital Kataster Map). Pri obeh primerih je viden odmik oz. zamaknjenost od segmentov. Pri prvem območju ID1 (slika 35) je viden premik proti severozahodu, saj se spodnji rob katastrskega poligona skoraj ujema s točkami segmentov. Vidna pa je tudi rahla sprememba v orientaciji – katastrski podatki so obrnjeni proti desni, kar je opazno na vseh treh robovih stavbe.



Slika 35: Primerjava ID1 s katastrskimi podatki DKM



Slika 36: Primerjava ID2 s katastrskimi podatki DKM

Drugo območje ID2 (slika 36) je podobno kakor prvo usmerjeno proti severozahodu. V orientaciji je manj vidna rotacija proti desni, čeprav je le rahlo nakazana. Pri obeh primerih pa so opazne predvsem razlike v velikosti enega in drugega oboda stavbe. Čeprav imamo odmik, je tudi velikost katastrskega poligona večja od navidezne linije segmentov, kajti če bi poligon poskusili premakniti tako, da bi se pokrival s točkami, je več kot očitno, da do ujemanja ne bi prišlo. To se lepo vidi pri drugi primerjavi z območjem ID2, ko se moder in rdeč segment v nobenem primeru premika poligona ne bi z njim hkrati prekrivala, saj linija poligona očrta večji pravokotnik, kot ga navidezno očrtajo segmenti. Razlika v odkliku med poligonom in točkami je okoli 1 m (ponekod več, drugod manj), kar ni tako malo. Vemo, da s točkami dobro zajamemo steno stavbe, torej njeno fasado, zato je tloris dober prikaz njenega stika s tlemi. Prav to je najbolj realen podatek o obodu oz. robu stavbe. Pri katastru se zajema vogale stavbe – točke, ki tvorijo poligon, ko jih povežemo in so običajno prav tako dobro določene. V katastru je v praksi uporaba tako GPS-tehnologije kakor tudi terestričnih metod, ki pa posledično ne bi prinesle tolikšne razlike oz. odstopanja v položaju. Podobno velja za laserske

točke, katerih koordinate so bile iz WGS84 sistema transformirane v Gauss- Kruegerjev koordinatni sistem ter je bila njihova položajna natančnost ocenjena na standardno deviacijo 11 cm. Ena možnost odstopanja je preprosto to, da sta hiši določeni v starem grafičnem katastru. Ali pa je vzrok za razlike sama digitalizacija katastra, saj je potekala tudi s pomočjo stereoparov.

Za dobro primerjavo bi bilo smiselno imeti večje število različnih tipov stavb, morda celo z različnih lokacij, da bi se lahko dokopali do bolj splošnega sklepa oz. trditve, da določene ugotovitve zares veljajo. Tako so sicer ugotovitve resnične, vendar le za ta dva primera. Morda še lahko trdimo, da za bližnje stavbe tega območja veljajo podobne razlike, vendar pa sta za bolj oddaljene dele proučevana primera odločno premalo. Kataster je preveč raznolik in kljub enotnemu sistemu še zmeraj ponekod temelji na starem sistemu. Primerjava je torej na koncu diplomskega dela dodana bolj kot zanimivost in ne kot resna ocena obstoječih podatkov ter rezultatov.

6 RAZPRAVA

Rezultati so nas v vseh pogledih presenetili, saj smo do njih prišli postopoma ter nismo bili prepričani, ali bomo lahko s parametrom odbojna širina vala uspešno izvedli zadnji postopek obdelave, to je segmentacijo. Ključnega pomena so rezultati 3D-prikazov, saj se rob stavbe izkaže za njeno steno, ki jo lahko aproksimiramo z ravnino. To nam je odprlo možnosti za nadaljnjo obdelavo, ko je ekstrakcija roba stavbe postala realna. Segmentacija je sama po sebi dokaj zahteven postopek, saj temelji na matematični algebri, prav tako pa se uporabljajo statistični postopki in množica kriterijev, ki določajo pogoje optimalne selekcije v množici podatkov za izbor končnih segmentov. Območje obdelave se v postopku analiziranja močno skrči, da se izloči nebitvene elemente stvarnosti; s tem pa se tvega, da bodo rezultati segmentacije slabši, saj je končni nabor točk v primerjavi z začetnim resnično skromen. Tako bi se lahko zgodilo, da bi imeli premalo točk, ki bi dovolj dobro predstavljale ravnino, zaradi česar se na koncu segmenti sploh ne bi ustvarili. Pri obeh hišah smo dobili tri stene oz. robove stavbe, pri spremenjenih pogojih (kriterij slope distance smo postavili na vrednost 3) pa celo vse štiri robove stavbe, kar nam je podalo obod in zaključenost. Postopek je bil uspešen in zadovoljiv, če upoštevamo, da smo se osredotočili le na en parameter in pri tem ne upoštevali nobenega drugega, ki ga polnovalovni zapis ponuja. Naša poglobljena naloga je bila namreč preizkusiti možnosti parametra odbojna širina vala, ki se je izkazal za deloma uporabnega in zato vrednega pozornosti.

Kljub temu pa težko govorimo o uporabnosti in praktičnosti predstavljene analize, saj je delo v celoti bolj raziskava in poskus, ki je uspel, vendar v zelo specifičnih pogojih. Brez predhodne obdelave in priprave podatkov, ki so predstavljeni z delnimi rezultati, bi bila segmentacija neuspešna. Posebej smo določili uporaben interval odbojne širine in to postavili kot pogoj za izbor točk za postopek segmentacije. Poleg tega ne smemo pozabiti na urbano območje, ki v zadnji obdelavi ni dal želenih rezultatov zaradi oblike in velikosti stavbe. Zato smo na koncu izbrali enostavni in ne preveliki stavbi z ruralnega območja, pri katerih je bila možnost uspeha večja. Rezultati so torej prikaz možnosti obdelave aerolaserskih podatkov, ki smo jih močno skrčili že s tem, ko smo se omejili le na en parameter polnovalovnega zapisa. Na koncu smo naredili primerjavo s katastrskimi podatki, katerim nismo namenili velike pozornosti, saj niso del glavne analize. Primerjava je dodana kot zanimivost, saj je

aerolasersko skeniranje resnično drugačen postopek pridobivanja podatkov o stvarnosti, kakršnih smo drugače vajeni v klasični geodeziji. Razlike med enim in drugimi podatki smo pričakovali, razloge zanje pa je težje najti, saj je veliko možnih razlag, zakaj se obod oz. rob iste stavbe ne ujema in prekriva z enim in drugim tipom podatkov. Najbolj osnoven in preprost razlog je lahko preprosto čas. Skozi čas se stvari spreminjajo in le redko mirujejo, kar velja tudi za zemeljsko površje. Star grafični katastrski sistem je bil sicer digitaliziran, vendar njegove koordinate niso določene na osnovi referenčnega koordinatnega sistema. Zaradi tega lahko prihaja do takšnih razlik v položaju. Vendar tega ne vemo zagotovo, saj nismo pridobili podatka o načinu in času katastrskega zajema stavb za območji ID1 in ID2.

Končni rezultati podajajo nekaj iztočnic za naprej:

- Dobljene segmente, ki jih sestavljajo skupine izbranih točk, lahko poligoniziramo in dobimo linije zunanega roba stavbe. Najprej je treba določiti linijo, ki se prilega točkam segmenta, nato pa dobljene linije s presekom povezati v poligon.
- Prve ugotovitve, ki se nanašajo še na urbano območje, jasno nakazujejo pomembnost načrtovanja poti leta letala (trajektorija). Čim večkrat je neko območje posneto, tem boljše imamo možnosti za uspešno obdelavo. V mislih imamo snemalni kot laserskega skenerja. Iz osnov ALS-ja, predstavljenih v začetnih poglavjih, vemo, kako pomemben je kot pri zajemu vertikalnih elementov, kot so stene stavb. Laserski žarek, ki poševno pada na površje Zemlje, se odbije tudi od vertikalne stene, kar za bolj pravokotno oddane žarke težje velja. Na splošno bi bilo dobro za potrebe ekstrakcije roba stavb območje obravnave večkrat (več kot 6 snemalnih pasov) skenirati iz različnih smeri leta letala, da bi lahko dobro zaznali vse stene stavbe. Zato smo uporabili le ruralno območje, saj je pokrito s kar 10 snemalnimi pasovi, medtem ko je urbano pokrito le s 3 pasovi. Več trajektorij pa seveda pomeni, da se projekt podraži.
- Rezultati so lahko ob uporabi drugih parametrov in tipov podatkov mnogo bolj uporabni. Uporabili smo namreč samo odbojno širino vala, ki je bila edino merilo in kriterij pri izboru točk za segmentacijo, saj smo jo hoteli bolje proučiti. Ob upoštevanju še nekaterih drugih kriterijev (recimo hrapavosti površja, amplitude in preseka odbojnega valovanja) bi lahko pridobili večje število kvalitetnih točk, s

tem pa tudi možnost za več dobrih segmentov, ki bi bolj popolno predstavljali obod stavbe. Če pa upoštevamo tudi druge tipe podatkov, kot so slikovne podobe, katerih obdelava je znova postala izredno zanimiva za strokovno javnost, bi skupaj z laserjem lahko prinesle izredno zanimive rezultate.

Možnosti za nadaljnje raziskave je veliko, saj se področje hitro razvija, vselej se odkrije kaj novega, kar prevetri že nekatere uveljavljene miselne vzorce ter nam ponudi nove rešitve za merjenje in ponazarjanje stvarnosti.

7 ZAKLJUČEK

Raziskava je poglobljen vpogled v polnovalovni zapis podatkov laserskega skeniranja. Izpostavljen je parameter odbojna širina vala, ki je glavni predmet obdelave in analize, podrobneje sta razložena tudi dva obsežna postopka: analiza polnovalovnega zapisa in postopek segmentacije. Omenjene vsebine so bistveni elementi diplomskega dela, do katerih sem se dokopala postopoma, saj na začetku dela cilj ni bil jasno določen.

Vse se je začelo z odhodom in delom na Dunaju. To izkušnjo lahko na kratko opišem z naslednjimi besedami: s seboj na Dunaj nisem nosila pričakovanj, le prazen list papirja ter odprtost za nove možnosti. Veliko se da narediti, če človek verjame in nima v glavi že vnaprej popolnoma začrtanih poti. Pri tem ne smem zanemariti okolja, v katerem sem raziskovala – dopuščanje svobode ustvarja v človeku možnost preizkušanja obstoječih razmer. V mojem primeru so bili to obstoječi neobdelani laserski podatki, ki sem jih lahko poljubno uporabljala oz. s katerimi sem se lahko »igrala«. Igra je namreč zanimiva in vselej ustvarjalna, če se ob njej učimo in spoznavamo nove stvari. Zaradi tega se mi zdi izkušnja izrednega pomena, saj je bil praktičen del diplomske naloge v celoti narejen in zaključen na Dunaju, čeprav sem tja prišla brez začrtanih osnovnih smernic o poteku in ciljnih celotnega dela. Začrtane sem imela le osnovne ideje, ki sem jih omenila že v uvodu.

Delo lahko označim za raziskovalno, saj sem postopke, ideje in načrte izbirala oz. ustvarjala med delom. Najprej sem proučila odbojno širino vala, in sicer njene najbolj pogoste vrednosti. Pridobljene izsledke sem nato uporabila pri 2D- in 3D-prikazih, ki so mi dali odločilne ugotovitve: ekstrakcija zunanjege roba stavbe je morda mogoča. Sledila je priprava podatkov in izbor laserskih točk za postopek segmentacije, ki je v končni fazi potrdil domnevo, saj pridobljeni segmenti tvorijo zunanji rob obravnavanih dveh stavb. Na koncu sem kot zanimivost dodala še primerjavo dobljenih rezultatov s katastrskimi podatki istega območja.

V uvodu sem podala dve hipotezi, za kateri lahko rečem, da sta sprejeti, vendar prva le delno. Hipoteza prevedeva hitrejšo in bolj samodejno metodo, ki bi ločila rob stavbe od preostalega oblaka laserskih točk. Z opisanim načinom in postopka dela pripravimo podatke za postopek segmentacije počasi in po korakih. Poleg tega pa delo ni samodejno, večina korakov poteka ročno ter na podlagi človeške presoje. Čeprav je zamisel o hitrejši metodi, ki bi s samodejnimi postopki olajšala delo, dobra spodbuda za raziskovanje, je nisem uresničila. Kljub temu pa sem uspela ločiti točke, ki predstavljajo rob stavbe, od preostalega dela stvarnosti, zato je prva

hipoteza pogojno izpolnjena. Druga hipoteza pa je v celoti izpolnjena, saj sem metodo uspešno izvedla samo na podlagi parametra odbojna širina vala.

Celotna raziskava se je izkazala za izredno zanimivo in uspešno, saj sem poleg strokovnega znanja pridobila tudi vedenje o drugih manj očitnih stvareh, ki spremljajo ustvarjanje diplomskega dela. Za najpomembnejše se je izkazalo samostojno delo ob sprejemanju lastne nevednosti, kar je pripomoglo k pristnemu sodelovanju. Tega smo malokrat deležni, še posebej ko imamo opravka z navidezno zdravo tekmovalnostjo, česar v znanosti nikoli ne manjka, vendar navsezadnje še zmeraj velja: več glav več ve. Brez pomoči in modrega vodenja somentorja iz Dunaja, ki je računal na mojo samostojnost in zagnanost, z analizo in delom ne bi dosegla želenih rezultatov. Osebnostno se mi zdi raziskovalni način dela nekaj čudovitega, sploh če je snov raziskave zanimiva in obetavna. Kljub temu pa se nemalokrat zgodi, da raziskovalec izgubi stik z realnimi potrebami okolja ter ne uvidi prave koristi svojega dela. Takrat postane znanost sama sebi namen. Prav o tem sem tudi sama premišljevala, čeprav so končni rezultati zanimivi, predvsem za nadaljnjo obdelavo, vendar metoda sama ni ravno uporabna in praktična. Toda mnogokrat je dovolj, da prikažemo ideje in možnosti, ki bodo morda rodile nove in še boljše ideje za pridobivanje novega znanja.

Aerolasersko skeniranje terena je prevetrilo geodezijo, saj zahteva nove pristope in metode obdelave. Vendar so stvari v geodeziji med seboj močno povezane, se dopolnjujejo in prehajajo druga v drugo. Tako je klasična geodezija še vedno nepogrešljiva tudi pri laserskem zajemu, saj je mnoge podatke preprosto nemogoče vselej z gotovostjo zajeti. Združevanje različnih metod in podatkov, ki se med seboj v določenih segmentih lahko dobro dopolnjujejo, je ključno za uspešno delovanje in podajanje geodezije. To poraja novosti in postavlja izzive in cilje, ki jih je treba osvojiti.

VIRI

Aerofotosnemanje poročilo, Program upravljanja z obalnim območjem. 2006.

<http://www.rrc-kp.si/files/Cel%20dokument%20GRADIVO%20CAMP.pdf> (16. 8. 2010).

Bretar F., Chauve A., Mallet C., Jutzi B. 2008. Managing full waveform lidar data: a challenging task for the forthcoming years.

http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/69.pdf (22. 7. 2010).

Dorninger P., Nothegger C. 2007. 3D segmentation of unstructured point cloud for building modeling.

http://www.pf.bv.tum.de/isprs/pia07/pub/P/A07_Dorninger_Nothegger.pdf (25. 7. 2010).

Dorninger P., Pfeifer N. 2008. A Comprehensive Automated 3D Approach for Building Extraction, Reconstruction, and Regularization from Airborne Laser Scanning Point Clouds.

<http://www.mdpi.com/1424-8220/8/11/7323/pdf> (24. 2. 2009).

Fellhofer A. 2006. Mehrzweckkarte (Multipurpose Map) – The Digital City Map of Vienna

<http://unstats.un.org/unsd/geoinfo/UNGEGN/docs/23-gegn/wp/gegn23wp69.pdf> (20. 4.

2011).

Filin S., Akel A. N., Doytsher Y. 2007. Detection and reconstruction of free form surfaces from airborne laser scanning data.

http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W52/final_papers/Filin_2007.pdf (27. 4. 2011).

Filin S., Pfeifer N. 2005. Neighborhood System for Airborne Laser Data.

http://www.ipf.tuwien.ac.at/np/Publications/filinPfeifer_PERS.pdf (15. 7. 2010).

Filin S., Pfeifer N. 2005. Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood.

http://www.ipf.tuwien.ac.at/np/Publications/filinPfeifer_ISPRSJ.pdf (23. 4. 2009).

Fras K. M., Attwenger M., Bitenc M. 2007. Klasifikacija rabe površin iz vrednosti intenzitete odbitega laserskega žarka.

http://www.geodetski-vestnik.com/51/3/gv51-3_519-536.pdf (27. 4. 2011).

Gajski D. 2007. Osnove laserskega skeniranja iz zraka.

http://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=32556&lang=en (5. 5. 2011).

Grigillo D. 2010. Samodejno odkrivanje stavb na visokoločljivih slikovnih virih za potrebe vzdrževanja topografskih podatkov. Doktorska disertacija. Ljubljana, (D. Grigillo): str. 156.

<http://www.dlib.si/v2/Details.aspx?query=%27udc%3DAstronomija%2C+astrofizika%27&pageSize=20&fsourcetype=visoko%25%A1olska+dela&URN=URN%3ANBN%3ASI%3ADO C-F3INWALQ> (15. 5. 2011).

Gunderson D. 2008. Mapping the future. Minnesota Public Radio.

<http://minnesota.publicradio.org/display/web/2008/07/09/digitalmap/>; (5. 5. 2011).

Hollaus M., Höfle B. 2010. Terrain roughness parameters from full-waveform airborne lidar data.

http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part7/b/pdf/287_XXXVIII-part7B.pdf (5. 5. 2011).

Hollaus M., Mücke W., Höfle B., Dorigo W., Pfeifer N., Wagner W., Bauerhansl C., Regner B. 2009. Tree species classification based on full-waveform airborne laser scanning data.

http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_178065.pdf (30. 11. 2009).

Höfle B., Hollaus M., Lehner H., Pfeifer N., Wagner W. 2008. Area-based parameterization of forest structure using full-waveform airborne laser scanning data.

http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_166568.pdf (16. 8. 2010).

Lehner H., Briese C. 2010. Radiometric calibration of full-waveform airborne laser scanning data based on natural surfaces.

http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part7/b/pdf/360_XXXVIII-part7B.pdf (3. 5. 2011).

Mücke W. 2008. Analysis of full-waveform airborne laser scanning data for the improvement of DTM generation. Diplomaska naloga. Dunaj. Tehniška univerza Dunaj.
http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_170289.pdf (4. 2. 2009).

Navratil G., Hafner J., Jilin D. 2010. Accuracy determination for the Austrian digital cadastral map (DKM).
http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_184753.pdf (20. 4. 2011).

OPTECH Inc. 2007. SHOALS-3000 product brochure.
<http://www.optech.ca/pdf/Brochures/SHOALS2007.pdf> (15. 7. 2010).

Pfeifer N., Briese C. 2007. Laser scanning – principles and applications.
http://scholar.google.si/scholar?q=Laser+scanning+%E2%80%93+principles+and+applications&hl=sl&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart (4. 2. 2009).

RIEGL, Airborne Laser scanner LMS-Q560.
<http://www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/produktdetail/product/scanner/6/> (22. 6. 2009).

Roncat A., Wagner W., Melzer T., Ullrich A. 2008. Echo detection and localization in full-waveform airborne laser scanner data using the averaged square difference function estimator.
http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2008/Roncat_et_al_2008_PJF.pdf (22. 7. 2010).

SCOP++.2011.
http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/scop/scop_dtm_sheet.htm (4. 5. 2011).

Shan J., Toth C. K. 2009. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. Boca Raton, Florida, USA, Taylor & Francis Group: str. 590.

The Vienna laser scanning survey. 2008.

http://www.geoconnexion.com/uploads/vienna_intv7i5.pdf (23. 4. 2009).

Vosselman G., Gorte B. G. H., Sithole G., Rabbani T. 2004. Recognising structure in laser scanner point clouds.

http://scholar.google.si/scholar?q=Recognising+structure+in+laser+scanner+point&hl=sl&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart (27. 4. 2011).

Vosselman G. (ur.), Maas H.-G. (ur) 2010. Airborne and terrestrial laser scanning, Scotland, UK, Whittles Publishing Dunbeath: str. 318.

Wagner W., Roncat A., Melzer T., Ullrich A. 2007. Waveform analysis techniques in airborne laser scanning.

http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo_1936.pdf (25. 7. 2010).

Wagner W., Ullrich A., Ducic V., Melzer T. 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner.

http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VF4-4J4HK8P-1&_user=4776866&_coverDate=04%2F30%2F2006&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&_view=c&_searchStrId=1757120771&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000033658&_version=1&_urlVersion=0&_userid=4776866&_md5=def9d2b51740e60e52071f7c4e886868&_searchtype=a (5. 5. 2011).

Yu-Ching L., Mills P.J. 2010. Factors influencing pulse width of small footprint, full waveform airborne laser scanning data.

http://digital.ipcprintservices.com/display_article.php?id=292296 (17. 5. 2011).