

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

Jamova 2, p.p. 3422
1115 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



**PODIPLOMSKI
ŠTUDIJ
GEODEZIJE**

Kandidatka:

ANDREJA ŠVAB LENARČIČ, univ.dipl.inž.geod.

Uporaba lidarskih podatkov za klasifikacijo pokrovnosti

Magistrsko delo št.: **47**

Use of lidar data for land cover classification

Master of Science Thesis No.: **47**

Komisija za zagovor:

Mentor:

izr.prof.dr. Krištof Oštir

Predsednik komisije:

izr.prof. dr. Bojan Stopar

Članica:

doc.dr. Mojca Kosmatin Fras

Članica:

dr. Tatjana Veljanovski, znanst.sodel. ZRC SAZU

Datum zagovora: _____ 2009

Ljubljana, februar 2009

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

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

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **ANDREJA ŠVAB LENARČIČ** izjavljam, da sem avtorica magistrskega dela z naslovom: »**UPORABA LIDARSKIH PODATKOV ZA KLASIFIKACIJO POKROVNOSTI**«.

Ljubljana, 30.01. 2009

Andreja Švab Lenarčič

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 528.8:711.14(043.3)
Avtor: Andreja Švab Lenarčič, univ. dipl. inž. geod.
Mentor: izr. prof. dr. Krištof Oštir
Naslov: Uporaba lidarskih podatkov za klasifikacijo pokrovnosti
Obseg in oprema: 135 str., 9 pregl., 2 graf., 101 sl., 12 en., 2 pril.
Ključne besede: pokrovnost, lidar, intenziteta

Izvodček

Ker večina kart pokrovnosti v Sloveniji zadošča zgolj analizam na ravni države oz. statistične regije, sem v nalogi skušala izdelati tudi karto za uporabo na lokalni ravni. Pri tem sem kot vir uporabila različne podatke lidarskega snemanja, kot so višina, intenziteta in standardna deviacija višine. Potrdila sem dejstvo številnih raziskovalcev, da je intenziteta opazovanega objekta odvisna od vrste dejavnikov in zato precej težka za interpretacijo. Po njeni preučitvi in nekaterih izboljšavah sem z njo kljub vsemu zelo dobro izločila kategorije trava, njive in asfalt. Za izločitev dreves in stavb uporaba intenzitete žal ni nudila ustreznih rezultatov, zato sem iz lidarskih podatkov izračunala standardno deviacijo višin, ki se je za izločitev teh dveh kategorij izkazala kot zelo uspešna.

V sklopu naloge sem na osnovi samostojnih lidarskih podatkov uspela izdelati kakovostno karto pokrovnosti lokalnega območja, ki loči pet osnovnih kategorij, po potrebi pa bi jih lahko ločili tudi več. Ko je metodologija izdelave karte znana, lahko karto izdelamo povsem avtomatsko, z minimalnim naporom in stroški. Pri tem dobimo karto zelo dobre položajne in tematske natančnosti.

Prednosti takšnih kart so uporabnost za lokalne študije, hiter in cenovno ugoden način pridobitve sloja, časovna usklajenost podatkov, objektivna določitev pokrovnosti, možnost uporabe v GIS, možnost prilagoditve sloja za specifične študije, možnost pogostega osveževanja sloja ter možnost prikaza karte v trirazsežnem prostoru. Slabost je, da je karta uporabna zgolj za študije na lokalni ravni, saj velika količina točkovnih podatkov zahteva zahtevno strojno in programsko opremo.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 528.8:711.14(043.3)
Author: Andreja Švab Lenarčič
Supervisor: Associate Professor Krištof Oštir, Ph.D.
Title: Use of lidar data for land cover classification
Notes: 135 p., 9 tab., 2 graph., 101 fig., 12 eq., 2 ann.
Key words: land cover, lidar, intensity

Abstract

While the majority of land cover maps of Slovenia is intended to serve analyses at the level of country or statistical region, the thesis discusses how to create a map that could serve local projects as well, by processing various lidar data, such as elevation, intensity and standard deviation. Observations of several researchers have been confirmed: the intensity of the observed object depends on many factors and is therefore not easy to interpret. The categories of grass, field and asphalt could nevertheless be classified distinctively by carefully studying the problem and implementing various improvements. The use of intensity alone, however, could not extract trees and buildings, so standard deviation of height was calculated from the lidar data, which has actually proved very successful.

On the basis of independent lidar data, a three dimensional high quality land cover map of local area has been successfully generated, which distinguishes five basic categories, although more detailed sub-categories could be introduced as well, if necessary. Once the methodology is determined, products can be generated fully automatically, with minimal effort and costs. What is even more important, the resulting maps are of very high position and thematic accuracy.

Advantages of such maps are their usefulness for local studies, prompt and cost-friendly method of layer acquisition, time adjustment of data, objective land cover identification, GIS use possibility, possibility of layer adjustment for specific studies, possibility of frequent layer updating, and last but not least, the possibility of three dimensional map display. There is also one main disadvantage: the map is useful merely for the study on a local level, since the huge quantity of point data requires very powerful hardware and software technology.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem vsem, ki so mi pomagali pri izdelavi moje magistrske naloge. Še posebej pa se zahvaljujem:

- mentorju izr. prof. dr. Krištofu Oštirju za nesebično pomoč in usmerjanje pri izdelavi naloge,
- ustanovam, ki so mi omogočile uporabo podatkov (Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Inštitut za antropološke in prostorske študije, Geoin d.o.o. ter Mestna občina Maribor, Urad za komunalo, promet, okolje in prostor, Služba za geografski informacijski sistem in obdelavo podatkov),
- sorodnikom in prijateljem, ki so me vzpodbujali pri delu in mi stali ob strani.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	PRIMERJAVA RAZLIČNIH KART POKROVNOSTI IN RABE TAL V SLOVENIJI.....	4
2.1	Osnovne definicije	4
2.2	Vrsta rabe v Zemljiškem katastru	4
2.3	Dejanska raba zemljišč	7
2.4	Zbirka dejanske rabe zemljišč (GURS).....	9
2.5	CORINE	12
2.6	Statistični GIS pokrovnosti tal	14
2.7	Karta pokrovnosti (ZRC SAZU).....	16
2.8	Ugotovitve.....	19
3	ZRAČNO LASERSKO SKENIRANJE – LIDAR	20
3.1	Osnove metode ZLS	20
3.2	Zajem podatkov z merskim sistemom ZLS.....	21
3.3	Interakcija laserskega pulza s površjem	25
3.4	Zajemanje odbojev	27
3.5	Tehnične lastnosti merskega sistema ZLS	33
3.6	Obdelava podatkov.....	34
3.7	Natančnost trirazsežnih koordinat laserskih točk.....	38
3.8	Uporaba ZLS v praksi.....	42
4	INTENZITETA ODBOJA LASERSKEGA ŽARKA	44
4.1	Opredelelitev intenzitete odbitega laserskega žarka	44
4.2	Enačba radarja	45
4.3	Vrednosti merjene intenzitete.....	47
4.4	Prečni prerez odbitega laserskega žarka.....	49
4.5	Podoba intenzitete podatkov ZLS.....	51
4.6	Različne uporabe intenzitete odboja.....	56

5	UPORABLJENI PODATKI IN PROGRAMSKA OPREMA.....	59
6	KLASIFIKACIJA POKROVNOSTI.....	65
6.1	Začetna klasifikacija	65
6.2	Razdelitev podatkov na višinske pasove	67
6.3	Uvedba standardne deviacije (STD).....	75
6.4	Uvedba funkcij združi in presej.....	86
6.5	Uporaba klasifikacije lidarskih podatkov pri sencah BDOF1.....	92
6.6	Uvedba načinov izboljšav, ugotovljenih s podrobnejšo analizo lidarskih podatkov 93	
6.7	Klasifikacija vode.....	104
6.8	Omejitve klasifikacije lidarskih podatkov zaradi strukture pokrovnosti	107
6.9	Uporabnost klasifikacije lidarskih podatkov v praksi.....	108
7	ZAKLJUČEK.....	112
8	POVZETEK	117
9	SUMMARY	119
	VIRI.....	121
	PRILOGE	129

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Pravilne razdalje do objektov ter odstopanja (v m) pri različnih metodah zaznave pulza (Wagner et al., 2007).....	30
Preglednica 2: Tipični parametri sistemov ZLS, ki so trenutno na voljo (Briese, 2007).....	34
Preglednica 3: Nekateri tehnični podatki o podatkih BDOF1.....	64
Preglednica 4: Nekateri tehnični podatki o lidarskih podatkih (Pavlek, 2007).....	64
Preglednica 5: Vrste objektov glede na višino objekta.....	71
Preglednica 6: Faktor popravka za posamezno serijo.	97
Preglednica 7: Statistika intenzitete na strehi stavbe.....	98
Preglednica 8: Statistika intenzitete na izbranem območju.	102
Preglednica 9: Nekatere lastnosti kart pokrovnosti.	109

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Odvisnost intenzitete od absolutnega kota snemanja.....	96
Grafikon 2: Statistika vrednosti intenzitete glede na serije.....	97

KAZALO SLIK

Slika 1: Zajem podatkov v misiji zračnega laserskega skeniranja (ALTM, 2007).	20
Slika 2: Vzorci skeniranja (a, b, c) (Kukko, 2007).....	25
Slika 3: Več odbojev enega laserskega žarka na drevesu (TopoSys, 2007).....	27
Slika 4: Oddan in vrnjen pulz. Prikazane so točke zaznave pulza posameznih metod ter časi med oddanim in sprejetim pulzom. Črtasta horizontalna linija določa prag, uporabljen za metodi praga in težišča (Wagner et al., 2007).	29
Slika 5: Zgoraj od leve proti desni so prikazani odboji od naslednjih predmetov: a - pšenično polje; b - drevo, grmovje in tla; c - nagnjena streha. Spodaj: Odbiti signal ter točke sprožitve pulzov pri različnih metodah (vertikalni profili, združeni s konvolucijo) (Wagner et al., 2007).	29
Slika 6: Celoten odboj žarka, zaznan z valovnim laserjem (Flood, 2001).	30
Slika 7: Vplivi oblike površja na sprejet odziv (Jutzi in Stilla, 2006).....	31
Slika 8: Primera zveznega odziva (Hug, 1997).	31
Slika 9: Primer sestavljenega valovnega odtisa (Nayegandhi, 2006).....	33
Slika 10: Oblak točk prvega (črne točke) in zadnjega odboja (rdeče točke) (Donoghue et al., 2007).....	35
Slika 11: Levo – digitalni model površja, desno – digitalni model reliefa (Briese, 2007).....	36
Slika 13: Levo – ortofoto, desno – rezultat klasifikacije na osnovi lidarskih podatkov (Nardinocchi, 2003).....	38
Slika 14: Model stavb (levo) in model vegetacijskega pokrova (desno) (Andersen, 2007).....	38
Slika 15: Odboji znotraj enega odtisa (Kukko, 2007).	40
Slika 17: Skica geometrije zajema lidarskih točk (Wagner, 2005).	45
Slika 21: Oblak točk (a) in razdelitev na višinske sloje (b) (Popescu, 2007).....	53
Slika 22: Multispektralna podoba QuickBird (a) ter podobe intenzitete glede na višinski razpon (b) (Popescu, 2007).....	53
Slika 23: Dejanska (a) in v podatkih zapisana (b) razporeditev tarč znotraj odtisa.	54
Slika 25: Točke enega pasu (levo) in točke dveh prekrivajočih se pasov (desno) (Shin, 2007).	55
Slika 34: Oblak točk lidarskega snemanja (levo) ter prikaz nekaterih atributov (desno).....	62
Slika 35: Od leve proti desni: intenziteta, DMR in DMP.....	63

Slika 36: BDOF1 Slivnice (levo) ter barvna podoba intenzitete Slivnice (desno).	65
Slika 37: Klasifikacija BDOF1 (levo) in klasifikacija podobe intenzitete (desno).....	67
Slika 38: Od leve proti desni: DMR, DMP, višine območja MB 3.	68
Slika 39: Razdelitev točk na talne (zelene točke) in netalne (rdeče točke). Desno je prikazan izsek leve podobe.	68
Slika 40: Točke glede na red odboja ter vrsto (talne, netalne).....	69
Slika 41: Od leve proti desni: BDOF1; talne točke (vijolične) in netalne točke (rumene); točke, višje od 1 m.	69
Slika 42: Objekti, višji od 0,5 m, 1 m, 2 m in 3 m (od leve proti desni).....	70
Slika 43: Na podlagi BDOF1 prikazani objekti, višji od 0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m (od leve proti desni).....	70
Slika 44: Prikaz objektov glede na njihovo višino.....	71
Slika 45: Objekti, višji ali nižji od 1 m.	72
Slika 46: Ročno vektorizirana oblika strehe (levo) ter rastrirana streha (desno).....	73
Slika 47: Podoba objektov z višino nad 1 m (rumeno) ter primerjava teh objektov z vektorizirano streho in rasteriziranim poligonom.	73
Slika 48: Od leve proti desni: BDOF1, prvotna klasifikacija BDOF1 in prvotna klasifikacija intenzitete.	74
Slika 49: Od leve proti desni: klasifikacija BDOF1 in intenzitete po razdelitvi na višine.	74
Slika 50: Točke, zajete v pasu 5 m ter njihov profil.	75
Slika 51: Statistični podatki višine izbranih točk na območju drevesa (levo) in strehe (desno).	76
Slika 52: Točke dela območja MB 2 pod mrežo z velikostjo celice 1.5 m.....	77
Slika 53: Barvna podoba vseh vrednosti STD (levo) in vrednosti STD za objekte, višje od 1 m (desno).....	78
Slika 54: Razdelitev dreves (zeleno) in stavb (rdeče) glede na vrednost STD.	79
Slika 55: Stavbe po STD (levo), filtrirane s filtrom večine (sredina) in s filtrom največje vrednosti (desno).....	80
Slika 56: Klasifikacija intenzitete po višinski razdelitvi (levo) ter na osnovi STD in filtriranja (desno).....	81
Slika 57: Levo – vse točke (rdeče) in talne točke (modro); desno – netalne točke.	82

Slika 58: Podoba STD objektov, višjih od 1 m, pri uporabi vseh točk (levo) ter zgolj netalnih točk (desno).	82
Slika 59: Primerjava netalnih točk (rdeče) ter točk reda edini (modre).	83
Slika 60: Podoba STD območja MB 1 za objekte, višje od 1 m, pri velikosti pikslov 1 m, 1,5 m in 2 m (po vrsti).	84
Slika 61: Izsek podob na sliki 60.	84
Slika 62: Klasifikacija dreves na osnovi STD na območju MB 2.	85
Slika 63: Stavbe po STD, filtriranje stavb ter prikaz stavb na BDOF1 (območje MB 3).	86
Slika 64: Stavbe, dobljene na osnovi STD (levo) ter učinek funkcije združi (sredina) ter presej (desno).	87
Slika 65: Prvotno filtrirane stavbe (levo) ter filtriranje po uporabi funkcij združi in presej (desno).	88
Slika 66: Stavbe po STD (levo), prvotno filtrirane stavbe (sredina) ter uporaba funkcij združi in presej (desno).	88
Slika 67: Ročno vektorizirane stavbe v vektorski (levo) in rastrski (desno) obliki.	89
Slika 68: Stavbe iz lidarskih podatkov (levo) ter stavbe iz BDOF1 (desno) na ročno izločenih stavbah.	89
Slika 69: Združitev stavb in dreves s tlemi.	90
Slika 70: Končna podoba klasifikacije na osnovi lidarskih podatkov (levo) in podatkov BDOF1 (desno).	91
Slika 71: Klasifikacija BDOF1, ki vključuje sence (levo) ter podoba, kjer so sence nadomeščene s klasifikacijo lidarskih podatkov (desno).	92
Slika 72: Točke glede na kot snemanja.	94
Slika 73: Linije enakih višin na strehi stavbe (levo), podoba intenzitete (sredina) ter izsek nekaj vrednosti intenzitete (desno).	95
Slika 74: Izsek vrednosti intenzitete strehe točk serije 1, 2 in 3 (od leve proti desni).	96
Slika 75: Od leve proti desni: BDOF1, prvotna podoba intenzitete, popravljena podoba intenzitete.	98
Slika 76: Prikaz kotov snemanja na območju MB3 (levo – vsi koti, desno – koti manjši od 4°).	99
Slika 77: Intenziteta točk, prikazanih glede na red odboja.	100
Slika 78: Edini odboj (rdeče) ter več odbojev pulza (modro).	100

Slika 79: Točke, obarvane glede na isti GPS čas (isti pulz).	101
Slika 80: Primerjava intenzitete točk edinega odboja in točk več odbojev.	101
Slika 81: Levo: podoba intenzitete, izdelana na osnovi prvotnih točk reda prvi in edini; desno: podoba intenzitete, izdelana na osnovi prvotnih točk reda edini ter popravljenih točk reda prvi.	102
Slika 82: Levo: podoba intenzitete objektov višjih od 1 m, izdelana na osnovi prvotnih točk reda prvi in edini; desno: podoba intenzitete objektov višjih od 1 m, izdelana na osnovi prvotnih točk reda edini ter popravljenih točk reda prvi.....	103
Slika 83: Levo: podoba intenzitete objektov nižjih od 1 m, izdelana na osnovi prvotnih točk reda prvi in edini; desno: podoba intenzitete objektov nižjih od 1 m, izdelana na osnovi prvotnih točk reda edini ter popravljenih točk reda prvi.....	103
Slika 84: Območja vode v Mariboru.....	104
Slika 85: Podoba, obarvana glede na število točk (levo) ter podoba intenzitete (desno).	105
Slika 86: Od leve proti desni: BDOF1, klasifikacija na osnovi BDOF1 in njeno filtriranje.	105
Slika 87: BDOF1 jezera (levo) ter klasifikacija vode in senc na osnovi BDOF1 (desno).....	106
Slika 88: Od leve proti desni: klasifikacija vode iz BDOF1; klasifikacija vode iz lidarskih podatkov; združeno.	106
Slika 89: Prikaz oblaka točk glede na višino (levo) ali na vrsto točk tla oz. netla (desno)....	129
Slika 90: Prikaz oblaka točk glede na intenziteto (levo) ali na red odboja (desno).....	130
Slika 91: Trirazsežen oblak točk.....	130
Slika 92: Prikaz profila oblaka točk.....	130
Slika 93: Barvni oz. črnobeli DMR.	131
Slika 94: Plastnice.....	131
Slika 95: Različna trirazsežna pogleda DMR s traso kolesarske proge.....	133
Slika 96: BDOF1 na trirazsežnem DMR.	133
Slika 97: Točke vzpenjače nad traso kolesarske proge.....	134
Slika 98: DMP na območju kolesarske proge.....	134
Slika 99: BDOF1 na DMP na območju kolesarske proge.	134
Slika 100: DMP, popravljen s klasifikacijo.	135
Slika 101: Trirazsežni model trase kolesarske proge.....	135

KAZALO PRILOG

Priloga A: Programska oprema za obdelavo podatkov

Priloga B: Izdelava trirazsežnega modela kolesarske proge

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
BDOF1	barvni digitalni ortofoto načrt merila 1 : 5000
CCD	Angl. Charge – Coupled Detector. Slikovni detektor, sestavljen iz integriranega vezja z mrežo povezanih svetlobno občutljivih elementov. Vsak izmed slednjih nabojev, ki je odvisen od intenzitete vpadne svetlobe, prenese prek svojih sosedov na zunanje vezje, ki ustvari podobo.
CLC	Corine Land Cover – evropski projekt za izdelavo karte pokrovnosti
CORINE	COorRdination of INformation on the Environment oz. koordinacija informacij o stanju okolja
DGPS	angl. differential global positioning system - diferencialni sistem globalnega določanja položaja
DKN	digitalni katastrski načrt
DMP	digitalni model površja
DMR	digitalni model reliefa
DMR20	digitalni model reliefa merila 1:20000
DMV	digitalni model višin
DOF	digitalnih ortofoto načrt
DOF1	digitalni ortofoto načrt v merilu 1:1000
DOF5	digitalni ortofoto načrt v merilu 1:5000
DTK25	državna topografska karta merila 1:25000
DTN5	digitalni topografski načrt merila 1:5000
EEA	Evropska agencija za okolje
EMV	elektromagnetno valovanje
GERK	grafična enota rabe kmetijskih gospodarstev
GIS	geografski informacijski sistem
GJI	gospodarska javna infrastruktura
GK-KS	Gauss Kruegerjev koordinatni sistem
GURS	Geodetska uprava Republike Slovenije
JRC	Joint Research Centre - Skupni raziskovalni center Evropske Komisije

LS	laserski skener
MKGP	Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano
MOPE	Ministrstvo za okolje, prostor in energijo
RGB	Red, Green, Blue – barvni prostor, prikazan v barvah rdeča, zelena in modra
SURS	Statistični urad Republike Slovenije
SZPP	sistem zbirk prostorskih podatkov
TIN	Triangulated irregular network – nepravilna trikotniška mreža
WGS 84	World geodetic system – svetovni geodetski sistem, določen leta 1984; najbolj razširjen geocentrični koordinatni sistem.
ZENDMPE	Zakon o evidentiranju nepremičnin, državne meje in prostorskih enot
ZLS	zračno lasersko skeniranje
ZRC SAZU	Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti
ZUreP-1	Zakon o urejanju prostora

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

Opise spodaj navedenih manj znanih besed in tujk sem črpala iz virov: Oštir, 2006, Wikipedia, 2008 in Slovar slovenskega knjižnega jezika, 2008.

absorpcija	Angl. absorption. Zmanjšanje jakosti elektromagnetnega valovanja pri gibanju v snovi. Absorpcijo določajo dielektrične lastnosti materiala in je močno odvisna od valovne dolžine.
atribut	Angl. attribute. Lastnost predmeta ali pojava, kateri koli imenovani detajl, ki opredeljuje, klasificira ali izraža stanje izbranega predmeta.
barvni prostor RGB	Angl. RGB colour space. Koordinatni sistem, ki barvne odtenke podaja z osnovnimi barvami, to je rdečo, zeleno in modro (red, green, blue).
bližnja infrardeča svetloba	Angl. near infrared light. Elektromagnetno valovanje z valovnimi dolžinami tik nad rdečim delom vidne svetlobe, to je med 0,7 μm in 2 μm .
buffer	Vplivna cona.
daljinsko zaznavanje	Angl. remote sensing. Znanost pridobivanja informacij o površju Zemlje, ne da bi z njo prišli v neposredni stik. Pri tem zaznavamo in zapisujemo odbito ali sevano elektromagnetno valovanje, ga obdelujemo, analiziramo in uporabimo v različnih aplikacijah.
detektor	Angl. detector. Naprava, ki meri prisotnost in intenziteto elektromagnetnega valovanja. Detektor prek optičnega sistema opazuje valovanje določenega dela površja pri izbrani valovni dolžini.
digitalizacija	Angl. digitalization. 1. Postopek pretvorbe analognega podatka v digitalno obliko. 2. Postopek ustvarjanja rastrske ali vektorske predstavitve podatkov v geografskih informacijskih sistemih.
digitalni model reliefa	Angl. digital relief model. Računalniška predstavitev glavnih lastnosti reliefa določenega območja. Digitalni model reliefa ne vsebuje le prikaza površja samega, ampak tudi njegov opis z nakloni, ekspozicijo ter plastnicami, padnicami, točkami vrhov ter z drugimi značilnimi

	črtami in točkami.
digitalni model višin	Angl. digital elevation model. Računalniška predstavitev višin na določenem območju, preprostejši približek zapisa digitalnega modela reliefa. Največkrat je zapisan kot dvorazsežna celična mreža z višinami kot atributi.
divergenca žarka filter	Kot razširjanja žarka. Angl. filter. <ol style="list-style-type: none">1. Optična naprava, ki izbira valovne dolžine.2. Računska operacija, ki poudari ali zakrije elemente z določeno frekvenco na podobi.
filtriranje	Angl. filtering. Metode obdelave podob, ki upoštevajo prostorske razsežnosti podatkov (upoštevajo sosedo). S filtriranjem lahko odstranimo šum na satelitskih posnetkih, zgladimo ali poudarimo meje med homogenimi območji in podobno. Pri tem opazujemo spremembe v intenziteti, ki so večinoma postopne in le redko nenadne, in govorimo o »prostorski frekvenci«.
geoidna ondulacija	Geoidna ondulacija oziroma geoidna višina (n) je višinska razlika (razdalja vzdolž normale) med referenčnim elipsoidom in Geoidom.
georeferenciranje	Angl. georeferencing. Tudi geokodiranje ali georegistracija; postopek izvajanja geometrijskih popravkov in vpenjanja daljinsko zaznanih podob v koordinatni sistem. Način določanja prostorskih koordinat objektov in pojavov v prostoru, ki predstavlja obstoj ustreznega koordinatnega sistema.
GIS (geografski informacijski sistem)	Angl. Geographic information system. Sistem za zajemanje, shranjevanje, vzdrževanje, obdelavo, povezovanje, analiziranje in predstavitev prostorskih geokodiranih podatkov. GIS sestavljajo strojna oprema, sistemska in namenska strojna oprema, uporabniške aplikacije, zbirke prostorskih podatkov ter vzdrževalci in uporabniki.
GPS (sistem globalnega pozicioniranja)	Angl. global positioning system. Sistem za globalno določanje lege, ki temelji na tehnologiji vesoljske radijske navigacije. Sistem je začelo leta 1973 vzpostavljati ameriško obrambno ministrstvo, danes pa ga

	sestavlja 27 satelitov. To mu omogoča natančno in zanesljivo določanje položaja kjer koli na zemeljski obli.
hiperspektralni skener	Angl. hyperspectral scanner. Skener, ki podatke zajema v več sto kanalih hkrati.
barvni prostor HSI	Angl. HSI colour space. Koordinatni sistem, ki barvne odtenke podaja z intenziteto, barvo in nasičenostjo.
informacija	Angl. information. Miselni pomen, ki ga ljudje pripisujejo podatkom z znanimi uporabljenimi načini njihove interpretacije in predstavitve.
informacijski razred	Skupina podatkov z atributi, ki dajejo enako informacijo.
INS (inercialno navigacijski sistem)	Angl. inertial navigation system. Sistem, ki omogoča določanje položaja in navigacijo z uporabo optičnih ali mehanskih naprav, kot so žiroskopi – vrtavke, ki so vrtljive okoli treh, med seboj pravokotnih osi.
intenziteta	Angl. intensity. Izraz intenziteta uporabljamo na mnogih področjih (fizika, fotometrija, radiometrija, matematika...), vendar se njen pomen lahko močno razlikuje. V nalogi se uporablja v kombinaciji z laserskim žarkom in v splošnem predstavlja jakost odbitega signala. Podrobneje je opisana v nalogi (poglavje 4).
interpolacija	Približna vrednost funkcije znotraj obsega znanih nepovezanih vrednosti neodvisne spremenljivke.
interpretacija	Angl. interpretation. Postopek, pri katerem posebej izurjen operater (interpretator) opazuje podobe in iz njih pridobiva informacije.
interpretacijski ključ	Angl. interpretation key. Lastnost ali kombinacija lastnosti, ki omogočajo prepoznavanje predmetov na podobi.
kalibracija	Angl. calibration. 1. Tudi usmerjanje; postopek preverjanja ustreznosti delovanja senzorja (ali druge naprave). 2. Postopek, pri katerem vrednosti na podobi povežemo s fizičnimi količinami, kot so npr. odbojnost, geometrija ali faza.
kategorija	Kar ima v okviru kake razporeditve, razdelitve enake, podobne značilnosti; skupina, vrsta, razred (SSKJ).

klasifikacija	Angl. classification. Eden najpomembnejših korakov pri obdelavi daljinsko zaznanih podob, ki predstavlja povezavo med daljinskim zaznavanjem in geografskimi informacijskimi sistemi. S klasifikacijo iz rastrske podobe dobimo kvantitativen sloj, ki ga lahko uporabimo v analizah. Pri klasifikaciji gre za prepoznavanje predmetov na zemeljski površini na osnovi njihovih – praviloma spektralnih – lastnosti.
klasifikacijski ključ	Z dogovorom določen način, sistem, po katerem se kaj rešuje (kdaj in zakaj neko območje spada v točno določeno kategorijo).
koherentnost	Ravna svetlobna fronta v eni sami valovni dolžini.
laser	Angl. light amplification by stimulated emission of radiation (ojačitev svetlobe s spodbujano emisijo sevanja). Laser je naprava, ki z izkoriščanjem prehodov med energijskimi stanji molekul ali atomov ustvarja žarek elektromagnetnega valovanja, ponavadi v ultravijoličnem, vidnem ali infrardečem delu spektra. Značilnosti laserske svetlobe so velika intenziteta, enakomerna porazdelitev intenzitete po preseku žarka, majhna divergenca, koherentnost in značilna valovna dolžina.
lidar	Angl. lidar. Okrajšava za light detection and ranging oziroma svetlobno zaznavanje in merjenje razdalj. Gre za tehnologijo, podobno radarski, ki omogoča določanje razdalje do objektov ali površin z merjenjem časa potovanja laserskega impulza. Lidar uporablja laserje, ki delujejo v vidnem ali bližnje infrardečem delu elektromagnetnega spektra. Z njim lahko pridobivamo natančne podatke o obliki zemeljskega površja, na primer za izdelavo digitalnega modela višin.
lidarski podatki	Oblak točk, dobljen z lidarskim snemanjem.
LS	Laserski skener.
modeliranje	Prenos lastnosti, značilnosti raziskovanega predmeta na podoben predmet, narejen po določenih pravilih.
monokromatskost	Prikaz svetlobe le v eni barvi.
mozaičenje	Sestavljanje razdeljenih območij nazaj v celoto.
multispektralni	Posnetek, kjer senzorji na satelitih zaznavajo več različnih, med seboj

satelitski posnetek	ločenih delov spektra svetlobe.
nadzorovana klasifikacija	Angl. supervised classification. Oblika klasifikacije posnetkov, pri kateri operater določi učne vzorce, program (algoritem) pa ustvari njihove spektralne podpise. Piksle na podobi nato z uporabo različnih tehnik razdeli glede na podane vzorce, pri čemer lahko nekateri piksli ostanejo neklasificirani.
nenadzorovana klasifikacija	Angl. unsupervised classification. Oblika klasifikacije, pri kateri piksle razporedimo v razrede glede na njihovo »naravno« zduževanje v spektralnem prostoru. Pri nenadzorovani klasifikaciji v prvem koraku ne potrebujemo informacij o opazovanem površju, v drugem koraku pa moramo razrede prepoznati.
normalizacija	Postopek predobdelave podob, ki odpravi vpliv različne osvetlitve zaradi oblike površja in s tem olajša primerjavo podob. Gre za umetno odstranitev senc na podobah z upoštevanjem digitalnega modela višin.
ortofoto	Pretvorjena, prevzorčena fotografija v izdelek z geometrijskimi značilnostmi določene kartografske projekcije.
ortorektifikacija	Dodelitev določenega položaja (x, y, z), relativno glede na koordinatno mrežo.
piksel	Angl. pixel. Tudi slikovni element (pixel, picture element); najmanjši – praviloma kvadratni – del podobe. Piksel podaja sivo ali barvno vrednost določenega dela površja, izraženo s številčno vrednostjo.
podoba	Angl. image. Tudi slika; digitalna predstavitev podatkov daljinskega zaznavanja v obliki matrike slikovnih elementov oziroma pikslov. Podoba lahko predstavlja odbojnost ali lastno sevanje površja in je – odvisno od števila kanalov – eno ali večrazsežna. Izraz poleg tega zajema tudi vse rezultate obdelav, od predobdelave prek izboljšanja in transformacij do klasifikacije, modeliranja in simulacij. V najkrajšem pomenu je podoba vsaka slika v rastrski obliki. Pojem je širši od posnetka, ki je predstavitev resničnosti, kot jo je zajel senzor.
pokrovnost	Pokrovnost (land cover) je konkretna stvarnost, ki pokriva površje zemlje, in jo lahko neposredno opazujemo, na primer gozd, travnik...

POS	Position and orientation measuring system - sistem za orientacijo in pozicioniranje.
predobdelava	Predobdelava obsega postopke, ki pripravijo podatke za nadaljnjo analizo, ponavadi z namenom odpravljanja ali zmanjševanja sistematičnih napak.
preklasifikacija	Sprememba iz ene kategorije v drugo.
prevzorčenje	Angl. resampling. Izračun vrednosti novih pikslov z upoštevanjem starih, praviloma pri geometrijski transformaciji podobe. Matriko nove podobe dobimo iz vrednosti na stari, tako da upoštevamo položaj pikslov in uporabimo enega od interpolacijskih algoritmov (najpogosteje metodo najbližjega sosedu, bilinearno interpolacijo ali kubično konvolucijo). Pri prevzorčenju pride običajno do izgube oziroma spremembe vhodnih podatkov.
pulzni laser	Laser, kjer razdaljo določamo z merjenjem časa t , ki preteče od oddaje signala do sprejema na zemeljskem površju odbitega (istega) signala.
raba tal	Raba tal (land use) je namen, za katerega ljudje izkoriščajo neko zemljišče, s poudarkom na njegovi funkcijski vlogi v ekonomskih aktivnostih, na primer industrija, rekreativne površine idr. Je abstraktna in je včasih ne moremo objektivno določiti niti s podrobnim ogledom.
radiometrična ločljivost	Število vrednosti, ki predstavljajo interval, na katerem so predstavljene odbojne vrednosti za določen del spektra (interval 0-255 = 8 bitov/piksel).
raster	Angl. raster. Oblika zapisa podatkov, pri kateri vrednosti podajamo v središčih ali ogliščih pravilne kvadratne mreže. Vrednosti so podane z matrikami številčnih vrednosti. Točnost rastrske predstavitve je odvisna od velikosti mrežnih celic, ki jo sestavljajo. V mrežnem zapisu vedno podajamo podobe daljinskega zaznavanja, pogosto pa tudi modele višin ali druge interpolirane spremenljivke.
rastriranje	Prikaz vektorskih podatkov v obliki mreže, kjer vsaka celica v mreži vsebuje svojo vrednost.
refleksija	Odboj.

segmentacija	Angl. segmentation. Postopek delitve podobe na homogena območja (množice sosednjih pikselov). Segmentacija je praviloma prvi korak predmetno usmerjene klasifikacije.
skener	Angl. scanner. Snemalni sistem, ki opazuje površje z detektorji, ki imajo majhno vidno polje. Senzor s premikanjem detektorjev po površini Zemlje ustvarja dvorazsežne podobe. Snemanje poteka točko za točko, vrstico za vrstico, kombinacija gibanja detektorjev (ponavadi zasuka) in gibanje platforme pa ustvarja dvorazsežno podobo. Glavni vrsti skenerjev sta prečni in vzdolžni.
spektralni odziv	Tudi spektralni podpis (angl. spectral signature). Opis načina odboja elektromagnetnega valovanja na predmetu v odvisnosti od valovne dolžine.
standardna deviacija	Statistični kazalec za merjenje statistične razpršenosti enot.
standardni odklon	Glej standardna deviacija.
topologija	Geometrija, ki se ukvarja z invariantami pri zveznih preslikavah. Topološki atributi podajajo povezanost, sosedstvo in vsebovanje geografskih objektov.
transmisija	Prepust.
valovni laser	Laser, kjer razdaljo določamo z določitvijo faznih razlik med oddanim in sprejetim signalom.
zlivanje ločljivosti	Povečanje prostorske ločljivosti multispektralnega kanala na ločljivost pankromatskega kanala.
zračno lasersko skeniranje (ZLS)	ZLS je metoda daljinskega zaznavanja, s katero pridobivamo trirazsežne informacije o objektih na zemeljskem površju in o površju samem, ne da bi bili v stiku z njim. Za zajem površja in objektov na njem se uporablja laserski skener, ki je vgrajen v dno nosilca tj. helikopterja ali letala. Za določitev tridimenzionalnih koordinat zajetih točk v referenčnem koordinatnem sistemu moramo poznati položaj in orientacijo senzorja v trenutku oddaje vsakega laserskega pulza ter čas potovanja laserske svetlobe od vira do objekta in nazaj.

1 UVOD

Že precej stoletij je znano, da moramo biti za uspešno načrtovanje in gospodarjenje z zemljišči seznanjeni z njihovo pokrovnostjo in rabo tal. Prva je opazovan fizični pokrov na površju Zemlje, druga pa socialno ekonomska funkcija površine Zemlje in predstavlja funkcionalno koriščenje prsti za poljedeljske in industrijske namene ter za gradnjo stanovanj. Raba tal in pokrovnost sta bili zanimivi že fevdalcem, ko so želeli dobiti čim višje dajatve, zelo aktualni pa sta tudi danes, ko npr. načrtujemo prostorske posege ter spremljamo posledice globalnega segrevanja. Ker večina odločitev temelji na vizualni predstavi, so ljudje od nekdaj želeli pokrovnost in rabo tal vizualizirati, jih prikazati na kartah. Prve karte so bile za današnji čas sicer skromne, z napredkom tehnologije pa so se izboljševale. Že od začetka so dobro služile namenu, pravi razcvet pa je povzročila tehnologija GIS, ki je uporabnost teh kart v kombinaciji z drugimi kartami eksponentno povečala. Različni nameni uporabe so prinesli izdelavo različnih kart iste tematike. Za celotno območje Slovenije obstaja nekaj kart rabe tal oz. pokrovnosti v digitalni obliki. Narejene so bile na podlagi različnih virov in z različnimi metodami. Zaradi različnih namenov se razlikujejo njihova kakovost, podrobnost ter opredelitve in število kategorij. Pomembna razlika je v času, ki je bil potreben za njihovo izdelavo, v številu ljudi, ki so sloj izdelovali, in potrebnih finančnih sredstvih. Razlikujejo se tudi formati zapisa, saj so nekatere karte v rastrskem in druge v vektorskem zapisu.

Za pridobitev predstave o kartah pokrovnosti, ki so na voljo v Sloveniji, sem v začetnem poglavju naloge predstavila osnovne značilnosti najpomembnejših kart na to tematiko. Vedela sem, da se karte med seboj razlikujejo in da večinoma zadoščajo zgolj analizam na ravni države oz. statistične regije. Ker poleg državne uporabnosti pokrovnost vse bolj zavzema mesto kot pomembna osnova za razne lokalne projekte, sem v nalogi skušala izdelati karto pokrovnosti, ki bi bila primerna tudi za tovrstne projekte (zahteva po kar se da majhni enoti kartiranja), njena izdelava bi bila hitra in ekonomsko sprejemljiva, metodologija izdelave pa odprta za možnost prilagoditve sloja za specifične študije (prilagoditev razredov, velikosti najmanjše enote). Poleg hitre izdelave karte sem želela uporabiti vir podatkov, ki ga brez večjih težav znova pridobimo (zaradi možnosti pogostih časovnih primerjav). Poleg omenjenih lastnosti mora biti karta uporabna v sistemih GIS ter združljiva z drugimi

prostorskimi podatki. Osnovni vir, ki bi lahko zadostil takšni karti pokrovnosti, so barvni digitalni ortofoto načrti merila 1:1000 (v nadaljevanju BDOF1). Poleg teh pa danes vse večji potencial kažejo prostorski podatki lidarskega snemanja.

Izboljšanje naprav globalnega pozicioniranja in inercialnih navigacijskih sistemov, ki smo mu bili priča na prelomu tisočletja, je omogočilo razvoj lidarskega snemanja oziroma zračnega laserskega skeniranja (ZLS). Izraz *lidar* je okrajšava za LIght Detection And Ranging oziroma svetlobno zaznavanje in merjenje razdalj. Osnovni princip tehnologije je, da na podlagi izhodiščnega položaja, smeri in merjenja časa potovanja laserskih pulzov do opazovanih objektov, določimo podatke o trirazsežnem položaju objektov. S prvimi projekti spoznavamo prednosti ZLS pred fotogrametrijo, ki so v večji gostoti zajetih točk, boljši višinski natančnosti, v zmožnosti prodiranja v vegetacijo in s tem zajema točk na tleh itd. Meritve ZLS zaradi uporabe aktivnega senzorja niso odvisne od časa zajema, t. j. od dnevne svetlobe, kot tudi niso obremenjene s sencami. Prav tako na zajem ne vplivajo vremenske razmere – oblaki. Lidar s svojimi pridobljenimi podatki o višinah trenutno predstavlja najbolj natančno tehniko za izdelavo digitalnih modelov višin, vse več pa se uporablja tudi v geologiji, gozdarstvu, arheologiji, mobilnih telekomunikacijah, atmosferski fiziki, idr.

Poleg prostorske lokacije opazovanega objekta pa lidar beleži tudi intenziteto odbitega signala od tega objekta. Intenziteta opazovanega objekta sicer nudi dodano vrednost podatku o trirazsežnem položaju (služi predvsem kot vizualni prikaz opazovanih objektov), vendar je odvisna od vrste dejavnikov in je precej težka za interpretacijo. Zato se je številni uporabniki ZLS v interpretaciji izogibajo ali pa jo uporabljajo precej pavšalno, kar uporabniku ne more nuditi ustrezne pomoči. Zadnjih nekaj let zato mnogi znanstveniki testirajo in analizirajo vrednosti intenzitete, da bi določili vrste in vplive motečih faktorjev in zapisali najprimernejši model odbojnosti, ki bi omogočal vsaj takšno kalibracijo surovih podatkov intenzitete, da bi le-ti nudili zadovoljivo uporabo. Odkrili so že nekaj tehnik za osnovno izboljšavo intenzitete, ki je po popravkih, poleg lažje prostorske predstave o izmerjenih točkah, nudila precejšnjo pomoč tudi pri različnih interpretacijah podatkov (Hu et al., 2004; Song et al., 2002, Donoghue et al., 2007). Če ne kot samostojni podatek, pa vsaj v kombinaciji z drugimi podatki, ne nujno lidarskimi (Brenner et al., 2002; Lutz et al., 2003; Tao and Yasuoka, 2001).

Ker je uporaba intenzitete zaenkrat še vedno zelo omejena, je namen moje naloge dobro preučiti lastnosti intenzitete lidarskih odbojev ter določiti nadaljnje možnosti njene uporabe v interpretaciji podatkov.

Osnovni namen naloge je torej pridobiti podrobno karto pokrovnosti, izdelano na osnovi lidarskih podatkov in BDOF1. Samostojno in v njihovih medsebojnih kombinacijah, pri čemer bi poleg intenzitete lidarskega snemanja poskušala uporabiti tudi druge lidarske podatke. Zaradi želje po hitri pridobitvi karte, čim manjšemu številu potrebnih interpretatorjev ter veliki odprtosti karte za prilagoditev specifičnim študijam, sem za izdelavo karte uporabila kar se da avtomatizirano metodologijo.

Kot že povedano, sem v nalogi najprej primerjala različne karte pokrovnosti in rabe tal v Sloveniji. Temu sledi opis metode zračnega laserskega skeniranja ter lastnosti lidarskih podatkov, zlasti intenzitete. Osrednji del naloge se začne z opisom uporabljenih podatkov ter programske opreme in se po korakih nadaljuje z opisom metode klasifikacije pokrovnosti in njenih značilnosti. Kot dodatek sta v prilogi opisani programska oprema za obdelavo podatkov ter praktična uporaba klasifikacije lidarskih podatkov – izdelava trirazsežnega modela kolesarske proge.

2 PRIMERJAVA RAZLIČNIH KART POKROVNOSTI IN RABE TAL V SLOVENIJI

Namen primerjave je na enem mestu predstaviti osnovne značilnosti najpomembnejših kart rabe oz. pokrovnosti tal za območje celotne Slovenije. Takšen nabor podatkov omogoča lažjo izbiro ustrezne karte za določen namen. Cilj primerjave je bil preučiti ustrezno literaturo in bolj nazorno opisati lastnosti vsake karte ter omogočiti njihovo neposredno primerjavo. S tem razlogom sem vsako posamezno karto najprej splošno predstavila, nato opisala metodologijo njene izdelave ter navedla njeno kakovost in uporabnost. Navedene prednosti in slabosti posameznih kart so moje osebno mnenje.

2.1 Osnovne definicije

Raba tal	Raba tal (land use) je namen, za katerega ljudje izkoriščajo neko zemljišče, s poudarkom na njegovi funkcijski vlogi v ekonomskih aktivnostih, na primer industrija, rekreativne površine idr. Je abstraktna in je včasih ne moremo objektivno določiti niti s podrobnim ogledom (Oštir, 2006).
Pokrovnost	Pokrovnost (land cover) je konkretna stvarnost, ki pokriva površje Zemlje, in jo lahko neposredno opazujemo, na primer gozd, travnik... (Campbell, 1996).
Kategorija	Kar ima v okviru kake razporeditve, razdelitve enake, podobne značilnosti; skupina, vrsta, razred (SSKJ).

2.2 Vrsta rabe v Zemljiškem katastru

Opis: Vrsta rabe se vodi kot opisni podatek, vezan na osnovne enote zemljiškega katastra – parcele in parcelne dele.

Namen: Prostorski prikaz lege parcel, parcelnih delov ter nanje vezanih opisnih podatkov za potrebe vodenja in vzdrževanja evidence Zemljiškega katastra.

Uporaba: Geodetski operativi služijo podatki pri geodetskih postopkih, posameznim resorjem občinske in državne uprave pa kot podlaga za vodenje politike gospodarjenja s prostorom, varovanja okolja, vrednotenja in obdavčevanja nepremičnin, upravljanju z objekti prometne in komunalne infrastrukture, itd.

Lastnik: Geodetska uprava Republike Slovenije (v nadaljevanju GURS)

Datum: Prvič se je digitalni katastrski načrt (DKN) vzpostavil 01.01.1992. Od takrat naprej se karta (vsaj v položajnem smislu) vzdržuje dnevno.

Osnovni princip: Za vsak parcelni del se na terenu določi vrsta rabe glede na klasifikacijski ključ.

Viri: Vir podatkov za vzpostavitev prvotnega digitalnega stanja so bili zemljiškokatastrski načrti različnih meril. Za vzdrževanje baze so vir terenske meritve, terenski ogledi in upravni postopki za spreminjanje katastrske kulture in namembnosti.

Klasifikacija: Zemljiški kataster na dveh nivojih loči 4 skupne vrste rabe (katastrske kulture, zemljišča pod gradbenimi objekti, zelene površine in nerodovitna zemljišča) in 37 vrst rabe.

Klasifikacijski ključ: GURS za vsak posamezen katastrski okraj z odločbo določi osnove za katastrsko klasifikacijo.

Merilo kartiranja: Osnovno kartiranje je potekalo v različnih merilih, odvisno od lokacije. Najpogostejša merila so bila 1:2880, 1:1440, 1:2500, 1:1000.

Najmanjša enota kartiranja: Strnjen zemljiški kos istega lastnika oziroma uporabnika se uvrsti v vrsto rabe glede na dejansko rabo, če dosega ali presega 200 m², razen za izjeme.

Predobdelava: Vzpostavitev digitalne evidence zemljiškega katastra, določitev vzorčnih parcel.

Interpretacija: Pravilnik določa, da se vrste rabe zemljišč ugotavljajo ob izvajanju zemljiško katastrske izmere in ob vzdrževanju zemljiškega katastra neposredno na zemljišču ter posredno na podlagi podatkov aerosnemanja in drugih tehničnih podatkov, ki zagotavljajo pravilnost uvrščanja zemljišč v vrste rabe.

Poobdelava: Poobdelava ni potrebna.

Položajna natančnost: Relativna natančnost (med objekti) ustreza grafični natančnosti (0,2 mm · merilo načrta). Absolutna natančnost znaša med 2 m in lahko tudi do 50 m.

Tematska natančnost: Šifra vrste rabe na parcelnih delih je 80 % natančna. Enak odstotek je pravilno določenih katastrskih razredov.

Časovna natančnost: Permanentno vzdrževanje.

Logična usklajenost: Usklajenost med lokacijsko in pisno bazo je 99 %. Sloj je 95 % topološko urejen.

Popolnost: Podatki so vzpostavljeni za skoraj vso Slovenijo.

Prikaz dejanskega stanja: Na vrsto rabe, vezano na določeno parcelo, se ne moremo popolnoma zanesti. Zanesljivost je premajhna, da bi lahko karti zaupali in se nanjo pri pomembnih analizah naslanjali. Težavo predstavlja tudi relativno veliko položajno odstopanje parcel od dejanskega stanja, kar posledično pomeni položajno odstopanje vrste rabe.

Način osveževanja: Vzdrževanje opravlja občinski geodetski organ na prijavo lastnika oziroma uporabnika in po uradni dolžnosti (revizija naj bi se izvedla na vsakih 15 let).

Zahtevnost izdelave: Celoten postopek vzpostavitve baze in njenega vzdrževanja je zelo dolgotrajen. Zahteva veliko ljudi, ki to bazo vsak dan več ur dnevno vzdržujejo. Celotna nova izdelava baze je v kratkem času ekonomsko in časovno nerealna.

Napake – vzroki: Zastarelo stanje katastra zaradi zgodnje vzpostavitve, velikih sprememb v načinu kmetijske obdelave zemljišč in gospodarskih pogojev, klasične in neracionalne tehnologije za vzdrževanje katastrske klasifikacije... Napake položaja katastra so posledica metod izmere in inštrumentarija v zgodovini ter digitalizacije prvotnih grafičnih načrtov.

Napake – odprava: Zaradi zgoraj opisanih pomanjkljivosti se je država odločila posodobiti zemljiški kataster (Lipej, 2001; 226-227). Steklo je več državnih projektov na območju evidentiranja nepremičnin. Ne zadostno kakovost izdelanega DKN v položajnem smislu sistemsko odpravljajo.

Povezljivost z drugimi zbirkami: Slaba usklajenost sloja s sloji, ki niso bili pridobljeni na osnovi DKN.

Prednosti: Majhna enota zajema; vrsta rabe je vezana na parcelo in s tem na lastništvo; vrsta rabe je zanesljivo določena (če je ažurna); vrsta rabe je na pozidanih območjih zelo natančno razdeljena; klasifikacijski ključ je narejen za vsak okraj posebej, kar pomeni upoštevanje naravnih značilnosti posameznih okrajev.

Slabosti: Neažurnost vrste rabe; slaba položajna natančnost; vezanost vrste rabe na parcele, ne na dejansko stanje; slaba povezljivost z drugimi zbirkami, ki niso vezane na DKN; dolg in

drag postopek določanja vrste rabe na parceli (obvezen terenski pregled); stalno, (ne-) sistematično zaostajanje pri registraciji številnih sprememb vrste rabe.

2.3 Dejanska raba zemljišč

Opis: Karta dejanske rabe zemljišč prikazuje stanje pokrovnosti tal, kot je v naravi. Vsako, s poligonom omejeno območje rabe, predstavlja strnjeno zemljišče z eno vrsto rabe, določeno na osnovi vnaprej dogovorjenih pravil.

Namen: Vzpostavitev prostorske podatkovne baze o rabi kmetijskih zemljišč, opredelitev postopkov vzdrževanja ter pripis podatkov o rabi kmetijskih zemljišč parcelam iz zemljiškega katastra.

Uporaba: Administrativni nadzor subvencijskih vlog, pomoč pri vzpostavljanju katastrov trajnih nasadov, registra kmetijskih gospodarstev in GERK, izvajanje drugih nalog s področja vodenja kmetijske politike.

Lastnik: Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP).

Datum: Pilotski projekt je potekal v letih 1996-1997. V letih 1998-1999 je potekala nadgradnja, razvoj informacijskega sistema MKGP. Leta 2004 so izdali priročnik za izobraževanje in dokončno izdelali sloj dejanske rabe.

Osnovni princip: Dejanska raba se določa na osnovi vnaprej dogovorjenih pravil, s pomočjo katerih se na osnovi vizualne interpretacije digitalnih ortofoto posnetkov, neodvisno od lastnika zemljišč, razmejujejo posamezne osnovne vrste rabe.

Viri: Podatki so bili pridobljeni na osnovi digitalnih ortofoto načrtov v merilu 1:5000 (DOF5).

Vir za določitev dejanske rabe so bile tudi terenske kontrole, kot pomoč pa so v dvoumnih situacijah služile tudi topografske karte, digitalni model reliefa, obvestila uporabnikov, itd.

Klasifikacija: Karta na drugem nivoju loči 21 kategorij rabe tal, na prvem nivoju pa: kmetijska zemljišča, gozdna in ostala poraščena zemljišča, pozidana in sorodna zemljišča, odprta zamočvirjena zemljišča, suha odprta zemljišča s posebnim rastlinskim pokrovom, odprta zemljišča brez nepomembnega rastlinskega pokrova ali z njim in vode.

Klasifikacijski ključ: Klasifikacijski ključ je del interpretacijskega ključa, ki ga je zelo podrobno določilo MKGP.

Merilo kartiranja: 1:5000

Najmanjša enota kartiranja: Pravilnik določa, da je najmanjša površina zajema za vodo 10 m², za pozidana in sorodna zemljišča pa 25 m². Za kategorije kmetijskih zemljišč znašajo predpisane najmanjše površine od 25 m² (rastlinjak), preko 500 m² (hmeljišče, vinograd, oljčnik in ostali trajni nasadi) in 1000 m² (vse ostale kategorije kmetijskih zemljišč) do 5000 m² (kmetijska zemljišča znotraj pozidanih površin in gozda ter ostala nekmetijska zemljišča).

Predobdelava: Priprava interpretacijskega ključa.

Interpretacija: Podatki se zajemajo s fotointerpretacijo DOF5, pri čemer je treba strogo upoštevati interpretacijski ključ. Po potrebi se uporabijo tudi dodatni podatki oz. terenski ogled.

Poobdelava: Preverjanje kakovosti interpretacije in topologije, nato prenos v evidenco.

Položajna natančnost: 1 m.

Tematska natančnost: 95 % glede na interpretacijski ključ.

Časovna natančnost: Vzdrževanje bo predvidoma v sedemletnih ciklikih.

Logična usklajenost: Lokacijska in pisna baza sta logično usklajeni, območja so definirana s topološko pravilnimi poligoni.

Popolnost: Podatki o dejanski rabi so vzpostavljeni za 100 % Slovenije.

Prikaz dejanskega stanja: Karta dejanske rabe tal je trenutno najbolj natančen enotni vir dejanske rabe tal za celotno ozemlje Slovenije, čeprav podatki niso povsem ažurni.

Način osveževanja: Podatki se prenašajo v evidenco sukcesivno, glede na obnavljanje podatkov s posnetki iz zraka ter glede na priglašene spremembe nosilca kmetijskega gospodarstva ali drugega uporabnika podatkov.

Zahtevnost izdelave: Za projekt izdelave rabe tal takšne ali podobne kvalitete je za večje območje (npr. celotno državno ozemlje) potrebno izjemno veliko finančnih sredstev in vloženega dela. Za operacije s podatki tolikšne natančnosti za večja območja je treba imeti zelo zmogljivo računalniško opremo.

Napake – vzroki: Predvidevamo, da je bila največja ovira za večjo zanesljivost končnih podatkov slabo poznavanje terena, ki ga je interpretator kabinetno obdeloval (Petek, 2005). Napake so lahko tudi posledica neažurnosti.

Povezljivost z drugimi zbirkami: Kategorij v podatkovnih zbirkah dejanske rabe tal in zemljiškega katastra ni mogoče neposredno primerjati (Petek, 2005).

Prednosti: Lokacijsko natančni; možnost uporabe v GIS; precej ažurni; interpretacijski ključ je zelo podrobno definiran (interpretacija je možna skoraj brez napak); zelo podrobno določena dejanska raba (majhne površine zajema).

Slabosti: Niso časovno primerljivi (različni datumi zajema posameznih posnetkov, uporabljenih kot vir); težave na stikih (zaradi subjektivne interpretacije ima ista raba tal na dveh posnetkih različen atribut); nova izdelava baze je v kratkem časovnem terminu ekonomsko in časovno nerealna; vsebuje dejanske rabe, za katere MKGP ni pristojen.

2.4 Zbirka dejanske rabe zemljišč (GURS)

Opis: Zbirka dejanske rabe zemljišč je del zbirke dejanske rabe prostora, kamor spada tudi zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture. Dejanska raba prostora je poleg zbirke upravnih aktov in zbirke pravnih režimov del sistema zbirk prostorskih podatkov (SZPP), ki ga je predpisal Zakon o urejanju prostora (ZUreP-1). Hkrati je dejanska raba zemljišč del zbirke podatkov o nepremičninah, ki jih je predpisal Zakon o evidentiranju nepremičnin, državne meje in prostorskih enot (ZENDMPE). Zbirka dejanske rabe zemljišč združuje vse podrobnejše zbirke podatkov, ki jih vodijo pristojna ministrstva. Osnovno izhodišče projekta je, da dejanska raba zemljišč prikazuje dejansko stanje v naravi.

Namen: Glavni namen podatkov o dejanski rabi zemljišč je dopolnitev topografskih podatkov. Podatki bodo služili za primerjavo med planskim in obstoječim stanjem zemljišč. Uporabni bodo pri vrednotenju zemljišč, ker se bodo vodili skupaj z zemljiškim katastrom in bo možno njihove podatke izkazati na parcelo. V veliko pomoč bodo tudi ministrstvu za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano pri podeljevanju subvencij. Poleg tega je zbirka podatkov stično mesto podatkov različnih sektorjev, kar pomeni, da bo možno preko njene vzpostavitve uskladiti metodologijo za jasno razmejitev različnih kategorij dejanske rabe zemljišč. Podatki o dejanski rabi zemljišč bodo eden izmed kazalcev razvoja okolja.

Uporaba: Zbirka se trenutno še ne uporablja, uporabljala pa se bo v skladu z njenim namenom. Pravilnik o vsebini in načinu vodenja zbirke podatkov o dejanski rabi prostora določa, da dejanska raba zamenja vrsto rabe v zemljiškem katastru. Trenutno se podatki na

osnovi istega pravilnika vodijo neodvisno od parcel, v prihodnosti pa bodo podatki zadostili tudi zahtevi, da so meje določene tudi tako, da je mogoče podatke izkazovati po parcelah.

Lastnik: Skupni lastnik celotne zbirke dejanske rabe zemljišč je Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS), lastniki posameznih podatkov so Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP), Ministrstvo za okolje, prostor in energijo (MOPE) ter Agencija RS za okolje (ARSO).

Datum: Projekt se je začel leta 2004 in se še ni končal, zato zbirka še ni vzpostavljena.

Osnovni princip: Osnovni princip je spojitvev določenih evidenc resornih ministrstev, odprava nesoglasij ter pretvorba na nivo parcele.

Viri: Zbirka je v osnovi zamišljena tako, da bodo vir podatkov DOF5 (pozidana zemljišča), DTN5 (vodna zemljišča) ter evidenca rabe MKGP (ostalo).

Klasifikacija: V Pravilniku o vsebini in načinu vodenja zbirke podatkov o dejanski rabi prostora so določene osnovne vrste dejanske rabe zemljišč: kmetijska zemljišča, gozdna zemljišča, vodna zemljišča, pozidana zemljišča, neplodna zemljišča. Podvrste so določene glede na vir, iz katerega so določeni podatki prevzeti.

Klasifikacijski ključ: Evidenca rabe zemljišč MKGP je izdelana na osnovi interpretacijskega ključa MKGP (glej poglavje o omenjeni evidenci), pozidana zemljišča se bodo v nadaljevanju vodila predvidoma na podlagi katastra stavb, gospodarska javna infrastruktura (GJI) se bo prevzela iz Katastra GJI, vode pa bodo predali vodarji.

Merilo kartiranja: Za vse evidence je bilo merilo kartiranja 1:5000.

Najmanjša enota kartiranja: Najmanjša enota kartiranja je določena po enakem ključu kakor pri Dejanski rabi zemljišč MKGP, le pozidana zemljišča so podrobneje definirana (16 m^2).

Predobdelava: Izdelava posameznih evidenc. Za namen tega projekta je bilo potrebno v celoti po novem postopku zajeti pozidana zemljišča, ostale evidence so že obstajale.

Interpretacija: Meje območij dejanske rabe zemljišč v posameznih evidencah so se evidentirale s topološko pravilnimi poligoni, ki se med seboj ne sekajo in neprekinjeno prekrivajo območje Republike Slovenije. Pri združitvi vseh evidenc v eno je prišlo do neustreznega sekanja poligonov. Manjša neskladja je GURS odstranil pretežno avtomatsko, večja pa posredoval pristojnim ministrstvom.

Poobdelava: Podatke je treba preoblikovati tako, da se izkazujejo na parcelo natančno. Ta naloga ni enostavna, saj položaji parcel precej odstopajo od dejanskega stanja (od DOF, na

podlagi katerega je izdelan sloj dejanske rabe). GURS se problema zaveda in ga že rešuje skozi procese transformacij katastra.

Položajna natančnost: 1 m.

Tematska natančnost: 95 % glede na interpretacijski ključ.

Časovna natančnost: Permanentno vzdrževanje (glede na spremembe in z evidenčnimi vpisi).

Logična usklajenost: Podatki so topološko urejeni, ni nepravilnih prekrivanj in lukenj.

Popolnost: Podatki o dejanski rabi so vzpostavljeni za vso Slovenijo.

Prikaz dejanskega stanja: Predvidoma bo to baza, ki bo najbolj prikazovala dejansko pokrovnost tal za celotno ozemlje Slovenije.

Način osveževanja: Permanentni prevzem evidence dejanske rabe zemljišč, spremembe v primeru ugotovitve neujemanja z dejanskim stanjem, spremembe na zahtevo lastnika ali uporabnika parcele (ZENDMPE, 14. člen).

Zahtevnost izdelave: Ves trud je zajet v posameznih zbirkah, dodaten čas zahteva združitev različnih evidenc, določanje neskladij in koordinacija med posameznimi ministrstvi.

Povezljivost z drugimi zbirkami: Trenutno se položajno slabo ujema z bazo, v kateri se mora po zakonodaji voditi, to je z digitalnim zemljiškim katastrom. Po vzpostavitvi zbirke bo z drugimi zbirkami povezljiva.

Prednosti: Prikazovala bo podrobno dejansko stanje v naravi; dejansko rabo tal bo možno prikazati na parcelo natančno; možno bo določanje lastništva; posamezne podatke bodo posredovala ministrstva, ki so za to pristojna; na enem mestu bodo zbrani in vsebinsko usklajeni uradni podatki različnih ministrstev.

Slabosti: Trenutna nezmožnost določanja dejanske rabe na parcelo natančno; podatki se nanašajo na precej dolgo časovno obdobje (1997-2000), zato ne omogočajo časovne primerjave; ažuriranje bo prinašalo precejšnje stroške, porabo časa, delovne sile in organizacijske koordinacije; različne interpretacije dejanske rabe zemljišč med pristojnimi ministrstvi; različni načini vodenja podatkov na pristojnih ministrstvih; zapleten postopek obveščanja ministrstev ob vsaki spremembi osnovnih podatkov; nekatera ministrstva ne vodijo podatkov o dejanski rabi zemljišč za katera so pristojna.

2.5 CORINE

Opis: S strani Evropske komisije je bil leta 1985 sprejet program CORINE (COorRdination of INformation on the Environment), katerega namen je bil koordinacija informacij o stanju okolja. Svet Evrope je leta 1990 ustanovil Evropsko agencijo za okolje (EEA) in ji naložil vzpostavitev Evropskega okoljskega monitoringa. V okviru projekta se je izdelala tematska karta pokrovnosti tal, ki ažurno predstavlja realno stanje pokrovnosti kot ga je zaznal satelit, ne glede na morebitno rabo ali pravno stanje. Leta 2000 in 2006 sta sledila projekta Corine Land Cover (CLC) 2000 in 2006 z namenom korekcije baze podatkov iz prejšnjega CLC, nadgradje podatkov ter ugotovitve glavnih sprememb.

Namen: Podatki so namenjeni za vsedrjavno podatkovno bazo pokrovnosti tal, ki je primerljiva z ostalimi državami v Evropi. Karta je v prvi vrsti namenjena integraciji v geografske informacijske sisteme, kjer lahko na nivoju širšega območja (EU) upravljamo z informacijami o pokrovnosti. Skupaj z informacijami reliefa so le-te temeljne za upravljanje s prostorom in naravnimi viri, zato so kot takšne osnovni vir različnih projektov.

Uporaba: Podatkovna baza CLC je podlaga za ekološke in panožne analize na evropski, regionalni in nacionalni ravni, za uporabno se je izkazala tudi na meddržavni ravni (INTERREG projekti, poročanje po EU direktivah).

Lastnik: CLC je skupen projekt Evropske agencije za okolje (EEA) in Skupnega raziskovalnega centra Evropske Komisije (Joint Research Centre (JRC)). V Sloveniji so projekt izvajali na Geodetski upravi RS v sodelovanju z Agencijo Republike Slovenije za okolje, Gozdarskim inštitutom Slovenije, Biotehniško fakulteto - Center za pedologijo in varstvo okolja, Inštitutom za geologijo, geotehniko in geofiziko ter podjetjem Gisdata.

Datum: Prvi zajem je nastal v letu 1990 (v Sloveniji 1995/1996), drugi v letu 2000 (v Sloveniji marec – november 2003), treji pa leta 2006.

Osnovni princip: Delo je potekalo po standardni in zelo natančno definirani metodologiji Corine Land Cover (CLC), ki predvideva vektorizacijo na osnovi vizualne fotointerpretacije satelitske slike.

Viri: Satelitski posnetki Landsat TM ter Landsat 7 ETM+ (multispektralni posnetki ločljivosti 25 m ter pankromatski posnetki ločljivosti 12,5 m). Kot dopolnilni vir izdelave karte so posameznim državam služile sektorske baze podatkov, topografske karte in aeroposnetki.

Klasifikacija: Nomenklatura CORINE land cover je sestavljena iz treh nivojev: prvi nivo (5 razredov) predstavlja glavne kategorije, drugi nivo (15 razredov) za uporabo na kartah meril 1:500.000 in 1:1.000.000 in tretji nivo (44 razredov) za uporabo v projektu CLC (merilo 1:100.000).

Klasifikacijski ključ: Klasifikacijski ključ je bil sestavljen iz vrednosti RGB izbranega piksla, ki predstavlja točno določen razred (CORINE). Ker je spektralni podpis prostorsko odvisen, je klasifikacijski ključ služil zgolj kot pomoč. Določanje rabe je moralo temeljiti na prepoznavanju značilnih oblik na površju Zemlje ter upoštevanjem drugih državnih kart, ki se tičejo pokrovnosti.

Merilo kartiranja: Merilo kartiranja je 1:100.000.

Najmanjša enota kartiranja: Z upoštevanjem teh zahtev je bilo določeno minimalno območje 25 ha, minimalna širina poligona 100 m in najmanjša zaznana sprememba v pokrovnosti 5 ha.

Predobdelava: Zbiranje podatkov ter priprava podatkov (ortorektifikacija, geolociranje, prevzorčenje, izboljšava podob, oblikovanje podatkovne baze, vnos podatkov...).

Interpretacija: Računalniško podprta fotointerpretacija. Razredi v CORINE niso vezani zgolj na homogen spektralni odziv, zato je metodologija izdelave močno odvisna od zmožnosti interpretatorja podobe. Upoštevati je bilo potrebno zahtevano kakovost interpretacije.

Poobdelava: Kontrola posameznih listov (kontrola kod, topologije, geometrije), integriranje (povezovanje posameznih delov v celoto), izročitev podatkovne baze (izvoz podatkov, poročilo, predaja podatkov).

Položajna natančnost: Srednja položajna napaka sloja CORINE je 100 m ali manj.

Tematska natančnost: Vsaj 85 %.

Časovna natančnost: Baza se osvežuje na pet let.

Logična usklajenost: Med posameznimi poligoni ni prekrivanj, točke, linije in poligoni se ne podvajajo, centri ležijo znotraj poligonov.

Popolnost: Lokacijski podatki v digitalni obliki so vzpostavljeni za 100 % Slovenije.

Prikaz dejanskega stanja: Karta prikazuje grobo stanje izpred dveh let. Podatki v vsebinskem smislu niso bili popolnoma pravilno interpretirani, dejansko stanje v razdrobljeni Sloveniji pa ukrivlja tudi prevelika velikost najmanjše enote kartiranja.

Način osveževanja: Baza se vsakih pet let ponovno izdela po enaki metodologiji.

Zahtevnost izdelave: Za uporabo pripravljene vire ter celotno metodologijo so pripravili na EEA. Naloga vsake posamezne države je bila, da pravilno interpretira dejansko rabo na njenem območju po predpisani metodologiji. Kljub temu projekt še vedno zahteva nekaj časa in interpretatorjev.

Povezljivost z drugimi zbirkami: Zaradi preišljeno določenega merila kartiranja je sloj neposredno primerljiv z drugimi zbirkami, ki so v merilu 1:100.000. Med seboj so primerljivi tudi podatki CORINE posameznih evropskih držav, saj so narejeni po enotni metodologiji in kvalitativno preverjeni s strani ene ustanove.

Prednosti: Časovna in prostorska primerljivost na evropski ravni; zagotovljena osvežitev sloja na pet let; sofinanciranje izdelave sloja s strani EU; relativno hitra izvedba; stabilnost kakovosti: nabava podatkov, ortorektifikacija in kontrola kakovosti so centralizirane.

Slabosti: Za slovenske razmere prevelika enota kartiranja, veliko število mešanih razredov.

2.6 Statistični GIS pokrovnosti tal

Opis: Statistični GIS pokrovnosti tal Slovenije prikazuje prostorsko razporeditev osnovnih kategorij pokrovnosti tal.

Namen: Statistični urad Republike Slovenije (SURS) pridobiva podatke o splošni pokrovnosti tal za izpolnjevanje nacionalnih in mednarodnih potreb po teh podatkih. Zbiranje podatkov pomeni izpolnitev zakonskih obveznosti, ki jih ima SURS kot zbiralec in dajalec podatkov po določilih Zakona o državni statistiki.

Uporaba: Podatke o pokrovnosti tal uporablja SURS pri izdelavi raznih geografskih analiz in pri izdelavi tematskih kart. Sloj je primeren kot osnova za kartografsko prikazovanje drugih podatkov in tudi za povezovanje pokrovnosti tal z drugimi geografsko lociranimi podatki in ustrezno geomatično analizo prostorskih odvisnosti.

Lastnik: Statistični GIS pokrovnosti in rabe tal so izdelali na Oddelku za geomatiko in GIS pri SURS, kateri je tudi lastnik podatkov.

Datum: Karta je bila do sedaj izdelana že štirikrat, in sicer v letih 1993, 1997, 2001 in 2005.

Osnovni princip: Karto pokrovnosti so izdelali s klasifikacijo multispektralnih satelitskih posnetkov ter primerjavo in prekrivanjem rezultata z več pomožnimi zbirkami podatkov. Iz zbranih podatkov so izdelali vektorske sloje.

Viri: Satelitski posnetki Landsat ETM, podatki Zajema kmetijske rabe tal (MKGP), evidenca hišnih števil, podatki državnih cest, železnic, odlagališč, kamnolomov in peskokopov. Kot pomožni podatki so bili uporabljeni tudi DMR20, DOF, terenski vzorci ter Državna topografska karta DTK25.

Klasifikacija: Klasifikacija je razdeljena na dva nivoja. Na prvem loči 7 kategorij, na drugem pa 19. Prvi nivo tvorijo: gozdnate površine, vse kmetijske površine, pozidane površine, ceste, železnice, odprte površine, vode.

Klasifikacijski ključ: Vrsto pokrovnosti so določali na podlagi vadbenih vzorcev, uporabo logičnega filtriranja ter uporabo drugih baz podatkov o rabi zemljišč oz. pokrovnosti tal.

Merilo kartiranja: Uporabljeni podatki so bili zelo različne kakovosti (npr. železniške proge so bile digitalizirane iz kart v merilu 1:50.000, tekoče vode, jezera in zaježitve iz 1:25.000, ceste in gozdni rob iz 1:5.000).

Najmanjša enota kartiranja: Najmanjša enota kartiranja kmetijskih, gozdnatih, odprtih površin in voda je 1 ha. Najmanjša enota kartiranja pozidanih površin je povprečna velikost objekta s pripadajočo hišno številko (120 m²).

Predobdelava: Zlivanje ločljivosti, georeferenciranje, razrez scen po statističnih regijah, priprava vadbenih vzorcev.

Interpretacija: Nadzorovana mehka multispektralna klasifikacija (gozdnate, kmetijske in odprte površine) ter generiranje vplivne cone okrog centroida hišne številke in linijskih podatkov cest in železnic.

Poobdelava: Logično filtriranje rezultatov klasifikacije ter dodajanje nekaterih podatkov.

Položajna natančnost: Srednja napaka položaja ni večja od 30 m.

Tematska natančnost: Povprečna zanesljivost je 86 %.

Časovna natančnost: Statistični GIS pokrovnosti tal se izdeluje vsaka štiri leta (prvič 1993).

Logična usklajenost: Podatki so topološko urejeni. Med posameznimi kategorijami ni prekrivanj.

Popolnost: Podatki zajemajo celotno območje Slovenije.

Prikaz dejanskega stanja: Karta prikazuje stanje izpred treh let. Podatki v vsebinskem smislu niso bili popolnoma pravilno interpretirani, dejansko stanje v razdrobljeni Sloveniji pa ukrivlja tudi prevelika velikost najmanjše enote kartiranja.

Način osveževanja: Podatki se v celoti ponovno izdelajo vsake štiri leta, med tem se ne spreminjajo.

Zahtevnost izdelave: Območja pokrovnosti, ki so se določala na podlagi satelitskih posnetkov, so bila določena avtomatsko z nadzorovano klasifikacijo, za kar na SURS niso potrebovali veliko število operaterjev in njihovega časa. Podobno so na časovno komponento vplivali ostali dopolnilni podatki, saj so bili zgolj prevzeti od lastnikov ter pripeti na osnovni sloj pokrovnosti.

Povezljivost z drugimi zbirkami: Podatki o pokrovnosti tal so povezljivi z drugimi zbirkami, saj jih SURS uporablja pri izdelavi raznih geografskih analiz in pri izdelavi tematskih kart. Sloj je primeren kot osnova za kartografsko prikazovanje drugih podatkov in tudi za povezovanje pokrovnosti tal z drugimi geografsko lociranimi podatki in ustrezno geomatično analizo prostorskih odvisnosti.

Prednosti: Velika površina tal je zajeta na enem satelitskem posnetku (enak čas snemanja); možnost avtomatizirane interpretacije pokrovnosti tal; hitro in cenovno ugodno kartiranje pokrovnosti; možnost časovnih primerjav; zakonsko zagotovljena osvežitev sloja na štiri leta; ni negativnih posledic subjektivne interpretacije; možnost uporabe v GIS.

Slabosti: Slaba ločljivost za analize, ki se opravljajo za prostorske enote, manjše od statistične regije; posamezni podatki, ki določajo pokrovnost, so zelo različne kakovosti (npr. kmetijske površine in železnice); možne napake avtomatske klasifikacije in vektorizacije.

2.7 Karta pokrovnosti (ZRC SAZU)

Opis: Rastrska karta pokrovnosti Slovenije.

Namen: Osnovna karta je bila izdelana za potrebe načrtovanja omrežja mobilne telefonije. Končna karta je nadgradnja osnovne karte in je bila izdelana za namen diplomske naloge.

Uporaba: Satelitski podatki omogočajo hiter vpogled v razprostranjenost nekaterih pojavov in procesov na zemeljskem površju od državne, prek regionalne do lokalne ravni (Ramšak, 2004) in so kot takšni primerni za študije na regionalni ali državni ravni.

Lastnik: Inštitut za antropološke in prostorske študije Znanstvenoraziskovalnega centra Slovenske akademije znanosti in umetnosti (ZRC SAZU).

Datum: Karta je bila izdelana leta 2003 na podlagi posnetkov iz let 1999 in 2000.

Osnovni princip: Sloj pokrovnosti je bil izdelan s klasično nadzorovano klasifikacijo satelitskih posnetkov. Kot glavni klasifikacijski algoritem je bila uporabljena metoda največje verjetnosti, natančnost je bila povečana z upoštevanjem klasifikacije v dva sloja, omejevanjem z višino in naklonom ter dodatnih slojev.

Viri: Osnovni vir so bili satelitski posnetki Landsat TM in ETM+ iz let 1999 in 2000. Kot pomožne podatke so uporabili še: izbrane reke iz vektorskih podatkov slovenskih vodotokov (GURS), vektorske poligone slovenskih vod (GURS) in digitalni model višin s horizontalno ločljivostjo 25 x 25 m (DMV) (Oštir et al., 2000). Za kontrolo so uporabili digitalne ortofoto posnetke (DOF) (GURS) ter podatke o rabi kmetijskih zemljišč v digitalni obliki (MKGP).

Klasifikacija: Izvajalci so izbrali kompromis med velikim številom razredov in preprostostjo obdelave ter se odločili za sedem osnovnih kategorij: gozd, grmičevje in zaraščanje, ekstenzivna travniška raba, intenzivna kmetijska raba, pozidana in sorodna zemljišča, voda, odprto.

Klasifikacijski ključ: Osnova za določitev vrednosti posameznemu pikslu so bili skrbno izdelani vzorci, določeni na podlagi nenadzorovane klasifikacije, ogleda območja na digitalnem ortofotu ter slojev pokrovnosti posameznih resornih ministrstev.

Merilo kartiranja: Merilo kartiranja ni bilo določeno, saj so se vrednosti pikslov določale po v naprej predpisani sistematiki.

Najmanjša enota kartiranja: Najmanjša enota kartiranja je piksel 25 krat 25 m, kar pomeni območje 625 m².

Predobdelava: Prevzorčenje posnetkov, izločitev oblačnosti, razdelitev območja na kvadrante.

Interpretacija: Za začetno pridobitev naravne razporeditve vzorcev so uporabili nenadzorovano klasifikacijo. Dobljenim spektralnim razredom so v nadaljevanju priredili informacijske razrede, ki so jih uporabili kot vzorce za nadzorovano klasifikacijo.

Poobdelava: Mozaičenje, preklasifikacija, filtriranje, dodajanje sloja vod iz vektorskih podatkov.

Položajna natančnost: 25 m.

Tematska natančnost: Povprečna tematska natančnost karte presega 92 %, kar je za tovrstne naloge zelo dober rezultat (Foody 2002), zlasti za študije na regionalni ali državni ravni.

Časovna natančnost: Podatki se nanašajo na stanje iz leta 2000.

Logična usklajenost: Vsakemu pikslu je določena vrednost za vrsto pokrovnosti.

Popolnost: Podatki popoloma prekrivajo območje Slovenije.

Prikaz dejanskega stanja: Karta prikazuje stanje izpred osmih let. Podatki v vsebinskem smislu niso bili popolnoma pravilno interpretirani, dejansko stanje v razdrobljeni Sloveniji pa ukrivlja tudi prevelika velikost najmanjše enote kartiranja.

Način osveževanja: Karta je bila izdelana za enkratni namen. Osveževanje ni predvideno.

Zahtevnost izdelave: Glede na relativno dober rezultat so za projekt izdelave karte porabili malo ur in finančnih sredstev.

Napake – vzroki: Vzroke za napake lahko iščemo v preveliki generaliziranosti, premalo kakovostni določitvi učnih vzorcev, premalo zahtevni poklasifikaciji in preskromno uporabo dodatnih podatkovnih slojev.

Napake – odprava: Na podlagi vzorčnih točk je mogoče sklepati, da bi rezultate lahko izboljšali s kakovostnejšo določitvijo določenih učnih vzorcev ter z zahtevnejšo poklasifikacijo. Kljub temu bi točnost klasifikacije izboljšali le malenkostno (Ramšak, 2004).

Povezljivost z drugimi zbirkami: Bistvena lastnost, po kateri se ta sloj razlikuje od drugih, je oblika podatkov. Sloj se namreč vodi v rastrski obliki, ostali sloji pa so v veliki večini vektorski. Vsekakor se kot rastrska podlaga lahko podložijo katerikoli vektorski karti, za potrebe različnih GIS analiz pa jih je mogoče tudi vektorizirati.

Prednosti: Velika podrobnost za lokalne in regionalne študije; hiter in cenovno ugoden način pridobitve sloja (velika stopnja avtomatizacije); večina podatkov se nanaša na enak časovni trenutek; upoštevanje pokrajinskih raznolikosti pri klasifikaciji; ni subjektivnih napak interpretatorja; možnost izboljšave sloja z ne preveliko napora; karta prikazuje zgolj pokrovnost in ne pravnih režimov; možnost prilagoditve sloja za specifične študije; možnost prilagoditve razredov po želji naročnika; možnost pogostega osveževanja sloja in s tem kratkoročnih časovnih primerjav; analize z rastrji so mnogo bolj enostavne kot z vektorji.

Slabosti: Premajhna podrobnost za lokalne študije; nezmožnost neposredne primerjave z drugimi zbirkami; v nekaterih primerih nezmožnost neposredne uporabe v GIS; ni

primerljivosti na evropski ravni; premajhna tematska natančnost za specifične okoljske analize; kakovost vira je odvisna od vremenskih pogojev.

2.8 Ugotovitve

Opisane karte pokrovnosti se med seboj močno razlikujejo. Glavne razlike so v podrobnosti (velikosti enote) zajema, vrstah pokrovnosti, vezanosti na parcele, ažurnosti, položajni in tematski natančnosti, zanesljivosti, možnosti uporabe v GIS, časovni primerljivosti, primerljivosti z drugimi bazami, hitrosti in ceni izvedbe, idr. Vse te razlike so logična posledica namena uporabe baze in na tej osnovi temelječe premišljeno določene metodologije izdelave baze. Tako vsaka baza bolj ali manj uspešno služi svojemu namenu.

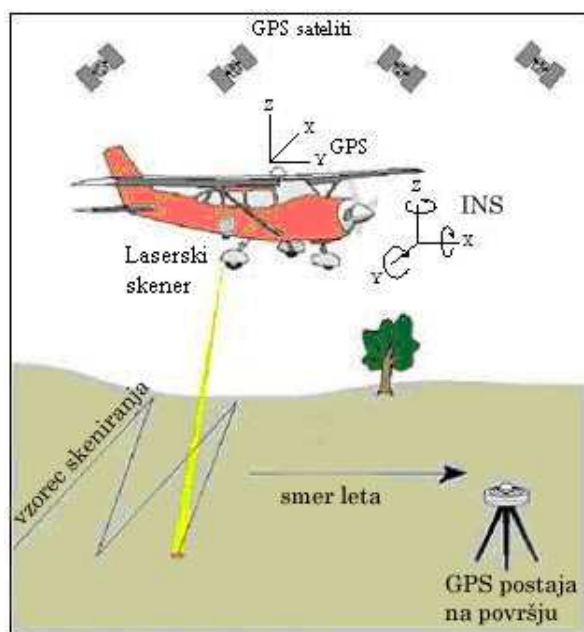
Izdelavo večine kart (vseh razen karte ZRC SAZU) predpisuje zakonodaja, saj služijo pomembnim analizam in raziskavam na območju države, statistične regije ali občine. Iz enakega razloga je metodologija za njihovo izdelavo natančno definirana in zaprta za razne prilagoditve. Poleg državne uporabnosti pa pokrovnost vse bolj zavzema mesto kot pomembna osnova za razne lokalne projekte, tudi v privatni sferi. V tem primeru mora izdelava karte temeljiti na povsem drugačni metodologiji od večine zgoraj naštetih kart. Karta mora biti v prvi vrsti primerna za kar se da majhno osnovno enoto pokrovnosti, njena izdelava mora biti hitra in ekonomsko sprejemljiva, metodologija izdelave pa odprta za možnost prilagoditve sloja za specifične študije (prilagoditev razredov, velikosti najmanjše enote). Poleg hitre izdelave karte je pri potrebi kratkoročnih časovnih primerjav potrebno zagotoviti tudi vir podatkov, ki ga brez večjih težav znova pridobimo. Poleg omenjenih lastnosti mora biti karta uporabna v sistemih GIS ter združljiva z drugimi prostorskimi podatki.

Osnovni vir, ki bi lahko zadostil takšni karti pokrovnosti, so barvni digitalni ortofoto načrti merila 1:1000 (v nadaljevanju BDOF1). Poleg teh pa danes vse večji potencial kažejo prostorski podatki lidarskega snemanja, zato sem jih v nalogi skušala uporabiti kot vir za določitev pokrovnosti. Samostojno in v povezavi z BDOF1.

3 ZRAČNO LASERSKO SKENIRANJE – LIDAR

3.1 Osnove metode ZLS

Zračno lasersko skeniranje (ZLS) je relativno nova, vendar hitro razvijajoča se metoda daljinskega zaznavanja, s katero pridobivamo trirazsežne informacije o površju samem in objektih na zemeljskem površju, ne da bi bili v stiku z njimi. Za zajem se uporablja aktivni senzor tj. laserski skener (LS), ki je nameščen v dno nosila tj. helikopterja ali letala (slika 1).



Slika 1: Zajem podatkov v misiji zračnega laserskega skeniranja (ALTM, 2007).

Fig. 1: Airborne laser scanning (ALTM, 2007).

Laserski vir oddaja lasersko svetlobo proti napravi za odklon žarkov (skener, angl. scanner), od katere se odbije in usmeri proti tlom pod nosilcem. Glede na tip skenerja se na tleh zariše značilen vzorec skeniranja prečno na smer leta. Ko se valovanje na tleh (največkrat) difuzno odbije in en del vrne nazaj v smeri senzorja, lahko detektor LS zazna odboj in registrira čas potovanja žarka. Posredno preko časa potovanja laserske svetlobe (angl. round trip travel time) se meri dvojno razdaljo od senzorja do tal (tarče, na kateri se je žarek odbil). Hkrati se zabeleži še kot odklona žarka na skenerju. Premikanje nosilca sistema v smeri leta pa omogoča zajem točkovnih podatkov v prostoru.

Za določitev tridimenzionalnih koordinat zajetih lidarskih točk v referenčnem koordinatnem sistemu pritrjenem na zemljo moramo poznati položaj in orientacijo senzorja LS v trenutku oddaje vsakega laserskega pulza. Položaj je določen s simultanimi meritvami diferencialnega kinematičnega GPS (DGPS, angl. differential global positioning system), orientacija pa z meritvami INS (angl. inertial navigation system) treh kotov zasuka nosilca v prostoru. Tehnologija ne zagotavlja določitve koordinat v realnem času, ampak zahteva dodatno procesiranje podatkov. Po končani zračni misiji se v procesu naknadne obdelave preko časovne informacije združijo podatki laserskih poševnih razdalj (meritve LS) s POS podatki položaja in orientacije (integrirane meritve sistema GPS in INS). Za večjo relativno in absolutno natančnost trirazsežnih lidarskih podatkov se pri izračunu koordinat upoštevajo še kalibracijski podatki merskega sistema ZLS. V postopku georeferenciranja se za vsak odboj laserskega žarka izračunajo trirazsežne koordinate (X , Y , Z) v referenčnem koordinatnem sistemu, ki jih nato uporabimo za izdelavo končnih rezultatov ZLS tj. za digitalni model reliefa, površja, stavb, itd.

Ker je količina zajetih podatkov s tehnologijo ZLS ogromna, je za njihovo upravljanje in uporabo v postopkih obdelave (npr. za izračun trirazsežnih koordinat, DMR, itd.) izrednega pomena razvoj zmogljivih ter učinkovitih programov (angl. software). Danes je na voljo že mnogo programskih orodij (TerraSolid, SCOP++, itd.), ki omogočajo visoko stopnjo avtomatizacije postopkov za obdelavo ter analizo lidarskih podatkov. S tem zagotavljajo tudi časovno in stroškovno učinkovitost merske tehnike ZLS ter nadalje veliko število področij uporabe ZLS.

3.2 Zajem podatkov z merskim sistemom ZLS

Glavne komponente merskega sistema ZLS, ki delujejo ločeno v samostojnih enotah, in s katerimi pridobimo želene trirazsežne podatke zajetega območja, so:

- *kompaktni laserski razdaljemer (LIDAR),*
- *naprava za odklon laserskih žarkov ali laserski skener (LS),*
- *inercialni navigacijski sistem INS (krmilno procesna enota) z visoko natančnostjo in*
- *sistem globalnega določanja položaja GPS (sistem pozicioniranja).*

Sistemu ZLS je največkrat dodana še digitalna kamera, ki omogoča simultano zajemanje vidne svetlobe (rezultat so digitalne fotografije, ki jih lahko pretvorimo v ortofoto). Druge komponente merskega sistema so še referenčna GPS postaja na tleh, drugi senzori po izbiri (digitalni CCD fotoaparati, fotogrametrična kamera), računalnik, operacijski sistem in programi za kontroliranje zajema podatkov med letom, medij za shranjevanje laserskih meritev, podatkov skenerja, podatkov GPS in INS ter alternativnih slikovnih podatkov, programi za planiranje leta in za po-obdelavo podatkov, GPS za navigacijo leta nosilca sistema, komponente za montažo sistema, neobvezno še merilci temperature in vlažnosti (Baltsavias, 1999a).

V tem kompleksnem merskem sistemu poteka veliko samostojnih meritev. Najpomembnejše meritve, ki se izvajajo v štirih glavnih komponentah merskega sistema ZLS so:

- merjenje *razdalje* z laserskim razdaljemerom;
- merjenje *odklona* laserskega žarka s skenerjem;
- merjenje *položaja* senzorja s sistemom GPS;
- merjenje *orientacije* senzorja s sistemom INS.

Sodobni sistemi laserskega skeniranja so sposobni dodatno izmeriti navpično strukturo površja in višine objektov na terenu, kot so drevesa in zgradbe, saj registrirajo *prvi in zadnji odboj* pulza (novejši sistemi tudi zvezno). Poleg trirazsežnega položaja lidarskih točk se pri nekaterih sistemih za vsak registriran odboj zabeleži tudi svetlobna *intenziteta* odbitega laserskega žarka.

3.2.1 Merjenje razdalje

Laserski razdaljemer je *aktivni senzor*, ki za zaznavanje uporablja laserski žarek in omogoča zelo natančno merjenje razdalj. Meritve so osnovane na primerjanju oddanega žarka in dela tega istega žarka, ki ga je po odboju na tarči (terenu ali objektu) zaznal detektor sistema. Laserski razdaljemer vključuje naslednjih šest podsistemov: laser, oddajno in sprejemno optiko, detektor signala (fotodiode), ojačevalec, števec časovnih intervalov in ostale enote za zajem, procesiranje, ocenjevanje, prikaz in shranjevanje potrebne elektronske komponente. Oddajna in sprejemna odprtina sta druga zraven druge, tako da si delita isto optično pot, zato je laserski skener monostatičen sistem. Vsi laserski sistemi na nek način merijo *razdaljo* med

senzorjem in tarčo, ki se običajno nanaša na *oddaljenost*.

Laser je kratica za angleške besede Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (ojačitev svetlobe s spodbujano emisijo sevanja), ki natančno opisuje delovanje laserja. Je torej naprava, ki za vir energije uporablja pojav stimulirane emisije in ojačanja svetlobnega sevanja. *Lastnosti* laserske svetlobe so (Wagner, 2005):

- velika moč (intenziteta) pulza,
- kratka dolžina pulza in velika hitrost sproščanja pulzov (pulzni laser),
- možnost modulacije laserske svetlobe s frekvenco (valovni laser),
- pravilna porazdelitev moči (intenzitete) po preseku žarka,
- visoka usmerjenost zaradi majhne divergence,
- koherentnost v prostoru in času ter
- značilna valovna dolžina in dobro definirana frekvenca (monokromatično sevanje).

Razdalja (angl. range) je z laserskim razdaljemerom določena posredno in sicer obstajata dva glavna principa, ki tako določata tudi dva tipa laserskih skenerjev.

Pri *pulznem* ali *diskretnem laserju* razdaljo določamo z *merjenjem časa t* , ki preteče od oddaje signala do sprejema na zemeljskem površju odbitega (istega) signala. Senzorski sistem oddaja kratke pulze elektromagnetnega valovanja in meri njihove odboje (vsaj enega, lahko tudi do osem). Nekateri sistemi so sposobni zabeležiti tudi intenzivnost odboja, kar omogoča ustvarjanje podobe odbojev. Glede na poznano hitrost svetlobe skozi zrak se določi razdaljo od sensorja do zemeljskega površja in nazaj tj. dvojno razdaljo laser - površje. Diskretni lidar ima nekaj pomembnih prednosti, predvsem visoko prostorsko ločljivost ter možnost povečevanja gostote meritev. Sistemi, ki delujejo na ta način, so zelo razširjeni in zato je snemanje relativno poceni. Največja pomanjkljivost pa so zapleteni algoritmi obdelave velike količine podatkov. Najnovejši sistemi v glavnem uporabljajo diskretne lidarje s trdninskimi laserji z zelo veliko močjo. Laser Nd:YAG, na primer, ki ima dolžino pulza med 10 in 15 ns in valovno dolžino 1,06 μm , ima moč več megawattov.

Pri *valovnem* ali *zveznem laserju* razdaljo določamo z *določitvijo faznih razlik* med oddanim in sprejetim signalom, ki se registrira v sistemu po odboju na površju. V tem primeru laserski

sistem oddaja signal neprekinjeno. Amplituda neprekinjenega signala je sinusno modulirana, tako da lahko na sinusoidi določimo čas začetka in konca meritev. Glavna prednost valovnega lidarja v primerjavi s pulznim je zmožnost beleženja vertikalnega profila predmetov, na katerih je prišlo do odboja. Pomembno poenostavitev pa predstavlja tudi preprostejša podatkovna struktura, tako z vidika shranjevanja kot tudi obdelave. Največja pomanjkljivost valovnega lidarja je manjša prostorska ločljivost.

Čeprav omenjena principa uporabljata različni fizikalni količini, oba dejansko merita čas potovanja signala ali časovni interval t med oddajo in sprejemom signala (angl. round-trip time). Ker poznamo hitrost svetlobe, lahko razdaljo iz časovne razlike med oddajo laserskega pulza (za primer vzemimo pulzni laser, saj je njegova uporaba v praksi skoraj izključna) in prejemom odboja izračunamo:

$$R = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t, \quad (1)$$

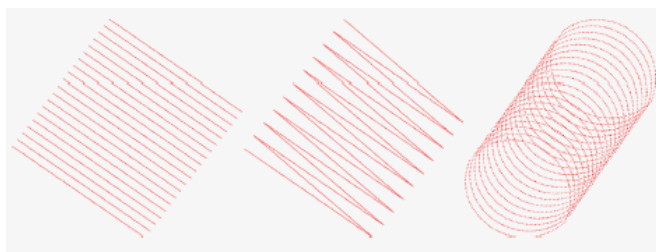
pri čemer je t čas potovanja valovanja, c hitrost svetlobe in R razdalja med senzorjem in površjem. Oba principa zaznavanja objektov na površju sta podrobneje opisana v nadaljevanju.

3.2.2 Merjenje odklona

Naprava za odklon laserskih žarkov (angl. scanner) je elektrooptični sistem, ki usmeri laserski žarek pravokotno na smer leta nosilca in meri njegov odklon. S tem poskrbi za dvodimenzionalni zajem površja, saj z merjenjem razdalj pridobimo le točkovne podatke v smeri leta nosilca. Odklon laserskega žarka (angl. scan angle) definira rotacijo med laserskim žarkom in lasersko napravo. Izmerjen je posredno iz frekvence pulzov (Schenk, 2001, cit. po Triglav, 2004). Medtem ko so si laserski razdaljemerji bolj ali manj podobni, so razlike med skenerji oz. tehnikami skeniranja večje in pomembnejše. Imajo različno porazdelitev zajetih točk in se razlikujejo po vzorcu (angl. scan pattern), ki ga med skeniranjem laserski žarek opiše na površju. Tipi elektrooptičnih komponent, ki se najpogosteje uporabljajo pri zračnem laserskem skeniranju, so (slika 2):

- skener z vrtečo prizmo (vzorec a),
- skener z nihajočim zrcalom (vzorec b),

- palmerjev skener (vzorec c),
- skener z optičnimi vlakni (angl. fiber scanner).



Slika 2: Vzorci skeniranja (a, b, c) (Kukko, 2007).

Fig. 2: Scan patterns (a, b, c) (Kukko, 2007).

Vzorec skenerja je poleg načina delovanja skenerja odvisen še od smeri in hitrosti leta ter topografije terena. Lidar točke praviloma zajema v enakih kotnih intervalih, razdalja med njihovimi odtisi na površju pa ni konstantna. Zaradi različne geometrije znotraj pasu snemanja (izrazito predvsem pri letalskem snemanju), ustavljanja in pospeševanja na robovih pasu, so lahko točke razporejene zelo »nepravilno«, zato pri lidarju ne govorimo o značilnih razdaljah, ampak le o gostoti točk (meritev) na kvadratni meter.

3.2.3 Merjenje položaja in orientacije

Laserski skener meri samo razdalje, pravi položaj odbojnikov pa lahko določimo, če poznamo položaj in usmerjenost senzorja. Za vsak poslani impulz moramo v izbranem koordinatnem sistemu, na primer WGS 84, poznati natančen položaj senzorja in kot gledanja skenerja. Ker z laserjem razdalje brez večjih težav merimo z natančnostjo enega decimetra, mora imeti tolikšno natančnost tudi *sistem pozicioniranja*. Kot je prikazano na sliki 1, so lidarski sistemi opremljeni z diferencialnim sprejemnikom globalnega pozicioniranja (DGPS) in inercialnim navigacijskim sistemom (INS). Za uspešno geokodiranje lidarskih meritev je treba oba sistema natančno sinhronizirati s skenerjem.

3.3 Interakcija laserskega pulza s površjem

Laser odda elektromagnetno valovanje (EMV). Valovanje, ki se v atmosferi ni absorbiralo ali sipalo, lahko doseže zemeljsko površje in z njim interagira. Ko energija pade na površje

nekega predmeta, lahko pride do treh oblik interakcije: absorpcije, transmisije – prepusta in refleksije – odboja. Za vso vpadno energijo bo prišlo do medsebojnega vpliva s površjem na enega ali več zgoraj naštetih načinov. Deleži vsakega načina so odvisni od valovne dolžine energije ter vrste in stanja predmeta.

Z vidika določanja razdalje do predmeta absorpcija in transmisija nista zanimivi, pomemben pa je odboj. Poznamo dva skrajna primera odboja: zrcalni odboj in razpršeni (disperzni) odboj. Ko je površina gladka (valovna dolžina je večja od značilne razdalje na površju), pride pri kontaktu EMV s površino do *zrcalnega odboja*, kjer se skoraj vsa energija odbije po odbojnem zakonu. *Razpršeni odboj* se pojavi, ko je površina, na katero pade valovanje, groba (valovna dolžina je približno enaka značilni razdalji na površju). Takrat se valovanje razprši v vse smeri. Realnost je kombinacija obeh odbojev.

Lidar oddaja svetlobo vidnega ali bližnje rdečega dela spektra, kar pomeni, da je valovna dolžina pulza majhna v primerjavi z »gladkostjo« površine večine predmetov na površju. Posledično se laserska svetloba od površja večinoma odbija disperzno, kar pomeni, da se del žarka vrne nazaj in zazna v sprejemniku.

V nekaj primerih pa lahko pride tudi do zrcalnega odboja (npr. gladka streha avtomobila). V tem primeru laserski žarek načeloma ne pride nazaj do sprejemnika. Če slučajno ta usmerjeni odboj kasneje zadene drug objekt, od katerega se odbije difuzno, ga laserski sistem lahko zazna. Vendar je izmerjena razdalja predolga (angl. multi path) in predstavlja grobo napako.

Čeprav absorpcija in transmisija ne omogočata merjenja razdalje, sta pomembni količini pri interpretaciji objektov na površju. V primeru absorpcije je namreč odbiti signal prešibak za zajem (npr. mirne vodne površine). Absorpcija je odvisna od vpadnega kota laserskega žarka in je še posebej močna v primeru pravokotnega vpada na vodno površino. Posledica je nič oz. manj točk laserskega skeniranja na sredini pasu, ki poteka čez vodne površine (Bitenc, 2007).

Absorpcija in transmisija tudi neposredno vplivata na intenziteto odbitega signala. Večjo količino signala, kot ga objekt absorbira ali prepusti, manj ga odbije nazaj proti sprejemniku.

3.4 Zajemanje odbojev

3.4.1 Zajemanje odbojev pulznega laserja

Prvi komercialni zračni laserski skenerji so omogočali merjenje časa le enega laserskega žarka, torej se je lahko registriral le en odboj (tarča). V tem primeru je interpretacija odbojnega signala preprosta. Kljub majhni divergenci laserskega žarka pa se lahko na njegovi poti ali znotraj odtisa žarka na tleh pojavijo večkratni odboji (angl. multiple echoes), če:

1. objekti ležijo na različnih višinah;
2. laserski žarek na poti proti površju osvetli druge objekte;
3. so objekti dovolj veliki in/ali imajo dovolj velik koeficient odbojnosti (da se žarek odbije);
4. je laserski žarek dovolj širok (v premeru), da osvetli več objektov.

Če je razdalja med tarčami, od katerih se je žarek odbil, večja od dolžine pulza (oz. njenega ekvivalenta v metrih, ki je enak ločljivosti razdalje), je detektor sposoben ločiti odboje med seboj in lahko meri razdaljo do posamezne tarče in po možnosti tudi intenziteto tarče.

Večina današnjih LS že lahko registrira več odbojev za vsak oddan laserski pulz – najpogosteje merijo prvi in zadnji odboj signala, nekateri pa tudi do osem ali več. Pričakujemo lahko (slika 3), da se laserski žarek najprej odbije od najvišjih objektov (npr. krošenj dreves, visokonapetostnih daljnovodov, slemen streh), ki se registrirajo v načinu *prvi odboj*. Najkasneje pa se svetloba odbije od najnižjih površin (npr. deblo drevesa) oziroma od tal in se točke registrirajo v načinu *zadnji odboj*. Zadnji odboj ne pomeni nujno meritve na terenu.



Slika 3: Več odbojev enega laserskega žarka na drevesu (TopoSys, 2007).

Fig. 3: Multiple echoes from tree (TopoSys, 2007).

Z večanjem števila registriranih odbojev enega pulza se povečajo zmožnosti zajema podatkov – dobimo *vertikalni profil objekta* (npr. drevesa), skozi katerega potuje laserski žarek. S tem v zvezi govorimo o osnovni lastnosti laserskega žarka, da je sposoben prodreti¹ vegetacijo in lahko meri višino terena. Količina zajetih podatkov je večja in jih je težje interpretirati. Še zlasti zato, ker je metoda zajemanja odbojev večkrat nepoznana. Zajemanje več odbojev je pomembno predvsem za zajem elektrovoda (žice so na različnih razdaljah) in za pridobivanje podatkov o vegetaciji (volumen gozda, višina in gostota dreves, tip gozda, gostota podrasti itd.), sicer pa merjenje le prvega in zadnjega odboja zadostuje (Katzenbeisser, 1999).

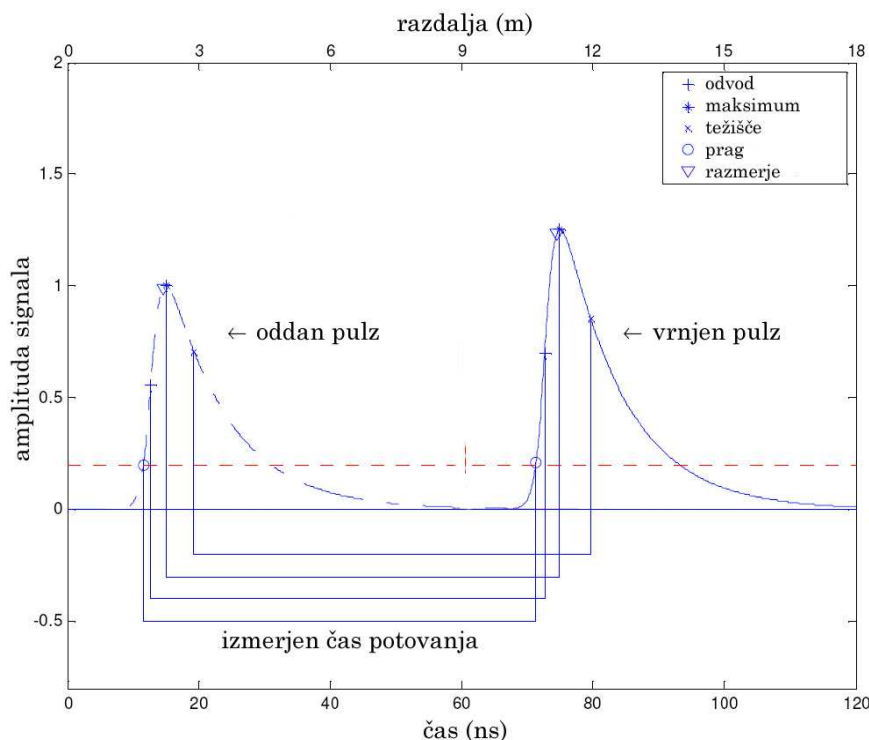
Današnji razvoj (najnovejših) senzorjev gre še naprej, v smeri zaznavanja celotnega odbitega valovanja (angl. full-waveform), kar omogoča visoka frekvenca (okoli 250 MHz) beleženja in digitalizacije sprejetega signala.

Metode zajemanja odbojev

Zaznavanje pulzov temelji na obliki vrnjenega odboja. Naloga detektorja je, da na podlagi neprekinjenega vrnjenega odboja pridobi diskretne, od časa odvisne pulze, ki določajo razdaljo med skenerjem in zaznano tarčo ter s tem lokacijo posamezne tarče. Podrobnosti teh metod, vgrajenih v komercialne sisteme ZLS žal niso znane, zato je v nadaljevanju opisanih nekaj najbolj standardnih (slika 4):

- metoda praga (threshold): najbolj osnovna tehnika za zaznavanje pulzov temelji na sprožitvi pulza, ko signal preseže določen prag (mejo),
- metoda težišča (centre of gravity): težišče linije odziva nad fiksno določenim pragom,
- metoda maksimuma (maximum): zaznava lokalnega maksimuma,
- ničla drugega odvoda (zero crossing of the second derivative): zaznava prehoda na linearni kombinaciji časovno spremenjenih oblik signala,
- konstantno razmerje (constant fraction): določa ničlo razlike med dušeno in časovno zapoznelo različico signala.

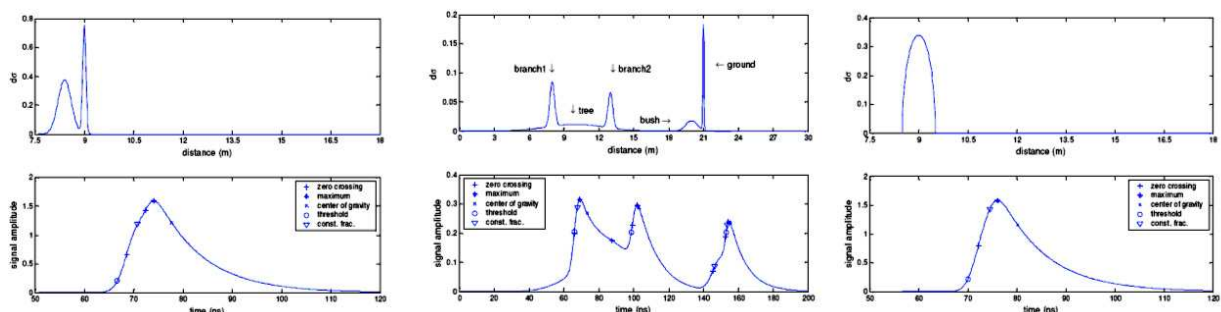
¹ Pod pojmom »prodreti« je mišljeno potovanje žarka mimo delov vegetacije, ne skozi njih.



Slika 4: Oddan in vrnjen pulz. Prikazane so točke zaznave pulza posameznih metod ter časi med oddanim in sprejetim pulzom. Črtasta horizontalna linija določa prag, uporabljen za metodi praga in težišča (Wagner et al., 2007).

Fig. 4: Emitted pulse and single-mode return signal for a Gaussian cross section. Also shown are the time differences between corresponding trigger-pulses derived from the emitted and reflected signal. The dashed horizontal line indicates the threshold level used by the *threshold* and *centre of gravity* methods (Wagner et al., 2007).

Čas, izmerjen med oddanim in sprejetim pulzom, bi moral na tem testnem primeru v vseh primerih biti 60 ns, kar določa razdaljo 9 m. Vendar pa lahko na praktičnem primeru (odboji na sliki 5 ter rezultati v preglednici 1) vidimo, da posamezne metode ne dajejo istih rezultatov. V tem primeru dajo pravilen rezultat samo tri metode.



Slika 5: Zgoraj od leve proti desni so prikazani odboji od naslednjih predmetov: a - pšenično polje; b - drevo, grmovje in tla; c - nagnjena streha. Spodaj: Odbiti signal ter točke sprožitve pulzov pri različnih metodah (vertikalni profili, združeni s konvolucijo) (Wagner et al., 2007).

Fig. 5: From top left return pulses from: a - wheat field; b - tree, bush and ground; c - tiled roof. Bottom: Reflected signal and derived trigger pulses (Wagner et al., 2007).

Preglednica 1: Pravi razdalje do objektov ter odstopanja (v m) pri različnih metodah zaznave pulza (Wagner et al., 2007).

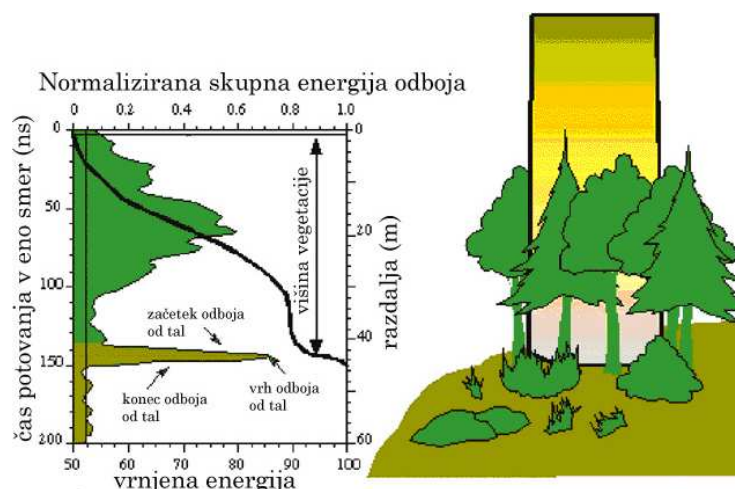
Table 1: True object distances and range errors (in m) for the different detectors (Wagner et al., 2007).

Slika	Objekt	Razdalja	Odvod	Max	Prag	Težišče	Razmerje
5	tla	9,0	0,000	0,000	0,045	-0,060	0,000
5 a	pšenica	8,4	0,015	-	0,135	-	-0,030
	tla	9,0	0,045	0,150	-	0,240	-
5 b	veja 1	8,0	0,019	-0,131	-0,161	-0,101	0,049
	deblo	10,0	-1,250	-	-	-	-
	veja 2	13,0	0,026	-0,035	-0,049	0,446	-
	grm	20,0	0,110	-	-	-0,371	0,230
	tla	21,0	0,000	0,060	-0,210	-	0,135
5 c	streha	9,0	0,075	-0,150	0,240	-0,135	0,015

Na podlagi rezultatov ugotovimo, da najboljšega, univerzalnega detektorja pulzov ni, saj je učinkovitost metod odvisna od mnogih faktorjev. Na žalost uporabnik nima možnosti izvedeti kako elektronika njegovega sistema dejansko določa lokacijo odbojev, ki jih zaznajo, niti o nobenem popačenju oblike pulza, ki ga je lahko naredila elektronika sprejemnika ali struktura površine, po tem, ko je oddala pulzni odziv. Izdelovalci lidarskih sistemov namreč trdno molčijo o metodah zaznavanja pulzov, ki jih uporabljajo njihovi sistemi (Hug, 2004), čeprav bi lahko bile te informacije zelo uporabne pri nadaljnjih korakih obdelave podatkov.

3.4.2 Zajemanje odboja valovnega laserja

Laserska energija se odbija od različnih delov rastlinskega pokrova, iz česar izhaja vrnjen odziv, kjer je amplituda pulza pri določeni višini funkcija oblike rastlinskega pokrova in tal (slika 6).



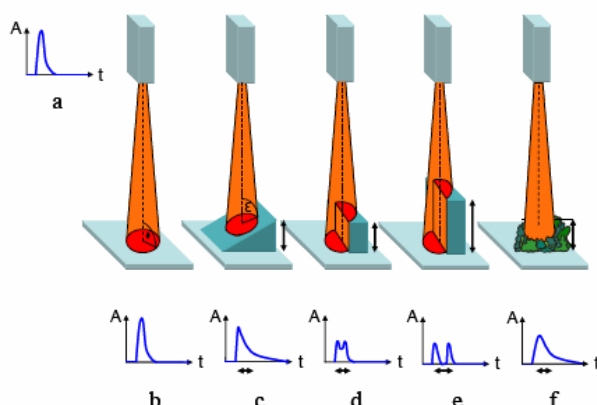
Slika 6: Celoten odboj žarka, zaznan z valovnim laserjem (Flood, 2001).

Fig. 6: Return pulse of continuous wave laser (Flood, 2001).

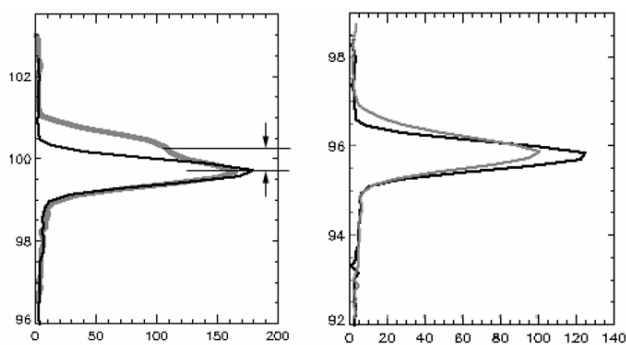
Medtem ko pulzni laser meri čas prihoda prvega ali zadnjega vrnjenega odboja, zaznava valovni lidar vrnjen signal zelo pogosto in tako shrani celotno obliko vrnjenega odziva. Frekvenca zajemanja vzorcev je 1 GHz, kar pomeni, da je velikost posameznega segmenta samo 15 cm (GeoLas, 2007). Prednost tega principa je, da je vertikalna struktura površja lahko pridobljena zelo natančno.

Na sliki 7 so prikazani vplivi različnih oblik površja na obliko odziva (Jutzi in Stilla, 2006):

- a) oblika oddanega pulza,
- b) ravna površina,
- c) nagnjena površina,
- d) dve površini z rahlo razliko v višini,
- e) dve površini z veliko razliko v višini,
- f) naključno porazdeljeni majhni objekti.



Slika 7: Vplivi oblike površja na sprejet odziv (Jutzi in Stilla, 2006).
Fig. 7: Effects of the surface on the received waveform (Jutzi and Stilla, 2006).



Slika 8: Primera zveznega odziva (Hug, 1997).
Fig. 8: Examples of waveform pulse (Hug, 1997).

Na sliki 8 sta prikazana primera zveznega odziva. V obeh primerih črna barva predstavlja odziv na ravnih tleh. Na levi sliki lahko zaznamo nizko vegetacijo, na desni pa razširitev odziva, ki je najverjetneje znak grobe površine tal, teoretično pa lahko nakazuje tudi naklon terena.

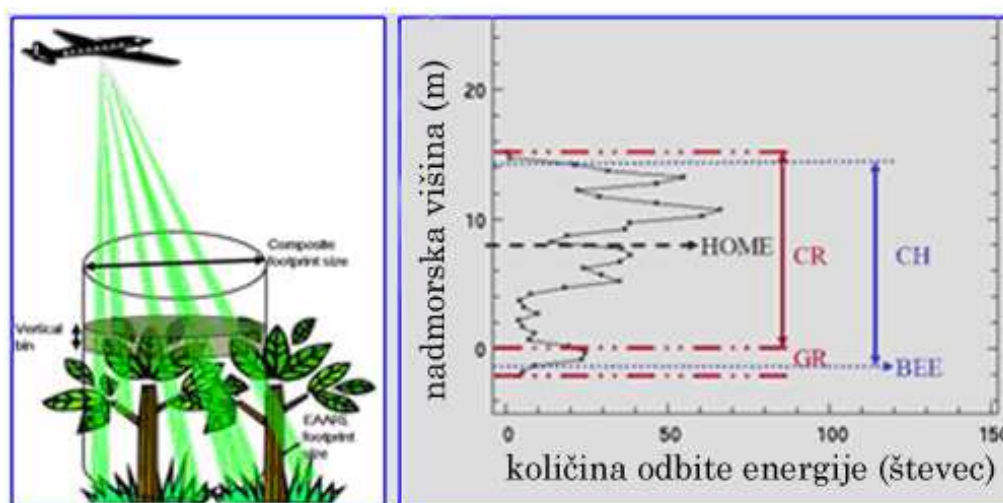
Prednosti uporabe zveznega sistema lahko povzamemo v (Hug, 2004; Wagner, 2004):

- možnost za bolj zanesljive in natančne meritve od diskretnih laserskih sistemov,
- možnost lokacije površinskih lukenj z natančnostjo boljšo od premera odtisa,
- možnost za razlikovanje neomejenega števila tarč pri vsaki posamezni meritvi,
- zaznava višine, oblike, gostote in vertikalne razširitve rastlinskega pokrova,
- zaznava več nivojev nizke vegetacije,
- zaznava naklona ter s prostim očesom vidnih grobosti terena,
- večji uporabnikov nadzor nad procesom interpretacije,
- povečana zanesljivost, natančnost ter ločljivost posnetih objektov.

Po drugi strani pa zvezna zaznava odziva poveča velikost podatkov za faktor 50 – 200 (Hug, 2004). S tem vzrokom zvezni odziv večkrat shranjujemo v obliki vsote številnih diskretnih odzivov. Za pretvorbo lahko uporabimo katerokoli standardno metodo zaznavanja pulza. Ker pa ima vsaka metoda svoje prednosti in slabosti in se v primeru kompleksne oblike odziva ter velikega šuma praviloma pojavljajo težave, je bila pred nedavnim testirana nova obetajoča metoda srednjega kvadrata razdalje (ASDF) (Wagner, 2007).

Vendar pa pridobitev posameznih pulznih odzivov na podlagi celotnega valovnega odziva ne pomeni zgolj zmanjšanja količine podatkov, temveč velikokrat predstavlja pomembno priložnost, da uporabnik uporabi tisto metodo zajema odbojev (ali celo kombinacij več metod), ki mu za določen namen najbolj ustreza. Tako lahko poleg boljših rezultatov pridobi tudi realnejšo sliko o kakovosti le-teh (Wagner, 2004).

Možen je tudi obratni princip, in sicer da na podlagi kombinacije več individualnih pulzov z malimi odtisi, definiramo sestavljeno obliko žarka velikega odtisa, kar je obetajoča metoda za opis vertikalne strukture rastlinskih pokrovov (slika 9).



Slika 9: Primer sestavljenega valovnega odtisa (Nayegandhi, 2006).
Fig. 9: Example of composite waveform (Nayegandhi, 2006).

3.5 Tehnične lastnosti merskega sistema ZLS

Najpomembnejše tehnične lastnosti, po katerih se lidarji med seboj ločijo, in ki določajo njihov namen oziroma zmogljivost, so naslednje:

- *Valovna dolžina laserja (λ)* – ponavadi v pasu med 800 nm in 1100 nm, kjer je odbojnost rastlinstva največja, nevarnost za človekov vid pa najmanjša. Glavna pomanjkljivost omenjenega dela spektra je znatna absorpcija v atmosferi. Za posebne raziskave se uporabljajo tudi druge valovne dolžine (665 nm in 775 nm hkrati za določanje vegetacije, 550 nm za opazovanje topografije vodnih površin, idr.).
- *Frekvenca laserskih pulzov* – navadno med 30 in 200 kHz – skupaj s kotom skeniranja ter višino in hitrostjo leta določa gostoto pulzov (na kvadratni meter).
- *Premer laserskega žarka* ali tudi odtis (footprint) je lahko od nekaj centimetrov do sto metrov, odvisno od višine leta. Premer žarka določa prostorsko ločljivost zabeleženih podatkov.
- *Moč laserja* določa največjo mogočo višino leta (praviloma velikostnega reda kilometra) in s tem širino snemalnega pasu (tipično od nekaj sto metrov do več kot kilometer).

V preglednici 2 so poleg omenjenih predstavljene še druge tehnične lastnosti, ki so tipične za

trenutno obstoječe sisteme ZLS (Briese, 2007).

Preglednica 2: Tipični parametri sistemov ZLS, ki so trenutno na voljo (Briese, 2007).

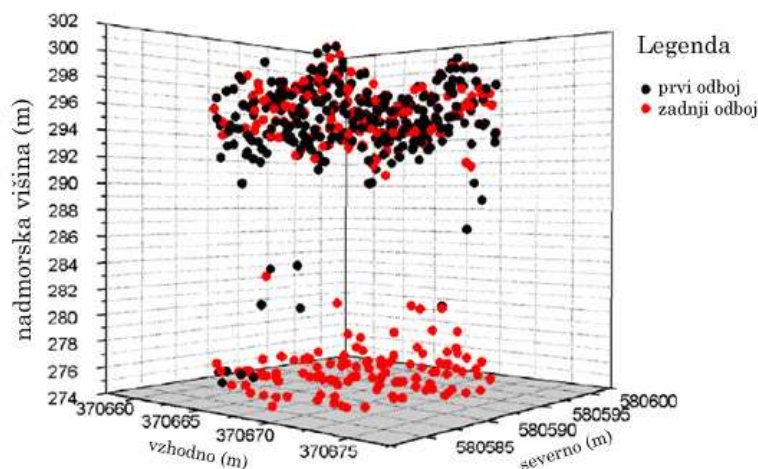
Table 2: Typical parameters of topical ALS systems (Briese, 2007).

SPECIFIKACIJA	TIPIČNA VREDNOST
Valovna dolžina laserja	0,6 μm – 1,5 μm
Trajanje pulza	5 – 15 ns
Divergenca laserskega žarka	0,2 – 1 mrad
Frekvenca laserskih pulzov	30 – 200 kHz
Kot snemanja	14° – 75°
Frekvenca skeniranja	25 – 650 Hz
Vzorec skeniranja	cik-cak, pararelni, eliptični, sinusni
Premer laserskega žarka	0,2 – 2 m
Število odzivov na pulz	2 – 8 ali celotni odziv
Zajem intenzitete	DA
Višina snemanja	200 – 3000 m
Frekvenca GPS	1 – 2 Hz
Frekvenca IMU	128 – 1000 Hz

Razvoj tehnologije merskega sistema ZLS je usmerjen v čim večjo fleksibilnost in prilagodljivost sistema različnim uporabam ter zahtevam naročnikov kot so zahtevana natančnost, konfiguracija terena, cenovne omejitve, vrsta objektov, ki jih bomo opazovali, zdravstveno - varnostne omejitve glede poškodb oči, itd. Glede na vse te zahteve je treba upoštevati zgoraj navedene tehnične parametre.

3.6 Obdelava podatkov

Po snemanju z lidarjem dobimo dve podatkovni zbirki, in sicer podatke o položaju sistema in orientaciji ter podatke o odbojih oziroma razdaljah. Iz obeh podatkov lahko izračunamo položaje točk odboja na površju. Ponavadi jim kot atribut pripišemo red odboja (prvi, drugi... zadnji) in če je mogoče tudi njegovo jakost. Končni rezultat je torej oblak točk, ki predstavljajo odboje na različnih predmetih (slika 10).



Slika 10: Oblak točk prvega (črne točke) in zadnjega odboja (rdeče točke) (Donoghue et al., 2007).
Fig. 10: Point cloud of first (black dots) and last (red dots) return signal (Donoghue et al., 2007).

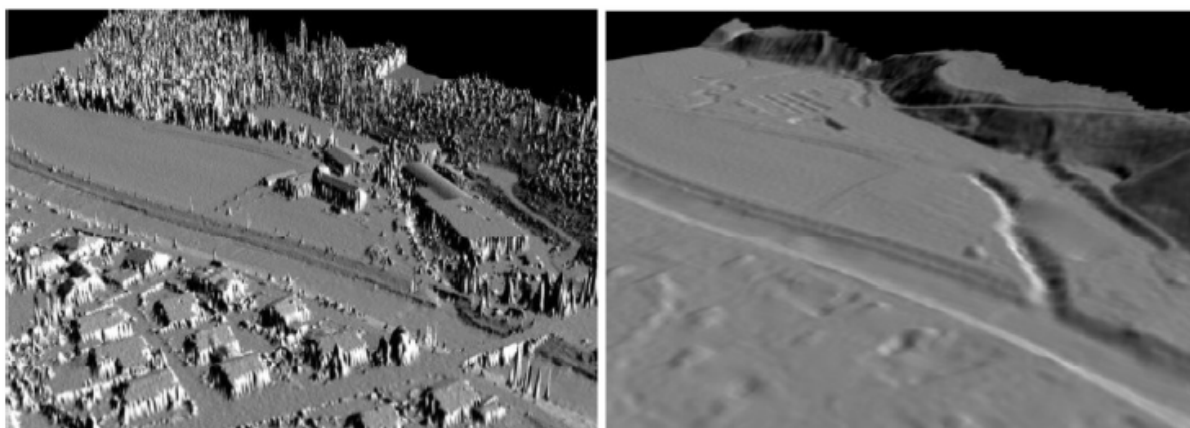
Oblak lidarskih točk je zapisan s tremi prostorskimi koordinatami in praviloma več atributi. Taka oblika zapisa pa ni najbolj primerna za analize, zato je treba lidarske podatke dodatno obdelati. Najpomembnejši koraki postopka obdelave lidarskih podatkov so: filtriranje, rastriranje, klasifikacija in modeliranje.

3.6.1 Filtriranje

Pri *filtriranju* skušamo izločiti vse neželene odboje. Lidar nam nudi podatke o višinah in intenzitetah. Ti dve vrsti podatkov praviloma obravnavamo ločeno, zato poznamo filtriranje višin ter filtriranje intenzitet.

Filtriranje višin

Oblak lidarskih odbojev prikazuje pulze, ki so se odbili na različnih predmetih. Pri tem gre lahko za odboje na zunanji ovojnici površja, to je na vrhovih vegetacije in stavb, s čimer dobimo tako imenovani digitalni model površja (digital surface model) (slika 11, levo). Do odboja pa lahko pride tudi znotraj predmetov, predvsem vegetacije ali vode, in na tleh. Talni odboji, če do njih seveda pride, podajajo obliko reliefa in omogočajo izdelavo digitalnega modela reliefa (digital elevation model) (slika 11, desno).



Slika 11: Levo – digitalni model površja, desno – digitalni model reliefa (Briese, 2007).

Fig. 11: Left – digital surface model, right – digital elevation model (Briese, 2007).

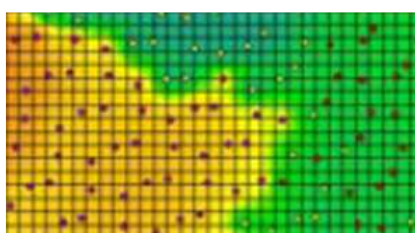
Za odstranjevanje »neželenih« točk – pri meritvah topografskih lastnosti površja so to vsi odboji, ki ne prihajajo od golih tal – uporabljamo različne algoritme, ki temeljijo na matematični morfologiji, iterativnem izločanju točk, segmentaciji ali modeliranju reliefa s celotnim oblakom. Filtriranje je eno izmed najbolj intenzivnih področij raziskav, saj še vedno ne obstaja univerzalna tehnika, ki bi bila primerna tako za urbane površine kot gozdove, tako za ravna kot za strma območja. Kakovost končnih rezultatov je namreč močno odvisna od načina obdelave in zato operaterji lidarskega snemanja poleg nekaterih izdelkov, na primer modelov površja in površin, praviloma posredujejo uporabnikom tudi »surove« podatke. Rezultat filtriranja je digitalni model višin ali površja, zapisan v vektorski, na primer v obliki mreže TIN, ali rastrski obliki, to je v matriki z višino (in jakostjo odboja) kot atributom. Povedati je treba, da posnete točke ne zajemajo celotne površine tal, zato je pri trirazsežnem prikazu površja potrebno uporabiti tudi ustrezno metodo interpolacije.

Filtriranje intenzitet

Vrednosti intenzitet praviloma prikažemo in obdelujemo v obliki rastrske podobe (podpoglavje 4.6.2). Podatki vsebujejo tudi šum, ki ga skušamo zmanjšati z različnimi filtri, tj. računskimi operacijami, ki poudarijo ali zakrijejo elemente z določeno frekvenco na podobi (Oštir, 2006). Več o filtriranju je zapisano v podpoglavju 6.3.

3.6.2 Rastriranje

Kot že vemo, vsebujejo skenirane točke poleg informacije o položaju 2D tudi informacije o višini ter intenziteti. Večino operacij nad višinami lahko izvajamo (oz. je celo priporočljivo) s prvotnimi, vektorskimi podatki. Drugače je z intenziteto, ki nam do sedaj v prvi vrsti še vedno služi za vizualizacijo zajetih točk. Vizualni prikaz pa je veliko primernejši v rastrski obliki, zato podatke o intenziteti praviloma rastriramo, tj. intenzitete prikažemo v obliki mreže, kjer vsaka celica v mreži vsebuje svojo vrednost intenzitete (slika 12).



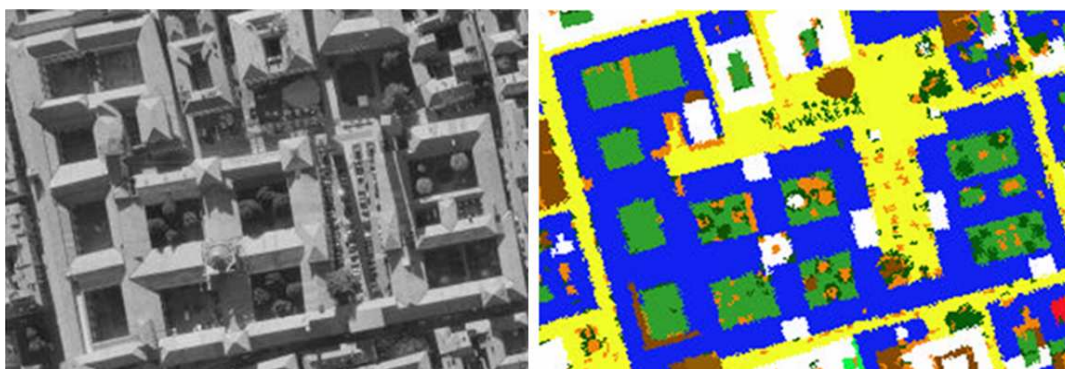
Slika 12: Interpolacija točk v raster.
Fig. 12: Interpolation of points to raster.

Poleg vizualizacije so rastrski podatki primernejši za različne namene, kot je npr. prekrivanje z drugimi rastrskimi podobami, razne analize, klasifikacije, druge uporabe v sistemih GIS...

Zavedati se moramo, da izbrana tehnika rastriranja pomembno vpliva na končne vrednosti intenzitete, zato za različne namene uporabe rastrske podobe le-to izdelamo na osnovi ustrezne metode interpolacije ter prostorske ločljivosti. Za podrobne analize moramo pred interpolacijo v raster podatke tudi kalibrirati.

3.6.3 Klasifikacija

Pomemben korak pri interpretaciji lidarskih podatkov je *klasifikacija*, pri kateri prepoznamo določene geometrijske strukture ali objekte, na primer zgradbe, ceste, drevesa in podobno (slika 13). Klasifikacija rastrskih podatkov praviloma poteka z enakimi postopki kot obdelava drugih podob daljinskega zaznavanja, upoštevati moramo le veliko ločljivost lidarskih podatkov. Zavedati pa se moramo, da klasične metode klasifikacije nudijo v primeru lidarskih podatkov manj zanesljive rezultate, zato je bila v novejšem času razvita metoda klasifikacije, ki temelji na geometrijskih strukturah (Tóvári, 2004).



Slika 13: Levo – ortofoto, desno – rezultat klasifikacije na osnovi lidarskih podatkov (Nardinocchi, 2003).
Fig. 13: Left – orthophoto, right – classification of lidar data (Nardinocchi, 2003).

3.6.4 Modeliranje

Zadnji korak obdelave je *modeliranje* oziroma posplošenje (generalizacija) klasificiranih predmetov. Z modeliranjem, na primer, dobimo model stavb ali navpične profile vegetacijskega pokrova (slika 14).



Slika 14: Model stavb (levo) in model vegetacijskega pokrova (desno) (Andersen, 2007).
Fig. 14: Building model (left) and vegetation model (right) (Andersen, 2007).

3.7 Natančnost trirazsežnih koordinat laserskih točk

Kot je že znano, z ZLS trirazsežni položaj tarče določimo na podlagi poznane lokacije žarka, poznane smeri žarka ter razdalje senzor – tarča. Kljub na videz enostavnemu postopku, pa je natančnost lokacije (tako položajne, kakor tudi višinske) zapletena funkcija mnogih faktorjev, ki jih lahko združimo v sledeče skupine (Ahokas, 2003):

- napake zaradi sistema ZLS,
- napake zaradi parametrov zajema,
- napake zaradi obdelave podatkov,
- napake zaradi značilnosti tarče.

3.7.1 Napake zaradi sistema ZLS

Natančnost položaja senzorja. Odvisna je od GPS strojne opreme, konstelacije GPS satelitov v času merjenja, razporeditve, oddaljenosti in števila uporabljenih referenčnih postaj ter načina in kakovosti naknadne obdelave diferencialnega GPS.

Natančnost določitve smeri laserskega žarka. Odvisna je od kakovosti INS, frekvence meritev INS, metode naknadne obdelave in integracije z GPS podatki.

Natančnost merjene razdalje. Pri pulznem razdaljemeru je natančnost razdalje v glavnem odvisna od zmožnosti oddajnika in sprejemnika, da prepoznata identično točko na laserskem pulzu – le tako lahko pravilno izmerimo časovni interval. Ta zmožnost je odvisna od velikosti šuma, moči odbitega signala, občutljivosti detektorja ter frekvence, dolžine in oblike pulzov. Odvisna je tudi od natančnosti števca časovnih intervalov, preteklih med oddajo in sprejemom pulza. Merjena razdalja je poleg tega odvisna tudi od metode zaznavanja pulzov (Wagner et al., 2004).

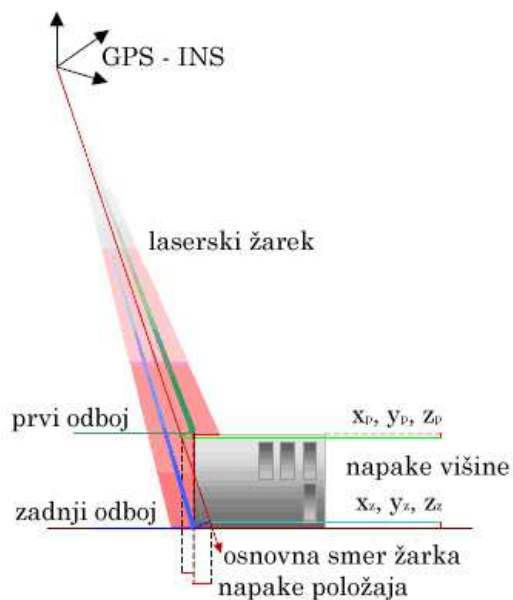
Natančnost časovne sinhronizacije. Za pravilno določitev trirazsežnih koordinat morajo biti meritve položaja (GPS), orientacije (INS) in razdalje (laser) sinhronizirane. Če obstaja časovni zamik med temi meritvami, a ga ne poznamo, lahko povzroči napake, ki se v času spreminjajo.

3.7.2 Napake zaradi parametrov zajema

V to skupino štejemo napake lokacije tarče, nastale zaradi parametrov zajema, kot so: gostota točk, višina snemanja, kot skeniranja (Ahokas, 2003), divergenca laserskega žarka...

Divergenca laserskega žarka. Divergenca laserskega žarka skupaj z višino ter smerjo snemanja določa velikost in obliko laserskega odtisa. V območju odtisa se lahko nahaja več tarč, ki imajo različen trirazsežni položaj (slika 15). Princip določanja lokacije tarče deluje na merjenju razdalje od senzorja do točke na osnovni smeri žarka ("beam nominal direction") (Kukko, 2007). To pomeni, da bodo imele vse tarče, ki ležijo znotraj enega odtisa, takšen

trirazsežni položaj, kot da bi ležale na osnovni smeri žarka. Posledica je tako napaka položaja kakor tudi napaka višine tarče. Sklepamo lahko, da natančnost položaja tarče ne more biti boljša od polovice premera laserskega odtisa (to je 0,05 – 0,5 m).



Slika 15: Odboji znotraj enega odtisa (Kukko, 2007).
Fig. 15: Multiple echoes (Kukko, 2007).

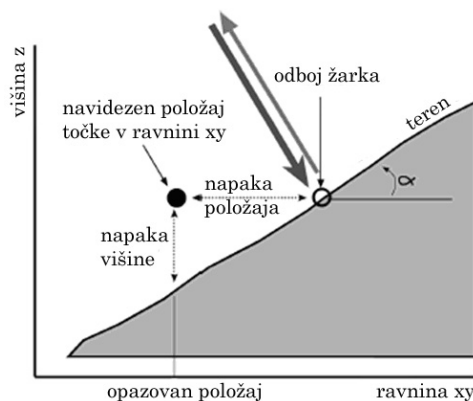
3.7.3 Napake zaradi obdelave podatkov

Z vidika obdelave lahko na kakovost "osnovnih koordinat" vplivamo z načinom določitve položaja sensorja ter natančnostjo transformacije iz WGS84 v lokalni koordinatni sistem (vključuje popravke geoidne ondulacije, ki imajo lahko velik vpliv glede na potencialno natančnost ZLS). Ko te koordinate dobimo, bomo z vsako nadaljnjo obdelavo podatkov (interpolacijo, filtriranjem, segmentacijo, glajenjem, uravnavanjem podatkov med pasovi...) vplivali na kakovost rezultatov. Primer filtriranja je npr. napaka DMR, ker točke, za katere smo predpostavili, da definirajo tla, dejansko ne predstavljajo tal, temveč npr. vrh trave ali druge nizke vegetacije.

3.7.4 Napake zaradi značilnosti tarče

Vedno več avtorjev v svojih člankih poudarja, da na kakovost lokacije tarč vplivajo tudi značilnosti tarče, kot so naklon terena, gostota rastlinskega pokrova, vrsta materiala tarče (Hodgson, 2004) in usmerjenost tarče glede na smer žarka (Kukko, 2007).

Naklon terena. Napaka zaradi naklona terena je posledica divergence laserskega žarka, katere vpliv na natančnost je opisan zgoraj. Višinska in položajna napaka sta namreč medsebojno odvisni in velja $\Delta Z = \Delta XY \cdot \tan \alpha$, pri čemer je α lokalni nagib terena (slika 16). Napaka položaja torej pomeni tudi napako višine.



Slika 16: Napaka višine zaradi napake položaja (Hodgson, 2004).
Fig. 16: Height error because of position error (Hodgson, 2004).

Različni viri napak različno vplivajo na rezultate meritev in nadalje na izračunane trirazsežne koordinate. Rečemo lahko, da je končna napaka koordinat laserskih točk dana kot kvadratni koren vsote kvadratov napak posameznih vplivov. Na podlagi analiz vseh obstoječih sistemov za ZLS je Briese (2007) prišel do naslednjih rezultatov natančnosti lokacije:

- natančnost višine: 0,05 – 0,20 m,
- natančnost položaja: 0,1 – 1 m.

Pri ZLS je torej načeloma natančnost višine precej boljša od natančnosti položaja. Vendar pa so rezultati dobljeni v idealnih pogojih. Pri realnih primerih, sploh v Sloveniji, ki je terensko razgibana ter gosto poraščena, lahko mnogi zgoraj naštetih faktorji to dejstvo hitro spremenijo. Zavedanje in poznavanje motečih faktorjev, ki slabšajo kakovost meritev, omogoča njihovo odpravo ali vsaj zmanjšanje in upoštevanje kakovosti pri nadaljnjih analizah nad podatki. V veliki meri je možno zminimizirati konstantni del napak (natančnost GPS, INS...), uporabiti je možno tudi najustreznejše parametre sistema, medtem ko je variabilni del (topografija, pokritost terena...) precej zahtevnejši. Podatke lahko delno izboljšujemo z metodami, kot je npr. normalizacija dolžine laserskega žarka (Pfeifer, 2007), vendar za celotno odpravo vseh

vplivov do danes še ni bila odkrita nobena univerzalna metoda.

3.8 Uporaba ZLS v praksi

Zaradi sposobnosti laserskega žarka, da prodre vegetacijo, je bil prvoten cilj razvoja laserskega skeniranja topografsko kartiranje terena poraščenega z gozdom. Druga predvidena uporaba, ki prav tako izhaja iz fizikalnih lastnosti LS, je kartiranje območij z nezadostno teksturo in majhnimi kontrasti. Tekom časa se je uporabnost metode ZLS razširila precej bolj, kot je bila prvotno zasnovana in lahko za določeno uporabo predstavlja dopolnjujočo ali konkurenčno metodo ostalim obstoječim tehnikam zajema. Današnji razvoj tehnike ZLS je usmerjen v združevanje z drugimi »bolj tradicionalnimi« sensorji kot so: standardni stereo fotoaparati, digitalni fotoaparati, multispektralni skener ali termalni fotoaparati. Kombinacija več dopolnilnih podatkovnih nizov je obetajoča za raziskavo prepoznavnosti objektov na površju, npr. za izločevanje zgradb, trirazsežno modeliranje mest... Še vedno pa ZLS na nekaterih področjih kot sta gozdarstvo in obalno inženirstvo ponuja prednosti, ki niso dosegljive z nobeno drugo tehnologijo. Najbolj aktivna področja uporabe ZLS, ki so podrobno opisana in predstavljena na internetnih straneh ponudnikov ZLS (Airbornelasermapping, AeroMap, Helica, TopoSys), so:

- izdelava DMR za različne izdelke, ki se jih uporablja v GIS in kartografiji,
- gozdarstvo (digitalni model krošenj kot razlika višin DMP in DMR, horizontalne in vertikalne informacije o vegetaciji, informacije o terenu in topografiji pod drevesnimi krošnjami, informacije o višini in gostoti dreves, občutno izboljšana spektralna klasifikacija),
- obalno inženirstvo (ZLS omogoča zajem slabo kontrastnih obalnih območij kot so peščene plaže, kar je s fotogrametrijo težko oz. nemogoče. Nadalje omogoča neprestano in rutinirano skeniranje hitro spreminjajočega se obalnega okolja in s tem neprekinjeno posodabljanje podatkov brez pretiranih stroškov),
- kartiranje koridorjev (hitro in natančno kartiranje linearnih koridorjev nadzemne infrastrukture, kot so energetske vodi, plinovodne cevi, avtoceste itd.),
- kartiranje poplavnih območij (na osnovi lidarskega DMR in DMV se glede na pričakovan porast naravne vode zaradi dežja ali topljenja snega izvajajo simulacije poplav),
- modeliranje mest (ZLS omogoča natančne meritve višin urbanih objektov in določitev

položaja oboda stavb na površju),

- *odziv na naravno nesrečo in ocenitev škode* (ZLS v kratkem času zagotavlja natančne podatke, ki so lahko hitro in neposredno vključeni v urejanje posledic katastrofe, pomagajo oceniti nastalo škodo in so podlaga planiranju po naravni nesreči),

- *zaščita naravne dediščine – mokrišča in druga težko dostopna območja,*

- *arheologija* (hitri pregled večjih za arheologijo pomembnih območij in hkrati pridobitev natančnih podatkov. Razločijo se najmanjše spremembe višin in strukture - tudi pod vegetacijo, ki jih na tleh ne moremo zaznati).

Z razvojem tehnologije ZLS in praktičnim obdelovanjem lidarskih podatkov s strani končnih uporabnikov se njena uporaba nenehno spreminja in širi na nova področja. Naj omenim le še merjenje odlagališč industrijskih in strupenih odpadkov (težje dostopna), kamnolomov, dnevnih kopov in drugih območij v gradnji (potrebna visoka natančnost), območij pokritih s snegom in ledom (minimalna tekstura in kontrastnost površja)... Raziskave novih uporab so usmerjene predvsem v področja, kjer bi tehnologija omogočila zmanjšanje stroškov meritev in bi imeli lidarski izdelki večjo dodano vrednost glede na tradicionalne metode.

4 INTENZITETA ODBOJA LASERSKEGA ŽARKA

Glavna pozornost pri preučevanju meritev zračnega laserskega skeniranja je namenjena podatkom položaja in višine skeniranega površja. Poleg teh trirazsežnih informacij (koordinat) pa novejši laserski sprejemniki simultano beležijo še informacijo o intenziteti odbitega laserskega žarka za vsak odboj valovanja. Z meritvami intenzitete dobimo poleg natančne morfologije, ki jo poda trirazsežen oblak lidarskih točk, še semantične podatke o skeniranem območju. Intenziteta se dejansko redko uporablja in predstavlja stranski produkt tehnike ZLS.

Poimenovanje te meritve se v različnih virih razlikuje. V angleškem jeziku zasledimo izraze kot so npr. radiance, backscattering amplitude, intensity of the reflectance, ground reflectance. V nalogi govorim o intenziteti odbitega laserskega žarka (krajše: intenziteti).

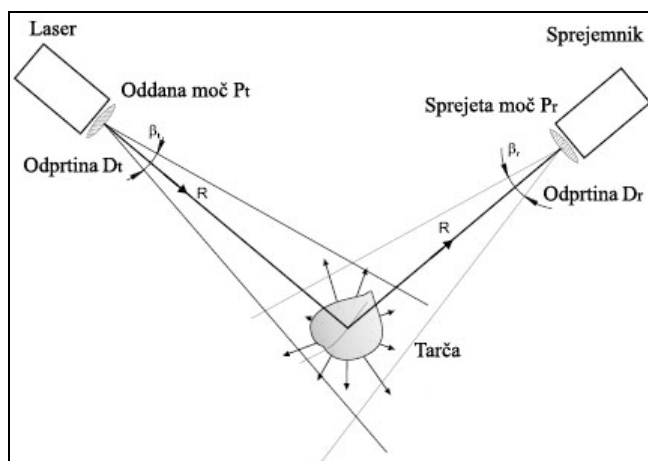
4.1 Opredelitev intenzitete odbitega laserskega žarka

Izraz intenziteta uporabljamo na mnogih področjih (fizika, fotometrija, radiometrija, matematika...), vendar se njen pomen lahko močno razlikuje. V nalogi se uporablja v kombinaciji z laserskim žarkom in v splošnem (Song et al., 2002) predstavlja jakost odbitega signala oziroma *razmerje med jakostjo sprejete (P_r) svetlobe na detektorju LS in jakosti iz laserja LS oddane (P_t) svetlobe*. Ta definicija sicer fizikalno ni točna, jo je pa glede na nekatera dejstva smiselno uporabiti. Intenziteta je namreč relativna količina² in ne nujno linearna meritev, informacije o načinu beleženja intenzitete v posameznem lidarskem sistemu so težje dostopne, LS ima monostatično konstrukcijo in s tem enako površino oddajnika in sprejemnika, vrednosti intenzitete pa so brez merske enote. Intenziteta registriranega odboja je namreč izražena z digitalno številko (Coren in Sterzai, 2005) in zavzema vrednosti od 0 (šibak odboj) do 8160 (zelo močan odboj).

² Velja za meritve iste misije ZLS-ja (višina leta, merski sistem).

4.2 Enačba radarja

S tako imenovano »enačbo radarja«³ lahko izračunamo jakost oz. moč prejetega signala.



Slika 17: Skica⁴ geometrije zajema lidarskih točk (Wagner, 2005).
Fig. 17: Sketch of geometry of lidar data acquisition (Wagner, 2005).

Laser vso svojo moč P_t (označena tudi s P_e) enakomerno oddaja skozi oddajno optiko s premerom odprtine D_t v majhnem kotu β in tako osvetli majhen (individualen) del površine A_{laser} (slika 17). Če upoštevamo izgubo energije laserskega žarka pri potovanju skozi atmosfero in razmerje med velikostjo odtisa žarka na tleh A_{laser} (odvisna od vpadnega kota) ter velikostjo tarče⁵ dA , dobimo jakost prestreženega signala na tarči. Nekaj signala se z absorpcijo na tarči izgubi (razen če je tarča popolni prevodnik oz. izolator), preostali del pa difuzno odbije. Jakost od tarče odbitega oz. izsevanega signala je odvisna od *koeficienta odbojnosti* ρ tarče, le-ta pa je določen z materialom tarče. Vzorec odbitega signala je lahko zelo zapleten. Če se signal odbije enakomerno porazdeljen v stožcu s prostorskim kotom Ω in se ta kot na razdalji R (tarča - senzor) prekriva z vidnim poljem sprejemnika, ki ima premer odprtine D_r , je *moč prejetega signala* dana z *enačbo radarja*. Ob upoštevanju vseh omenjenih faktorjev in dodatno še ob upoštevanju izgub signala v sistemu LS (η_{sis}) ter v atmosferi (η_{atm}) zapišemo končno obliko *enačbe moči sprejetega signala* (Wagner, 2005):

³ Ker ZLS uporablja merski princip prvič predstavljen pri radarskem daljinskem zaznavanju, je tudi osnovna enačba za izračun moči signala poimenovana po tej tehniki (Jelalian, 1992).

⁴ Oddajnik in sprejemnik sta zaradi večje preglednosti geometrije zajema prikazana ločeno. Sicer ima LS monostatično konstrukcijo.

⁵ Velikost tarče je efektivna površina vpada in odboja laserskega žarka na poljubnem objektu, ki leži na poti laserskega žarka proti tlam.

$$P_r = \left(\frac{P_t \cdot D_r^2}{4\pi \cdot R^4 \cdot \beta^2} \right) \cdot \left(\frac{4\pi}{\Omega} \cdot \rho \cdot dA \right) \cdot \eta_{sis} \cdot \eta_{atm} \quad (2)$$

Kjer so:

P_r ... jakost sprejetega signala (watt);

P_t ... jakost oddanega signala (watt);

D_r ... premer odprtine sprejemne optike (meter);

R ... razdalja tarča-senzor (meter);

β ... divergenca laserskega žarka (radian);

η_{sis} ... faktor prenosa žarka v sistemu;

η_{atm} ... faktor prenosa žarka v atmosferi;

Ω ... prostorski kot;

dA ... velikost tarče (kvadratni meter);

ρ ... koeficient odbojnosti tarče.

Faktorji v prvem oklepaju se nanašajo na laserski skener in faktorji v drugem oklepaju na tarčo. Slednje je zelo težko individualno izmeriti, zato jih združimo v en faktor t.i. *prečni prerez odboja laserskega žarka* (angl. backscattering cross-section), ki je podrobneje predstavljen v poglavju 4.4.

V primeru, ko pade žarek vertikalno na površino tarče ($\zeta = 90^\circ$) in se od nje odbije homogeno ($dA = A_{laser}$), je velikost tarče določena z enačbo:

$$dA = A_{laser} = \pi \cdot \frac{R^2 \cdot \beta^2}{4} \quad (3)$$

Če upoštevamo še, da je odboj laserskega žarka na večini tarč difuzen ($\Omega = \pi$), se moč signala na sprejemniku LS izračuna po enačbi:

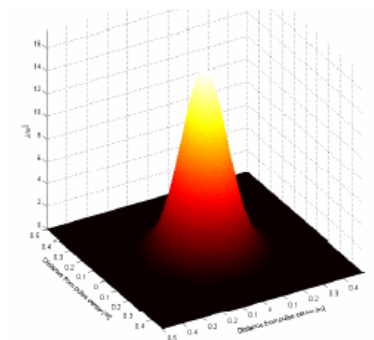
$$P_r = \left(\frac{P_t \cdot D_r^2}{4 \cdot R^2} \right) \cdot \eta_{sis} \cdot \eta_{atm} \cdot \rho \quad (4)$$

Iz enačbe (4) je razvidno, da je jakost sprejetega signala (odboja) obratno sorazmerna s kvadratom merjene razdalje (R) in ni več odvisna od divergence laserskega žarka (β).

Če se vpadni kot (ζ) laserskega žarka na tarčo razlikuje od 90° , se spremeni izraz za izračun velikosti odtisa laserskega žarka in je po Hug in Wehru (1997):

$$P_r = \left(\frac{P_t \cdot D_r^2 \cdot \cos \zeta}{4 \cdot R^2} \right) \cdot \eta_{sis} \cdot \tau_{atm}^2 \cdot \pi \cdot \rho \quad (5)$$

Omeniti moramo, da enačba radarja predpostavlja enakomerno razporeditev intenzitete znotraj laserskega odtisa, čemur pa ni tako.



Slika 18: Vzorec intenzitete pulza (Pfeifer, 2007).

Fig. 18: Pulse intensity pattern (Pfeifer, 2007).

Za energijo pulza se smatra, da ima okroglo simetrično Gaussovo porazdelitev (slika 18). Premer odtisa je določen s točkami, kjer energija pade na $1/e^2$ (ali $1/e$, odvisno od definicije) maksimuma energije (Pfeifer, 2007). Nekateri avtorji (Abshire, 2005; Jutzi in Stilla, 2006) so omenjali eliptične ali še bolj nepravilne porazdelitve energije znotraj odtisa. Dejstvo je, da se intenziteta z oddaljevanjem od centra odtisa zmanjšuje (Kukko, 2007).

4.3 Vrednosti merjene intenzitete

Vrednost merjene intenzitete odbitega laserskega žarka je zapletena funkcija več *spremenljivk*, kot so:

- moč oddanega laserskega žarka (P_t);
- razdalja senzor-tarča-senzor ($2R$), ki je odvisna od višine terena in višine leta nosilca sistema;
- nadmorska višina območja zajema – vpliva na karakteristike materiala (npr. spreminjanje prisotnost vlage v zemlji glede na nadmorsko višino);

- kot gledanja senzorja ZLS (angl. viewing angle);
- vpadni kot (ζ) laserskega žarka na tarčo;
- vrsta odboja (difuzni, zrcalni) laserskega žarka na tarči;
- koeficient odbojnosti tarče (angl. reflectivity);
- velikost tarče glede na velikost odtisa laserskega žarka na tleh;
- atmosferski pogoji – čisti ali megleni zrak (glede na količino vodne pare in aerosolov) vplivata na absorpcijo in lom valovanja;
- sevanje iz okolja, ki ima valovno dolžino blizu laserski svetlobi (sončna svetloba odbita od tal in od delcev v ozračju, termalno sevanje površja Zemlje);
- moč, ki pride do tarče (glede na to ali gre za prvi odboj, drugi odboj...),
- oddaljenost tarče od centra odtisa.

Zaradi teh vplivov so meritve intenzitete popačene (angl. noisy) in jih ni mogoče neposredno uporabiti za identificiranje oz. določanje tipa tarče (vrste materiala). Potrebne so poenostavitve, ki se jih nato preverja z različnimi eksperimentalnimi analizami podatkov.

Po definiciji intenzitete, da jo določa razmerje med močjo sprejete P_r in oddane P_t svetlobe, lahko za primer, ko je odboj difuzen in homogen, ter vpad žarka na tarčo pravokoten, z uporabo enačbe (4) izračunamo merjeno intenziteto.

Ker so meritve intenzitete relativne, lahko zanemarimo vplive iz enačbe (4), ki so konstantni za isti merski sistem in za enake atmosferske pogoje ($D_r, \eta_{atm}, \eta_{sis}$). Enačbo (4) zapišemo:

$$I_m \approx \frac{P_r}{P_t} = \frac{\rho}{R^2} \cdot konst \quad (6)$$

Kjer je: $konst = \frac{D_r^2}{4} \cdot \eta_{sis} \cdot \eta_{atm}$ konstanta.

Merjene vrednosti intenzitete so tako odvisne od materiala tarče (vrednosti koeficienta odbojnosti ρ) in se manjšajo s kvadratom razdalje R . Iz enačbe (6) je razvidno, da bo imela ista površina ($\rho = konst.$), osvetljena in opazovana z istim aktivnim senzorjem, vendar na različnih razdaljah (R), različne vrednosti merjene intenzitete I_m . Ker se vpadni kot ζ

večinoma le malo razlikuje od 90° , je njegov vpliv na merjeno intenziteto majhen. Upoštevamo ga le v primeru zahtev po visoki natančnosti merjenja odbojnosti. Tedaj je (iz enačbe (5)):

$$I_m \approx \frac{P_r}{P_t} = \frac{\rho \cdot \cos \xi}{R^2} \cdot konst \quad (7)^6$$

Kjer je: $konst = \frac{D_r^2}{4} \cdot \eta_{sis} \cdot \tau_{atm}^2 \cdot \pi \dots$ konstanta.

Vrednost intenzitete je manjša, čim večji je vpadni kot ξ ter večja kot je razdalja R . Vrednosti merjene intenzitete po enačbah (6) in (7) tako niso odvisne od (zgoraj zapisanih) spremenljivk kot so moč oddanega žarka, atmosferski pogoji, sevanje iz okolja, kot gledanja sensorja ZLS (jih ne upoštevamo pri določanju funkcijske odvisnosti intenzitete), ampak so v največji meri odvisne od spremenljivk:

- razdalje R in
- vrste tarče (glede na odbojnost, usmerjenost, velikost).

Razdalja R je merjena količina in jo poznamo za vsak registriran odboj laserskega žarka. Bolj zapleten je vpliv vrste tarče, ki združuje spremenljivke zapisane v drugem oklepaju enačbe (2), in se imenuje *prečni prerez odboja laserskega žarka* σ (angl. backscattering cross-section) (Wagner, 2005).

4.4 Prečni prerez odbitega laserskega žarka

Prečni prerez odbitega laserskega žarka je odvisen od *koeficienta odbojnosti* (dielektične lastnosti) tarče, nagnjenosti oz. *usmerjenosti tarče* glede na vpadni in proti sprejemniku odbiti laserski žarek ter *velikosti tarče* glede na velikost odtisa laserskega žarka na tleh. Kot nakazuje že samo ime, nam prečni prerez odboja poda efektivno površino interakcije laserskega žarka s tarčo, pri čemer sta upoštevani usmerjenost in odbojnost tarče (Jelalian, 1992, cit. po Wagner, 2005). Razumevanje spremenljivk, ki določajo prečni prerez odboja in

⁶ Z isto enačbo je opisan model difuznega odboja v (Hasegawa, 2006).

so pomembne pri računanju jakosti sprejetega valovanja, je poglavitnega pomena za analizo vrednosti intenzitete ter za ugotavljanje vplivov na meritve intenzitete.

Vpliv usmerjenosti tarče na merjeno intenziteto je odvisen od tipa odboja laserske svetlobe (difuzen, zrcalen, ni odboja) na tej tarči. Ker je valovna dolžina laserske svetlobe ($\lambda = 1 \mu\text{m}$) majhna glede na hrapavost večine tarč pri ZLS, velja Lambertov odbojni zakon: žarek se odbije difuzno, na vse strani enakomerno in velja $\Omega = \pi$ (Lambertova tarča) (Wagner, 2005). Tako je vpliv usmerjenosti tarče glede na smer odboja žarka na intenziteto zanemarljiv. Redke izjeme, kjer pride do zrcalnega odboja (površine obravnavamo kot gladke) in kjer moramo pri analizi intenzitete upoštevati smer odboja žarka, so območja pokrita z ledom in snegom (Lutz et al., 2003).

Čeprav kot med normalo (difuzne) tarče in smerjo sprejemnika (kot odboja laserskega žarka) nima vpliva na jakost sprejetega signala (P_r), pa je le-ta odvisna od kota med normalo (difuzne) tarče in smerjo vira svetlobe, torej od t.i. *vpadnega kota*. Večji kot je vpadni kot, večja je osvetljena površina na tleh in s tem manjša gostota energije na tarči, ki se difuzno odbije na vse strani. Zato je manjši tudi tisti del odbite svetlobe, ki se zazna v sprejemniku LS. Izračun vpadnega kota je v realnih primerih (npr. listi drevesa, skalnato gorsko pobočje) zapleten. V enačbi po Lutz et al. (2003) potrebujemo podatke o orientaciji LS sistema, ki poda smer laserskega žarka, in digitalni model višin, s katerim je določen nagib in usmerjenost tarče. Zadnje raziskave so empirično prikazale, da radiometrija intenzitete odbitega laserskega žarka ni spremenjena, če je kot skeniranja majhen (Ahokas, 2003, Coren, 2005 in Morsdorf, 2006).

Vpliv velikosti tarče glede na velikost odtisa laserskega žarka na tleh je Wagner (2005) opisal za štiri primere tarč: majhne tarče (npr. list na drevesu), linearne tarče (npr. žica daljnovoda), razprostrte tarče (npr. cesta) in prostorninske tarče (npr. krošnja drevesa). Če predpostavimo, da tarča prestreže celoten žarek z divergenco (β), je njena velikost kar enaka velikosti odtisa žarka. Velikost razprostrte tarče vpliva na merjeno intenziteto preko spremenljivke vpadnega kota (ζ) (glej enačbo (7)).

Koeficient odbojnosti (ρ) za tarče (oz. objekte) z difuznim odbojem opišemo z razmerjem

med odbito in sprejeto energijo na tarči. Njegova vrednost se spreminja glede na uporabljeno svetlobo in lastnosti materiala tarče. Tipične vrednosti koeficientov odbojnosti za različne materiale in za valovne dolžine, ki se največkrat uporabljajo v komercialnih LS, so na voljo na spletnih straneh, npr. USGS. Spektralne lastnosti teh materialov so bile določene v laboratoriju s spektrometrom, kar pomeni, da jih v svojih analizah ne smemo uporabiti brez »razmisleka«. Upoštevati moramo valovno dolžino, ki je bila uporabljena v laboratoriju, vlažnost površja (suha tla lahko imajo precej manjši koeficient odbojnosti kakor mokra (Kaasalainen et al., 2007)), zaporedno število odboja (v primeru, da je isti predmet zaznan enkrat s prvim odbojem, drugič pa z drugim odbojem, ker je bil prvi odboj odbit od vegetacije nad tem objektom, bo imel drugi odboj precej manjšo intenziteto (Göpfert in Heipke, 2006)), v primeru vegetacije moramo upoštevati njeno gostoto, upoštevati moramo dejstvo, da je laboratorij brez vpliva atmosfere idr. Vpliv odbojnosti tarče ($\rho_{tarča}$) na merjeno intenziteto je že po definiciji intenzitete (glej enačbo (6)) največji in najpomembnejši.

4.5 Podoba intenzitete podatkov ZLS



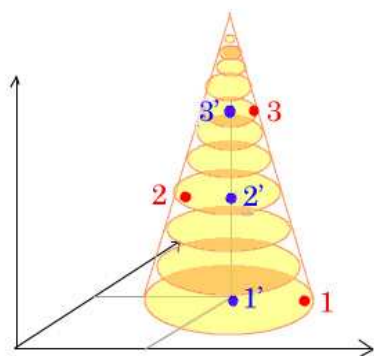
Slika 19: Podoba intenzitete.
Fig. 19: The intensity image.

Podoba intenzitete je rastrski prikaz vrednosti izmerjene intenzitete (vsak piksel vsebuje svojo vrednost intenzitete). Takšna oblika prikaza je primerna za vizualizacijo intenzitete, ki je osnovna vrsta uporabe tega podatka. Podoba je narejena z barvnim kodiranjem (običajno sivimi toni) prostorsko pravih lidarskih podatkov in je tako že georeferencirana in ortorektificirana⁷, na njej ni senc (kot so na ortofotu) in ima pravo merilo (slika 19). Za razliko od običajnih pankromatskih

podob (npr. ortofoto), ki zajemajo vse valovne dolžine vidnega spektra, zajema podoba intenzitete ZLS samo eno valovno dolžino. To je običajno slabost, na nekaterih področjih uporabe pa tudi prednost. Kljub sicer zelo ozki spektralni ločljivosti je običajno uporabljena valovna dolžina (tipično okoli 1 μm) le malo večja od valovnih dolžin vidnega spektra, zato je podoba intenzitete odbitih laserskih žarkov precej podobna naravnemu dojemanju odbite

⁷ Vsaka točka ima določen položaj (X, Y, Z), relativno glede na koordinatno mrežo.

vidne svetlobe. Glede na gostoto posnetih točk lahko tako na površju jasno ločimo nekatere pojave, kot so ceste, poti, stavbe, drevesa in različna raba tal.



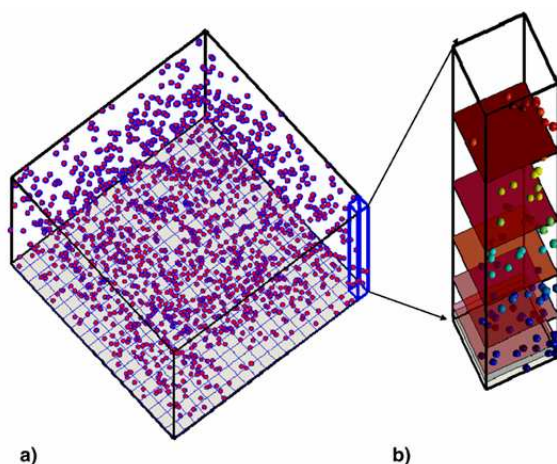
Slika 20: Vpliv divergence žarka na lokacijo tarč.
Fig. 20: Impact of divergence on target location.

Kot sem omenila že v poglavju 3, imajo vse tarče, ki ležijo znotraj enega odtisa, takšen trirazsežen položaj, kot da bi ležale na osnovni smeri žarka (v središču odtisa). Primer je prikazan na sliki 20, kjer imajo točke 1, 2, 3 takšen položaj, kot da bi ležale na lokaciji 1', 2' in 3'. Napaka položaja je zato v velikosti polmera odtisa.

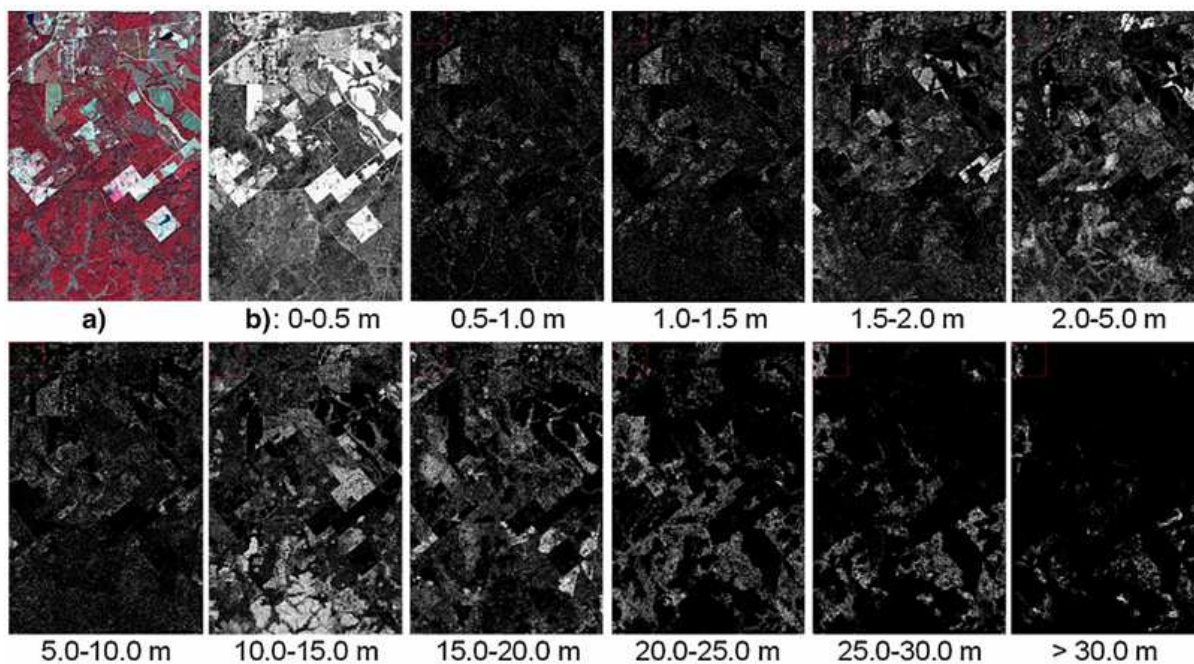
Običajno pulzni lidarji beležijo intenziteto vsakega odziva znotraj enega pulza. To pomeni, da lahko imamo na eni dvorazsežni lokaciji več vrednosti intenzitet, odvisno od števila odzivov. Ta je lahko en sam (tarča leži na območju celotnega laserskega odtisa), običajno sta dva (prvi in zadnji odziv), lahko pa jih je tudi do osem. To dejstvo precej zaplete način prikaza podobe intenzitete. Raster je namreč dvorazsežen, kar pomeni, da vsak piksel prikazuje zgolj eno vrednost intenzitete. Toda katero?

Ker podobo intenzitete običajno izdelamo sami, si tudi način prikaza izberemo sami. Ena možnost je *prikaz povprečne vrednosti intenzitete*. Ta način je zgolj za vizualno uporabo podobe intenzitete zadovoljiv. To sklepam na podlagi dejstva, da tudi ostale, originalno rastrske podobe, na območju enega piksla prikazujejo eno vrednost, ki je lahko npr. kombinacija trave in drevesa, čeprav obe tarči nimata enakega spektralnega odziva.

Druga možnost, za podrobnejše analize intenzitete primernejša, je *prikaz intenzitete po višinskih slojih* (Popescu, 2007). V tem primeru oblak točk razdelimo glede na najustreznejše višinske sloje in za vsakega posebej izdelamo podobo intenzitete (sliki 21 in 22).



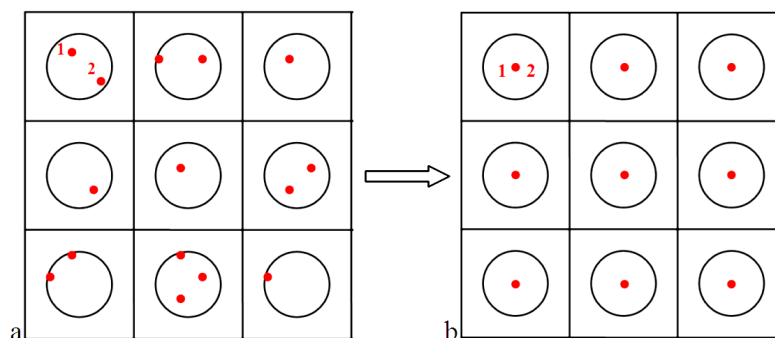
Slika 21: Oblak točk (a) in razdelitev na višinske sloje (b) (Popescu, 2007).
Fig. 21: Point cloud (a) and height layers (b) (Popescu, 2007).



Slika 22: Multispektralna podoba QuickBird (a) ter podobe intenzitete glede na višinski razpon (b) (Popescu, 2007).
Fig. 22: Multispectral image QuickBird (a) and intensity images considering high altitude span (b) (Popescu, 2007).

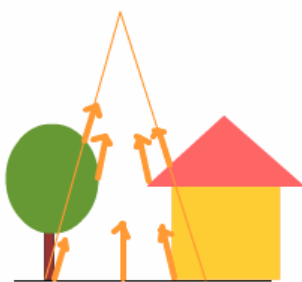
Uporaben prikaz je tudi *uporaba zgolj prvih odbojev*, saj je najverjetneje (še posebej na gozdnih območjih), da prvi odboj predstavlja takšno intenziteto, kot jo zaznajo pasivni bližnjerdeči senzorji (Gaveau in Hill, 2003).

Naslednji pojav, kjer bi natančno lokacijo tarče znotraj odtisa lahko s pridom uporabili, je gotovo interpolacija vrednosti intenzitete v raster. Na sliki 23 je skiciran primer dejanskih ter v podatkih zapisanih razporeditev tarč znotraj odtisa.



Slika 23: Dejanska (a) in v podatkih zapisana (b) razporeditev tarč znotraj odtisa.
Fig. 23: Actual (a) and in data written (b) distribution of targets inside one footprint.

Predstavljamo si lahko, da bi bila interpolacija v primeru znane lokacije tarče znotraj odtisa bolj kakovostna. Žal pa zaenkrat ni točne formule, ki bi določala kje znotraj pulza je bil odbit posamezen odziv (Maier, 2006). Kot je opisano v poglavju 2.4.1, je zaznava odzivov odvisna od intenzitete na celotni poti žarka ter metode zaznavanja odzivov, ki pa jo posamezni proizvajalci skrbno čuvajo.

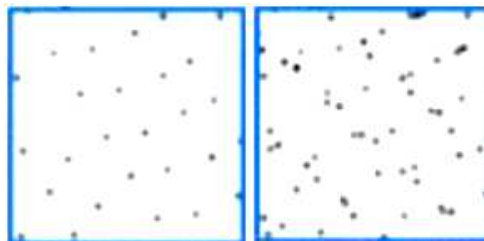


Slika 24: Možni odboji pulza.
Fig. 24: Possible pulse returns.

Poleg tega, četudi bi poznali metodo zajema odzivov, v nekaterih primerih ne bi mogli določiti točne lokacije. Primer je skiciran na sliki 24, kjer bi bilo možno, da se ob popolnoma enakem časovnem trenutku žarek odbije od strehe hiše ali od drevesa, ki stoji poleg nje. To težavo lahko delno rešimo, če poznamo intenziteti drevesa in strehe. Pomaga tudi, če premer laserskega žarka zelo zmanjšamo, saj bo potem verjetnost, da en žarek zadane tako drevo kakor hišo, majhna.

Glede na to, da je velikost odtisa navadno precej manjša od velikosti piksla, je vpliv položaja tarče znotraj odtisa na rezultat rastriranja majhen. Večji vpliv zna imeti razporeditev odtisov oz. točk. Točke po prostoru namreč niso razporejene enakomerno, ampak se spreminjajo

glede na geometrijo znotraj pasu snemanja, ustavljanja, pospeševanja na robovih pasu, idr. (slika 25).



Slika 25: Točke enega pasu (levo) in točke dveh prekrivajočih se pasov (desno) (Shin, 2007).
Fig. 25: Points of one band (left) and points of two bands (right) (Shin, 2007).

Tudi zaradi neenakomerne prostorske razporeditve točk, ima pri rastriranju pomembno vlogo metoda interpolacije (Boyd, 2007). Navadno uporabljamo tri metode interpolacije: metoda najbližjega soseda, Delaunayjeva triangulacija ter kriging. Uporabimo tisto, ki za določen namen nudi najustreznejše rezultate.

Pomembno je, da še pred interpolacijo podatke kar se da kalibriramo. To storimo predvsem z uskladitvijo podatkov med različnimi pasovi leta (Boyd, 2007), lahko pa tudi z upoštevanjem spreminjanja vpadnega kota na teren. S temi popravki je podoba intenzitete bolj homogena (Willem van der Vegt, 2007).



Slika 26: Šum na podobi intenzitete (Nobrega, 2005).
Fig. 26: Noise on intensity image (Nobrega, 2005).

Kljub kalibraciji pa izdelana podoba intenzitete zaradi različnih vzrokov vsebuje šum (zrnatost...), ki otežuje njeno nadaljnjo uporabo (slika 26). Zato jo skušamo popraviti z različnimi metodami (glajenje, mozaičenje, normalizacija, filtriranje, uravnavanje histogramov...), ki pa zopet vplivajo na kakovost podobe intenzitete. Izberemo tisto metodo obdelave, ki je najprimernejša za naš namen in ki najmanj spremeni prvotne podatke.

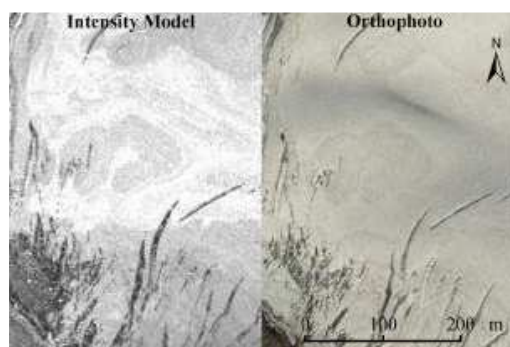
Merjena intenziteta zaradi vpliva motečih faktorjev ni popolnoma v skladu s teoretičnimi vrednostmi za odbojnost materiala, ampak jim sledi relativno. Kljub vsemu je Boyd (2007)

pri primerjavi prvih odbojev ZLS s hkratno zajetimi podatki HyMap, ki merijo pasivni odboj žarkov pri isti valovni dolžini, ugotovil, da kljub različnim spremenljivkam tarče (grobost in usmerjenost površja, velikost tarče ...), vrednosti lidarske intenzitete na splošno predstavljajo sevanje bližnjega IR, če jih kalibriramo glede na višino posameznih pasov snemanja. Tako je mogoče ločiti različne materiale in bi podatke o intenziteti odboja teoretično lahko uporabili za razločevanje različnih površin. Pogoj pa je, da se odbojnosti (s tem tudi vrednosti intenzitete) teh površin dovolj razlikujejo med sabo (raziskave na to temo so opisane v (Hasegawa, 2006), (Song et al., 2002)).

4.6 Različne uporabe intenzitete odboja

Intenziteta, kot »stranski produkt« lidarskega snemanja, nosi potencialno pomembne informacije o odbojnosti objektov, ki bi jih lahko koristno uporabili pri različnih interpretacijah lidarskih podatkov. To so do sedaj na različnih področjih že storili različni avtorji. V nadaljevanju je naštetih nekaj najpomembnejših dognanj in uporab, seveda pa se raziskave na tem področju še zdaleč niso zaključile.

Najpogostejša uporaba intenzitete je za vizualizacijo območja snemanja (na površju lahko ločimo nekatere pojave, kot so ceste, poti, stavbe, drevesa in različna raba tal). Preko informacij o odbojnosti zajetih objektov (merjena intenziteta) lahko sklepamo na vrsto materiala objekta od katerega se je laserska svetloba odbila.



Slika 27: Podoba intenzitete (levo) in ortofoto (desno) (Lutz, 2003).

Fig. 27: The intensity image (left) and orthophoto (right) (Lutz, 2003).

V primeru zajema podatkov na nestrukturiranih površinah (npr. ledeniška območja) ali na območjih brez večjih višinskih sprememb (npr. peščene obale, obsežne ravnine), model intenzitete prekaša ortofoto glede na zmožnost razločevanja pojavov na površju in omogoča boljšo položajno orientacijo (slika 27) (Lutz et al., 2003).

Intenziteta je lahko npr. uspešno uporabljena za identifikacijo in klasifikacijo karakteristik površja

ledeniških področij. Ledene površine namreč oddajajo občutno nižjo intenziteto kakor zasnežene. Iz tega razloga je meja med snegom in ledom veliko očitnejša na podobi lidarske intenzitete kakor na ortofotu (Lutz, 2003).

Zelo podobno velja pri identifikaciji vodnih površin, kjer ima voda navadno nižjo intenziteto kakor tla na kopnem (absorpcija valovne dolžine bližnjega IR je v vodi občutno višja kakor v zemlji) (Brzank, 2006).

V nenehni želji po izboljšanju kakovosti lidarskih podatkov lahko intenziteto uporabimo pri iskanju homolognih pojavov med prekrivajočimi se pasovi, tj. za združevanje pasov, za odpravo napak meritev ter za kontrolo kakovosti (zanesljivosti) podatkov (Maas, 2001 in Kraus et al. 2006). Dobro vidne pojave na podobi intenzitete (npr. križišča cest ali dominantna drevesa) uporabimo kot terenske oslonilne točke.

Uporaba intenzitete za izboljšanje klasifikacije podatkov in/ali ekstrakcije pojavov. Razvoj aplikacije poteka v smeri klasifikacije talnih in netalnih točk (osnovna klasifikacijska rutina) in klasifikacije ali ekstrakcije točk glede na različne rabe tal. Primer je npr. ekstrakcija cest, kjer lahko s pridom izkoristimo dejstvo, da imajo ceste homogeno intenziteto in enako višino kakor gola tla (Hu et al., 2004). Poleg tega je ločljivost cest od trave in dreves na podlagi intenzitete zelo visoka (Song et al., 2002).

Uporaba intenzitete se je kot uspešna pokazala tudi pri kartiranju tokov lave ter definiciji relativne kronologije položaja lave (velja inverzna korelacija med starostjo lave in jakostjo intenzitete) (Brenner et al., 2002).

Meritve intenzitete odboja se prav tako uporabljajo v gozdarstvu in sicer za izboljšanje ocene gostote krošenj (intenziteta močno narašča z naraščanjem gostote krošenj) (Donoghue et al., 2007) ter volumna gozda (funkcija višine in števila odbojev laserskega žarka od krošenj) (Lovell, 2003), za določitev lokacije in oblike posameznih dreves (Andersen, 2007) in za identifikacijo vrste vegetacije. Za identifikacijo vrst so bile dosedanje raziskave sicer precej neuspešne (npr. Holmgren, 2003; Holmgren & Persson, 2003; Hyyppa & Inkinen, 1999; Moffiet, 2005; Watt, 2005), vendar pa kažejo koristnost za klasifikacijo nekaterih drevesnih vrst (Brandtberg et al. 2003; Donoghue et al., 2007).

Na podlagi mnogih raziskav se je izkazalo, da surovi podatki o intenziteti v večini primerov

uporabe niso zadovoljivi. To je posledica dejstva, da so vrednosti merjene intenzitete zaradi mnogih motečih faktorjev (v LS, atmosferi in na tarči) preveč popačene. Zato zadnjih nekaj let mnogi strokovnjaki na tem področju eksperimentalno preučujejo in analizirajo vrednosti intenzitete, da bi ugotovili vplive na meritve in zapisali najprimernejši model odbojnosti (Song et.al, 2002, Lutz et al., 2003, Hasegawa, 2006). V vseh zgoraj naštetih primerih uporabe intenzitete je bila nad podatki izvedena vsaj ena izmed sledečih operacij: interpolacija, filtriranje, normalizacija (glede na višino snemanja (Brenner et al., 2002) ali kot odboja laserskega žarka (Song, 2002; Donoghue et al., 2007)), popravek zaradi spremembe velikosti laserskega pulza (Luzum, 2004; Donoghue et al., 2007), idr. S temi operacijami meritev so intenziteto precej izboljšali. S še podrobnejšimi raziskavami in novimi ugotovitvami pa bomo morda v prihodnosti intenziteto lahko standardizirali in tako omogočili njeno neposredno uporabo. S tem bi v veliki meri povečali zmožnosti lidarskega sistema.

Dokler intenziteta kot samostojni podatek ni v veliko pomoč, pa je zelo dobrodošla v kombinaciji z drugimi podatki. Izredno dobre rezultate so pokazale kombinacije intenzitete z lidarskimi podatki (višina objektov, naklon, zgrešene točke, dolžina odseka, gostota točk) (Brzank, 2006; Tao, 2001), ortofotom, multispektralnimi satelitskimi podobami, raznimi vektorskimi podatki idr. Sama sem v nalogi za določitev pokrovnosti najprej uporabila zgolj intenziteto lidarskih točk, nato sem jo dopolnila z višino in iz nje izpeljanimi podatki (standardno deviacijo višine točk), dopolnilni vir pa so predstavljale podobe BDOF1.

5 UPORABLJENI PODATKI IN PROGRAMSKA OPREMA

Pri svojem delu sem uporabljala in kombinirala dve vrsti podatkov: vektorske in rastrske. Običajno ti dve vrsti podatkov obravnavamo popolnoma ločeno, vendar je njihova povezava nakazovala obetajoče rezultate. Območja obdelave sem izbrala tako, da so na njih bili zajeti osnovni razredi pokrovnosti, ki sem jih v nalogi želela klasificirati (stavbe, drevesa, asfalt, trava, njive), poleg tega pa tudi nekatere posebnosti, na osnovi katerih bi dodatno analizirala možnosti klasifikacije (voda, vinogradi, hmelj, daljnovodi, vzpenjača...). Izbirala sem med območji, na katerih so bili zajeti lidarski podatki. Tako sem omenjene podatke za pet območij Maribora pridobila od podjetja Geoin, za območje Slivnice od ZRC SAZU, podatke BDOF1 za vsa navedena območja pa od GURS. Način obdelave podatkov in uporabljena programska oprema sta opisana v prilogi A.

Barvni digitalni ortofoto posnetki (BDOF1)

V geodeziji že dobro uveljavljen barvni digitalni ortofoto posnetek (BDOF1) spada v skupino rastrskih podatkov. Vsak geolociran piksel nosi informacijo o sivini. Radiometrična ločljivost BDOF1 je 24 bitna, kar da približno 16 milijonov barvnih tonov: od 0 (črna) do 255 (bela) v treh kanalih (rdeči, modri, zeleni). BDOF1 se trenutno uporablja predvsem kot podlaga za prikaz različnih prostorskih informacij, v nalogi pa se je izkazal kot odlična osnova za samodejno izločitev nekaterih vrst pokrovnosti.

Uporabljeni podatki

Na slikah 28-33 so po vrsti prikazani območja Slivnice ter pet območij Maribora. Na vseh podobah lahko opazimo objekte, ki so osnova zastavljene klasifikacije: asfaltirane ceste, stavbe, drevesa, trava, njive. Na posameznih podobah pa je opaziti tudi nekatere posebnosti, zaradi katerih sem v nadaljevanju opisana območja tudi izbrala.



Slika 28: BDOF1 območja Slivnice.
Fig. 28: BDOF1 of Slivnica area.

Območje Slivnice (slika 28) vsebuje vse osnovne razrede. Nekatere strehe na BDOF1 so rdeče, druge sive. Opazimo lahko tako velika kakor tudi majhna drevesa (grmovje). Travniki so večinoma ekstenzivni, deloma močno pomešani z zemljo. Njive so majhne. Ceste so asfaltirane, prav tako tudi nekatera dvorišča. Kamnita je tudi večina pokopališča. Čez celotno podobo so prisotne sence. Opaziti je nekaj vrtnih lop oz. pokritih vrtov. Avtomobilov ni videti.



Slika 29: BDOF1 Maribora - območje 1.
Fig. 29: BDOF1 of Maribor – area 1.

Prvo območje Maribora (v nadaljevanju MB 1) (slika 29) vsebuje pretežno njive. Videti je, da na njih raste večinoma hmelj, ki pa je na veliki njivi že obran. Na severu podobe lahko opazimo železniško progo, ki je ob straneh obdana s peščenima nasipoma. Najdemo tako asfaltno kot tudi makadamske ceste, nekaj hiš in dreves ter travnike. Za analizo lidarskih podatkov je pomembna elektro napeljava (južni del podobe). Opaziti je tudi nekaj avtomobilov.



Slika 30: BDOF1 Maribora - območje 2.
Fig. 30: BDOF1 of Maribor – area 2.

Drugo območje Maribora (v nadaljevanju MB 2) (slika 30) je pomembno predvsem zaradi lokacije kolesarske proge (priloga B) ter vzpenjače, ki poteka čeznjo. Lokacija je za nalogo zanimiva tudi zato, ker se nahaja na robovih štirih BDOF1 in se zato barve istih vrst objektov rahlo razlikujejo. Lokacijo delajo zanimivo tudi precejšen naklon terena, parkirišče polno avtomobilov, hotel z bazenom ter del jezera na skrajnem severovzhodu podobe.



Slika 31: BDOF1 Maribora - območje 3.
Fig. 31: BDOF1 of Maribor – area 3.

Tretje območje Maribora (v nadaljevanju MB 3) (slika 31) zajema večinoma športne objekte (nogometna igrišča, atletski stadion, tenis igrišča, asfaltirano igrišče). Ti so zanimivi zaradi svojega materiala (leš ali drugi umetni materiali). Poleg tega vsebujejo tudi vse druge osnovne objekte.



Slika 32: BDOF1 Maribora - območje 4.
Fig. 32: BDOF1 of Maribor – area 4.

Četrto območje Maribora (v nadaljevanju MB 4) (slika 32) sem izbrala zaradi vode, mostu, nekaj visokih stavb (morebitne manjkajoče talne točke za stavbami) ter industrijske cone (morebitne manjkajoče talne točke zaradi goste pozidave).

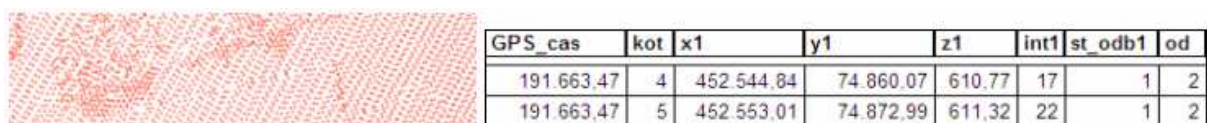


Slika 33: BDOF1 Maribora - območje 5.
Fig. 33: BDOF1 of Maribor – area 5.

Peto območje Maribora (v nadaljevanju MB 5) (slika 33) je hribovito in je zanimivo predvsem zaradi vinogradov in jezera, ki je v veliki meri prekrito s senco. Ostali prisotni objekti so: posamezne stavbe, drevesa, makadamske ceste, njive, travniki.

Podatki laserskega skeniranja – lidarski podatki

Podatki laserskega skeniranja (lidarski podatki) spadajo v skupino vektorskih podatkov. Lastnosti in uporabo teh podatkov sem podrobneje opisala v poglavju 4. Naj kljub temu navedem nekaj dejstev o podatkih, uporabljenih v nalogi. Lidarski podatki so predstavljeni kot oblak točk, postavljen v koordinatni sistem ter z različnimi atributi (slika 34):



Slika 34: Oblak točk lidarskega snemanja (levo) ter prikaz nekaterih atributov (desno).

Fig. 34: Point cloud of lidar data (left) and an example of some attributes (right).

O vsaki točki se vodijo informacije, kot so:

- GPS čas, v katerem je bila točka posneta,
- kot, pod katerim je bila točka posneta,
- koordinata točke v trirazsežnem prostoru,
- intenziteta odbitega žarka v tej točki,
- zaporedna številka odboja in skupno število odbojev, ki skupaj določujeta red odboja (edini, prvi, zadnji ali srednji odboj).

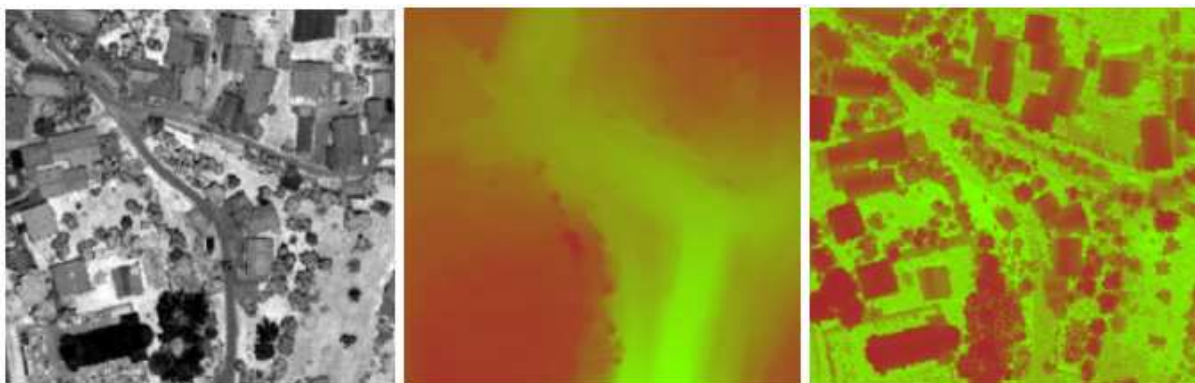
Pretvorba lidarskih podatkov v rastrsko obliko

Za vsa območja sem izdelala naslednje zelene podobe s prostorsko ločljivostjo 0,5 m:

- *podoba intenzitete:*
 - izhajala sem iz atributov x, y in intenziteta,
 - uporabila sem točke, ki so reda prvi in edini, saj te točke predstavljajo objekte, ki so vidni »od zgoraj« - kakor pri ortofotu,
 - glede na gostoto točk sem uporabila velikost piksla 0,5 m (pri tem sem uporabila enačbo za določitev optimalne ločljivosti celice, ki so jo na ZRC SAZU modificirali po Henglu (Hengl, 2006)),
 - v postopku rastriranja sem uporabila metodo najbližjega soseda, kjer vsakemu pikslu dodelimo povprečno vrednost okoliških točk,

- *podoba digitalnega modela reliefa (DMR):*
 - izhajala sem iz atributov x, y in z,
 - uporabila sem vse točke, ki jih je program LasEdit določil kot talne (kakovost določitve DMR je opisana v nadaljevanju naloge),
 - velikost piksla je enaka kot pri podobah intenzitete,
- *podoba digitalnega modela površja (DMP):*
 - izhajala sem iz atributov x, y in z,
 - uporabila sem vse točke, ki jih je program LasEdit določil kot netalne točke, in ki so reda prvi in edini, saj srednji in zadnji odboji ne predstavljajo dejanske višine objekta,
 - velikost piksla je enaka kot pri podobah intenzitete.

Za vseh šest območij sem naredila zgoraj navedene osnovne podobe (primer podob za območje Slivnice je na sliki 35). Po potrebi sem za določene analize izdelala še dodatne podobe, ki jih bom navedla v nadaljevanju.



Slika 35: Od leve proti desni: intenziteta, DMR in DMP.
Fig. 35: From left to right: intensity image, DEM and DSM.

Podrobne tehnične informacije o uporabljenih rastrskih podobah

BDOF1

Lastnik podatkov je Geodetska uprava RS (GURS). Podobe zajemajo vrednosti v spektralnih kanalih rdeč, moder in zelen in so ortorektificirane v GK-KS.

Preglednica 3: Nekateri tehnični podatki o podatkih BDOF1.

Table 3: Some technical data of DOF.

Podatek \ Območje	Slivnica	MB 1	MB 2	MB 3	MB 4	MB 5
Razpon x (m)	145	300	800	650	750	450
Razpon y (m)	139	450	600	700	600	570
Razpon z (m)	17,03	4,07	168,88	63,86	41,42	90,2
Velikost piksla	0,25	0,2				
Datum snemanja	8.05.2007	10. 09. 2007				

Lidar

Lastnik podatkov območja Slivnice je ZRC SAZU (pridobili so jih v okviru projekta M1-0137 Metodologija izdelave podrobne digitalne karte višine in gostote vegetacijskega pokrova), območij Maribora pa podjetje Geoin d.o.o.. Na vseh območjih je bil uporabljen pulzni laser podjetja Optech ALTM 3100EA z naslednjimi tehničnimi lastnostmi:

- število odzivov na pulz: 4,
- vzorec skeniranja: žagasti (skener z nihajočim zrcalom),
- divergenca laserskega žarka: 0,3 mrad,
- zajem intenzitete: DA, 12 bitni,
- geolociranost podatkov: DA,
- koordinatni sistem: GK.

Območja so enako velika kakor pri BDOF1.

Preglednica 4: Nekateri tehnični podatki o lidarskih podatkih (Pavlek, 2007).

Table 4: Some technical data of lidar data (Pavlek, 2007).

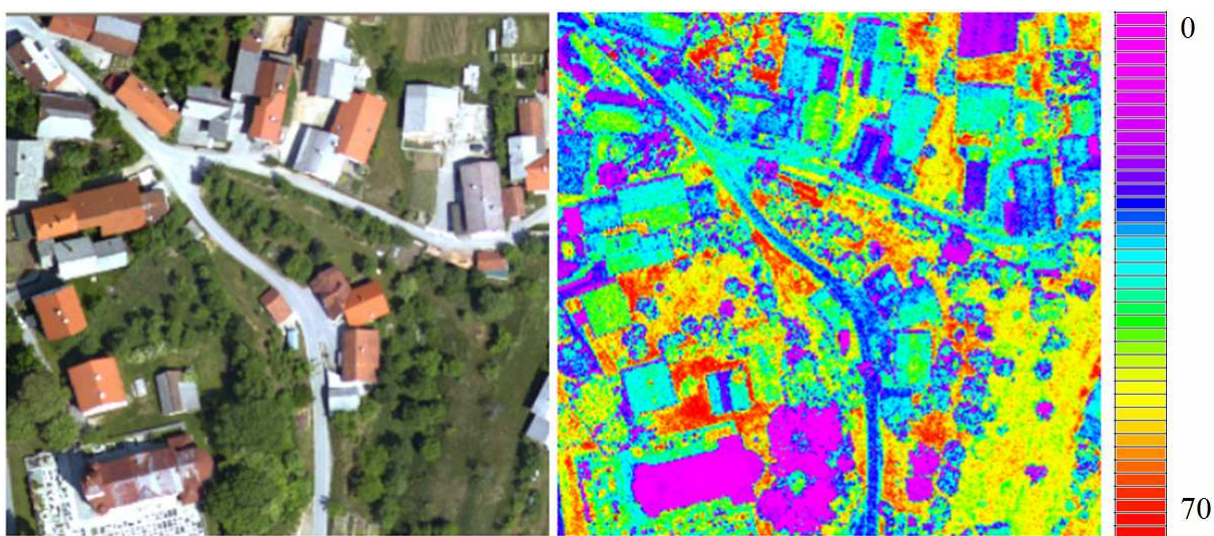
Podatek \ Območje	Slivnica	MB 1	MB 2	MB 3	MB 4	MB 5
Datum snemanja	8.5.2007	september 2007				
Število točk	145386	363092	879066	1626992	2748541	448853
Število točk na m ² (min.; maks.; povpr.)	3; 20; 8,3	0; 12; 1,5	0; 24; 2,3	0; 34; 3,3	0; 124; 5,3	0; 21; 1,6
Nad. višina snemanja	1650 m	1300 m				
Največji kot snemanja	9°	22°	21°	21°	25°	21°
Število serij	1	3	2	4	7	5
Frekvenca	100 kHz	70 kHz				
Položajna natančnost	< 30 cm	< 40 cm				
Višinska natančnost	< 15 cm	< 20 cm				

6 KLASIFIKACIJA POKROVNOSTI

Na osnovi podatkov BDOF1 in podob intenzitete, dobljenih iz oblaka točk lidarskih podatkov, sem na vseh šestih testnih območjih skušala določiti pet osnovnih razredov: drevesa, stavbe, asfalt, travniki in njive. Začela sem z enostavno klasifikacijo, že vsebovano v uporabljeni programski opremi⁸. Ker z rezultati nisem bila povsem zadovoljna, sem postopoma uvajala različne metode za boljšo klasifikacijo. Celoten postopek je opisan v nadaljevanju tega poglavja.

6.1 Začetna klasifikacija

Osnovne razrede sem skušala določiti z nenadzorovano klasifikacijo podob. Vzemimo za primer območje Slivnice in prikažimo BDOF1 (slika 36 levo) ter barvno podobo intenzitete (slika 36 desno), ki sta bili osnovi za klasifikacijo.



Slika 36: BDOF1 Slivnice (levo) ter barvna podoba intenzitete Slivnice (desno).

Fig. 36: DOF1 of Slivnica (left) and intensity image of Slivnica (right).

Interpretator lahko na videz med seboj loči različne vrste objektov na obeh podobah, vendar pri tem izhaja iz enega ali več osnovnih elementov vizualne interpretacije (ton, oblika, velikost, vzorec, tekstura, senca in povezava). Pri nenadzorovani klasifikaciji imamo na voljo

⁸ Programa Erdas Imagine ter Envi.

samo eno značilnost, to je vrednost piksla. Piksle razporedimo v razrede glede na njihovo »naravno« zduževanje v spektralnem prostoru. V prvem koraku ne potrebujemo nikakršnega védenja o površju. Pri tem upoštevamo, da so vrednosti enake rabe tal (ali podobni predmeti) blizu v spektralnem prostoru, vrednosti različnih tipov rabe tal pa so daleč narazen. To je sicer nekoliko idealizirano, saj vedno pride do določenega prekrivanja razredov in je zato ločevanje precej težavno, poleg tega pa je posamezni informacijski razred pogosto sestavljen iz več spektralnih. Za nenadzorovano klasifikacijo lahko rečemo, da najprej z upoštevanjem številčnih vrednosti podatkov določimo spektralne razrede, ki jim v nadaljevanju priredimo informacijske razrede (Oštir, 2006).

Klasifikacija torej temelji na zduževanju pikslov z enakimi oz. podobnimi (stopnja podobnosti je odvisna od števila razredov, ki jih želimo klasificirati) spektralnimi lastnostmi. Glede na to dejstvo lahko že na osnovi vizualnih značilnosti slik 36 presodimo, katere razrede bomo na določeni podobi lahko izločili in kje bodo nastopile težave.

Pri BDOF1 lahko opazimo, da je cesta enake barve kakor skoraj polovica streh na stavbah, kar pomeni težave pri razlikovanju stavb in asfalta. Zelo podobno barvo imajo nekatere krošnje dreves ter opečnate strehe, ki ležijo na senčni strani. Tudi tukaj lahko pričakujemo težave. Prav tako so spektralno zelo podobni nekateri travniki in drevesa, dodaten problem predstavljajo sence.

Tudi pri klasifikaciji intenzitete bomo najverjetneje imeli velike težave. Na prvi pogled objekte med seboj sicer lahko ločimo. Če pogledamo pazljiveje, pa opazimo, da lahko ima enako intenziteto kakor streha tudi krošnja ali njiva, med seboj neločljive so ceste in strehe. Videti pa je, da bi lahko dobro klasificirali travnike (na sliki 36 so to vrednosti, obarvane z rdečo in rumeno).

Rezultat klasifikacije podob na slikah 36 sta podobi na slikah 37 (klasifikacija BDOF1 levo in klasifikacija intenzitete desno).



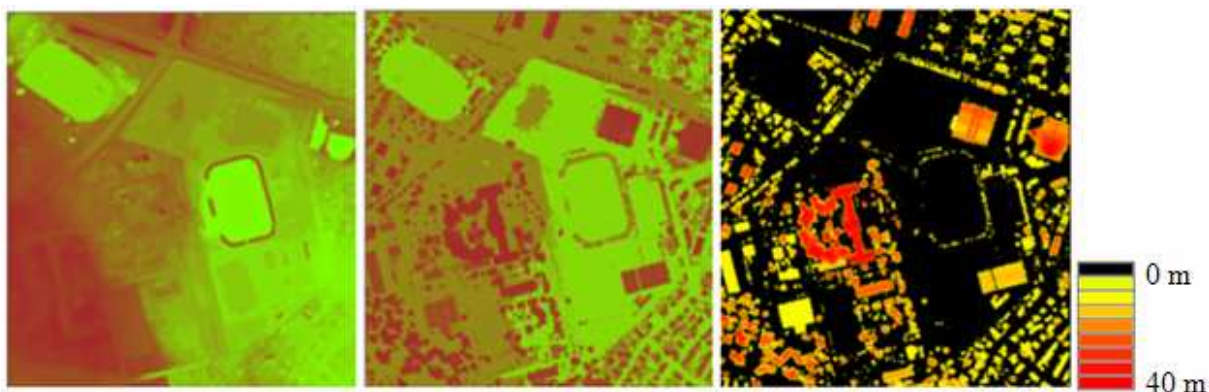
Legenda: ■ stavba ■ drevo ■ asfalt ■ trava ■ njiva senca

Slika 37: Klasifikacija BDOF1 (levo) in klasifikacija podobe intenzitete (desno).
Fig. 37: Classification of DOF1 (left) and classification of intensity image (right).

Moja začetna opažanja so se izkazala pravilna. Nobena osnovna podoba ne zadošča za dobro izločitev kateregakoli osnovnega razreda. Še najboljše se je izločil razred trave, dobljen na osnovi intenzitete. Poleg že navedenih težav pa lahko pri podobi BDOF1 opazimo, da so na njej prisotne sence, ki so zelo temne barve in pri postopku klasifikacije posledično tvorijo svoj razred. Ta razred bo težko razbiti na ustrezno pokrovnost, saj je temne barve tako trava za stavbo kakor tudi asfalt za travo. Ker sem na vseh testnih območjih prišla do praktično neuporabnih rezultatov, sem postopek klasifikacije začela znova z metodami, opisanimi v naslednjih podglavjih.

6.2 Razdelitev podatkov na višinske pasove

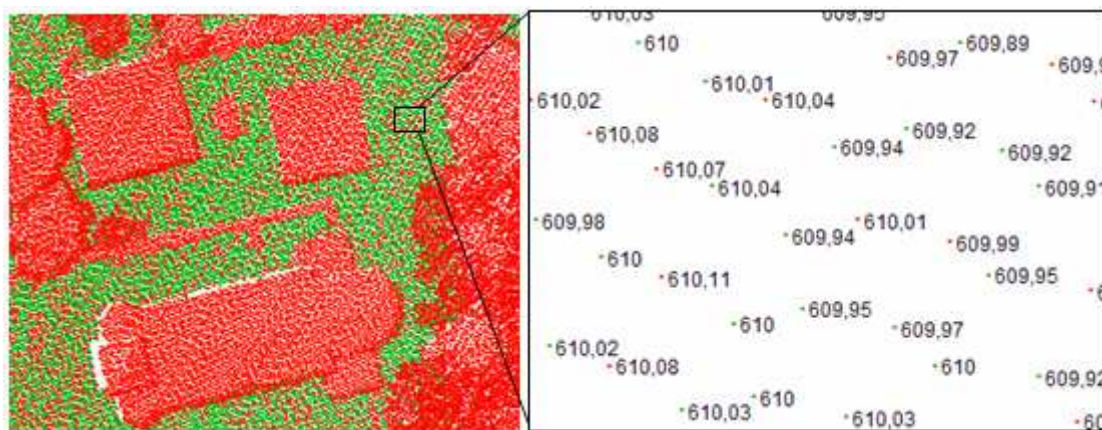
Klasifikacijo sem skušala izboljšati z vpeljavo informacije o višini objektov, ki je izpeljani podatek lidarskih točk. Višino objektov sem določila tako, da sem od digitalnega modela površja (v nadaljevanju DMP) odštela digitalni model reliefa (v nadaljevanju DMR). Primer določitve višin objektov je prikazan na sliki 38, ki prikazuje območje MB 3 (od leve proti desni: DMR, DMP, višine (v metrih)).



Slika 38: Od leve proti desni: DMR, DMP, višine območja MB 3.

Fig. 38: From left to right: DEM, DSM, elevations of area MB 3.

Poudariti je treba, da je kakovost določitve višine posameznih objektov tesno odvisna od kakovosti DMR in DMP. Podrobne analize kakovosti DMR nisem delala, prav tako sem morala zaupati izboru točk, ki jih je program LasEdit določil kot točke tal (algoritem izdelave le-teh namreč uporabniku ni znan). Določitev točk na talne in netalne pa sem na grobo vseeno preverila. Naj prikazem primer. Na sliki 39 je prikazana razdelitev točk, kot jo je določil program LasEdit, na talne (zelene) in netalne (rdeče točke). Slika desno je podrobna.

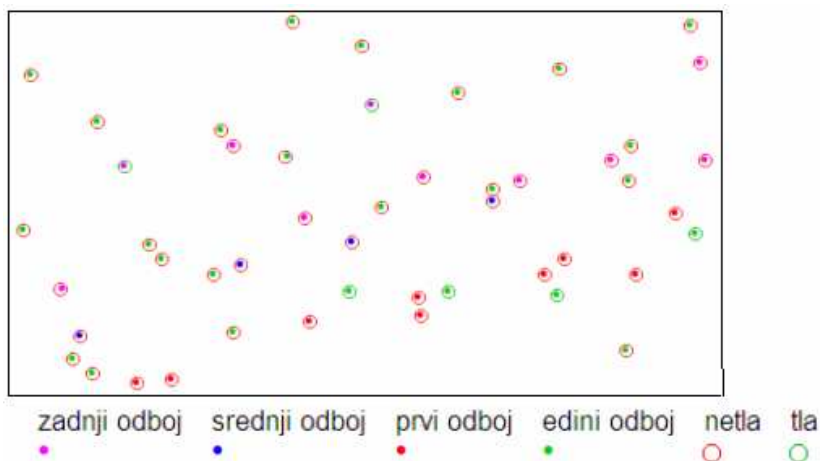


Slika 39: Razdelitev točk na talne (zelene točke) in netalne (rdeče točke). Desno je prikazan izsek leve podobe.

Fig. 39: Distribution of points on ground (green points) and nonground (red points). Right image shows detail.

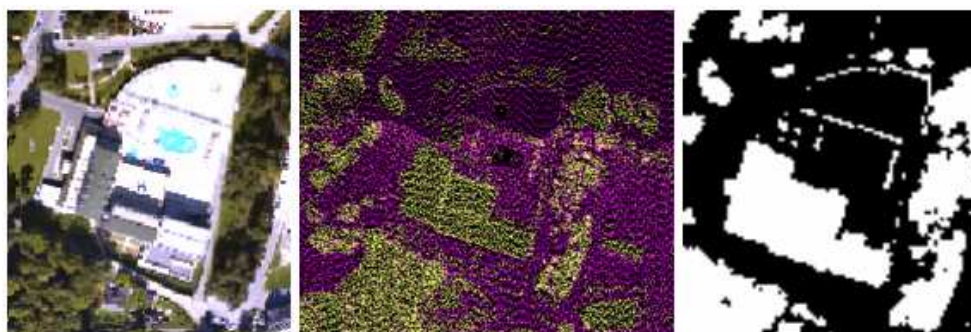
Ker navodila ne navajajo algoritma, sklepam, da program kot netalne določi točke, ki imajo glede na okoliške točke prevelike skoke višin (so previsoke glede na okolico). Opazimo lahko, da je na dejanskih tleh izločenih precej točk, ki od okoliških točk v višini odstopajo tudi samo za nekaj cm. Lahko da je bila izločitev teh točk pravilna (gre za vrhove trav ali druge vegetacije), lahko pa smo izgubili informacije o reliefu. Določitev tal in netal tudi ne

moremo sklepati iz reda odboja. Na sliki 40 lahko vidimo, da sta prvi in srednji odboj vedno definirana kot netla, zadnji in edini odboj pa nista nujno definirana kot tla. Oboje je pravilno.



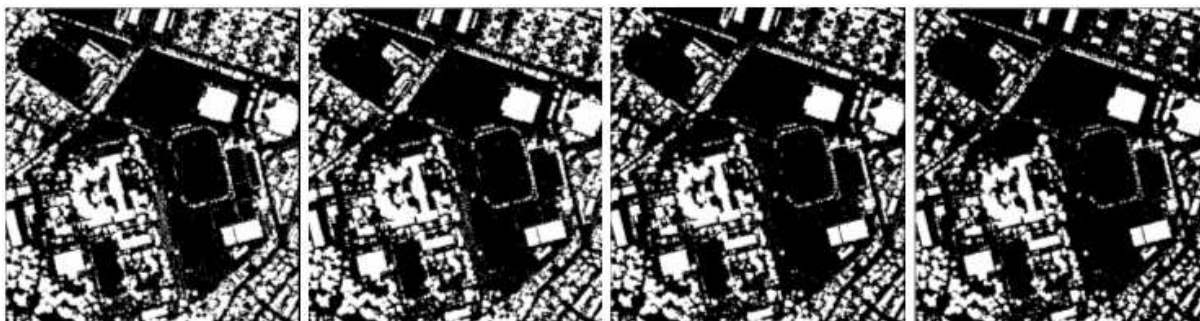
Slika 40: Točke glede na red odboja ter vrsto (talne, netalne).
Fig. 40: Points considering the order and kind of reflection (ground, nonground).

Skozi obdelavo in opazovanje podob sem ugotovila, da je klasifikacija točk na talne in netalne ter s tem relief za moj namen naloge določen zadosti pravilno. Na vseh območjih sem odkrila samo en primer napačne razdelitve točk na talne in netalne ter s tem napačen DMR in višine. To je mariborski hotel Habakuk (območje MB 2), katerega oblika je »zavedla« program, da ga je polovico določil kot tla (primer na sliki 41 - od leve proti desni: BDOF1, talne točke (vijolične) in netalne točke (rumene) ter točke, višje od 1 m).



Slika 41: Od leve proti desni: BDOF1; talne točke (vijolične) in netalne točke (rumene); točke, višje od 1 m.
Fig. 41: From left to right: DOF; ground (purple) and nonground points (yellow); points, higher than 1 m.

Na območju MB 3 sedaj razdelimo objekte po višini na višje od 0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m (slika 42, od leve proti desni).



Slika 42: Objekti, višji od 0,5 m, 1 m, 2 m in 3 m (od leve proti desni).
Fig. 42: Objects higher than 0,5 m, 1 m, 2 m in 3 m (from left to right).

Razdelitev prikažimo še na izseku. Na sliki 43 so na podlagi BDOF1 prikazani objekti, višji od 0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m (od leve proti desni):



Slika 43: Na podlagi BDOF1 prikazani objekti, višji od 0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m (od leve proti desni).
Fig. 43: Objects, higher than 0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m (from left to right), shown on DOF.

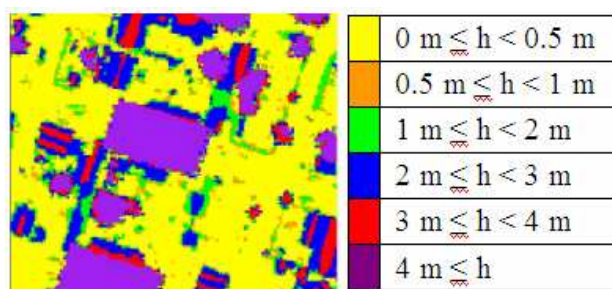
Ocenimo vidnost objektov na izseku glede na njihovo višino (preglednica 5).

Preglednica 5: Vrste objektov glede na višino objekta.
Table 5: Tip of objects in view of their hight.

Višina objekta	Vrsta objekta
nad 3 m	celotne stavbe, višje od 3 m (večina stanovanjskih objektov), deli stavb, ki so delno višji od 3 m (garaže, vrtno lope, pritlične hiše), višja drevesa
nad 2 m	večji del stavb, večina dreves
nad 1 m	vse stavbe in drevesa, grmovje, deli avtomobilov, razni vodnjaki, bazeni...
nad 0,5 m	stavbe, garaže, vrtno lope, drevesa, grmovje, avtomobili, vodnjaki, smetnjaki, nekatere ograje...

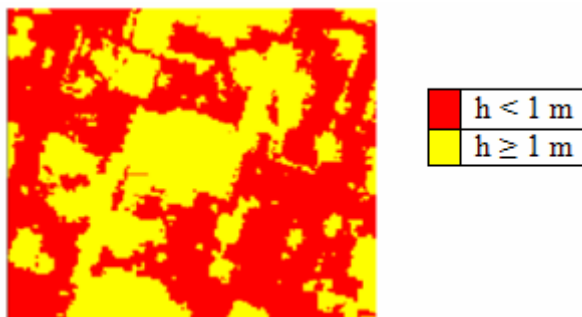
Ker višina objekta pomembno vpliva na izločitev posameznih razredov, jo je treba dobro preučiti. Pred njeno izbiro moramo vedeti katere razrede želimo klasificirati. Določiti moramo kaj spada v določen razred. Ali sta npr. vrtna lopa in lesena garaža stavba ali ne, ali je okrasno grmičevje drevo ali ne itd.

Na sliki 44 je prikazan primer razporeditve objektov v več višinskih pasov.



Slika 44: Prikaz objektov glede na njihovo višino.
Fig. 44: Review of objects in view of their hight.

Opazimo lahko, da za izločitev dreves in stavb potrebujemo vsaj vse tri razrede objektov, višjih od 2 m. Če želimo v to skupino dodati še grmovje, moramo dodati tudi objekte, višje od 1 m. Pri tem se moramo zavedati, da so v tej skupini zajeti tudi avtomobili in drugi nezaželeni objekti, ki pa imajo manjšo površino in jih bomo zato skušali z določenimi funkcijami eliminirati. Enako velja z objekti, nižjimi od 1 m in višjimi od 0,5 m. To so večinoma zelo majhni objekti, za katere je najbolje, da jih priključimo k skupini tal ter jih kasneje po klasifikaciji eliminiramo (prepišemo s prevladujočimi okoliškimi vrednostmi tal). Na podlagi teh opažanj je za mojo nalogo podatke po višini najbolje razdeliti v dva razreda, in sicer na objekte višje oz. nižje od 1 m (slika 45).



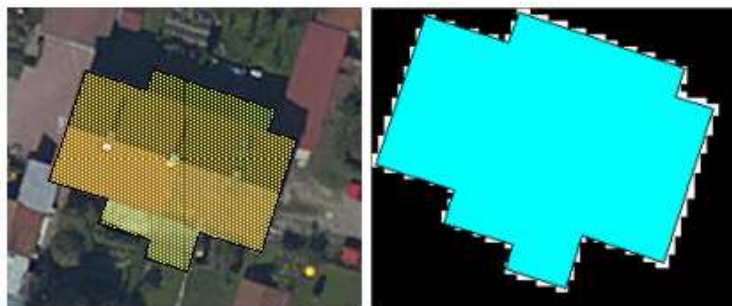
Slika 45: Objekti, višji ali nižji od 1 m.
Fig. 45: Objects, lower or higher than 1 m.

Šum in napake na podobi višin

Ko izdelamo podobo višin, lahko takoj opazimo, da objekti nimajo »realne« oblike. Vzroke lahko iščemo v naslednjih dejstvih:

- *povprečenje vrednosti višin skozi postopek rasterizacije*: z rasterizacijo sem vrednosti DMR in DMP določila glede na povprečno vrednost višin točk v tem pikslu,
- *neenakomerna razporejenost točk*: lahko se zgodi, da na določenem pikslu ni nobene točke (predvsem na robovih stavb), zato je tam vrednost piksla določena glede na okoliške točke,
- *širina snopa laserskega žarka*: lokacija točke je vedno določena s sredino laserskega žarka, s čimer lahko lokacija odstopa tudi do 25 cm
- *napaka DMR*: in s tem napaka višine (razloženo zgoraj),
- *odboji od drugih objektov*: v teh primerih dobimo negativno višino, ki sem jo eliminirala tako, da sem uporabila samo višine, višje od 0,
- *rastrska podoba*: podoba višin je rastrska, kar avtomatsko pomeni neeksaktno obliko objekta (slika 46).

Na sliki 46 je prikazana oblika strehe, pridobljena z ročno vektorizacijo strehe na BDOF1 (slika levo) , ter popačenje tega poligona pri rasterizaciji (slika desno).



Slika 46: Ročno vektorizirana oblika strehe (levo) ter rastrirana streha (desno).
Fig. 46: Manually vectorized form of roof (left) and rasterized roof (right).

Primerjajmo objekte, višje od 1 m z »dejansko« obliko strehe. Na sliki 47 so od leve proti desni prikazane: podoba objektov z višino nad 1 m, primerjava teh objektov z vektorizirano streho ter primerjava teh objektov z rasteriziranim poligonom.



Slika 47: Podoba objektov z višino nad 1 m (rumeno) ter primerjava teh objektov z vektorizirano streho in rasteriziranim poligonom.
Fig. 47: Raster image of objects, higher than 1 m (yellow) and comparison with vectorized and rasterized roof.

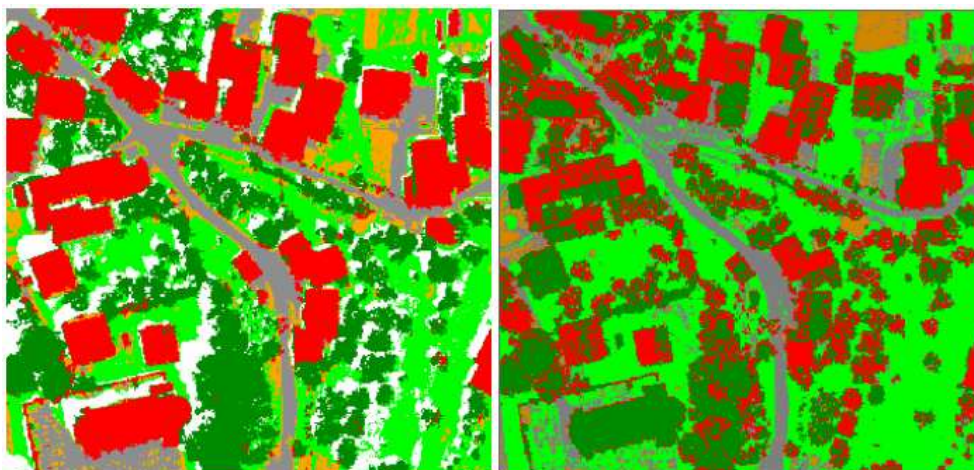
Zavedati se moramo, da so na podobi objektov, višjih od 1 m, prikazani različni objekti. Poleg iskane stavbe tudi drevesa in strehe sosednjih stavb. Tudi če bomo stavbe in drevesa uspeli s klasifikacijo popolnoma pravilno ločiti, ne bo obris stavbe tako oster kot bi bil pri ročni vektorizaciji. Dejstvo pa je, da podobe višin nujno potrebujemo za uspešno klasifikacijo, zato jih moramo uporabiti, čeprav s tem zmanjšamo kakovost oblike dobljenih objektov.

Prikažimo v nadaljevanju nekaj primerov klasifikacije objektov po uvedbi razdelitve na višinska pasova. Na sliki 48 je prikazano območje Slivnice, klasificirano na osnovi BDOF1 ter intenzitete pred in po razdelitvi na višinske pasove.



Legenda: ■ stavba ■ drevo ■ asfalt ■ trava ■ njiva □ senca

Slika 48: Od leve proti desni: BDOF1, prvotna klasifikacija BDOF1 in prvotna klasifikacija intenzitete.
Fig. 48: From left to right: DOF, basic classification of DOF and intensity image.



Legenda: ■ stavba ■ drevo ■ asfalt ■ trava ■ njiva □ senca

Slika 49: Od leve proti desni: klasifikacija BDOF1 in intenzitete po razdelitvi na višine.
Fig. 49: From left to right: classification of DOF and intensity image after separation of heights.

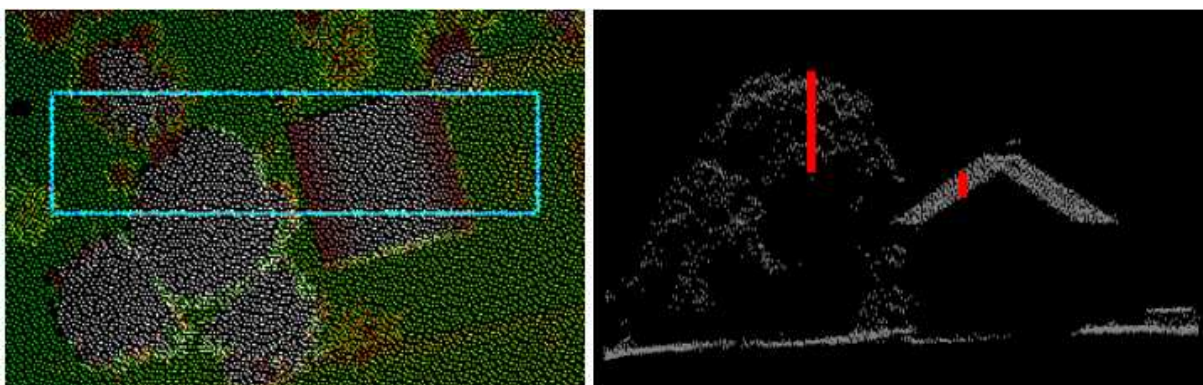
Na sliki 49 je prikazana klasifikacija na območju Slivnice, do popolnoma enakih ugotovitev pa sem prišla tudi na vseh območjih Maribora.

Pri BDOF1 je končna klasifikacija precej boljše, uvedba višinskih pasov se je izkazala kot nujna; vsi razredi se skoraj pravilno izločijo; velik del podobe zajemajo sence, ki so združene v en razred in jih ni mogoče razdeliti v ustrezen razred (ne vemo kaj je pod sencami – trava ali asfalt...); ostajajo majhna področja, ki predstavljajo šum.

Pri intenziteti je uvedba višinskih pasov klasifikacijo precej izboljšala; asfalt in »lepa« trava se med seboj zelo dobro ločita; dobro lahko izločimo njive; skoraj nemogoče je ločiti asfalt od »pohojene« trave, trave, skozi katero se vidi velik del zemlje; objekte, višje od 1 m (drevesa in stavbe) je med seboj nemogoče ločiti.

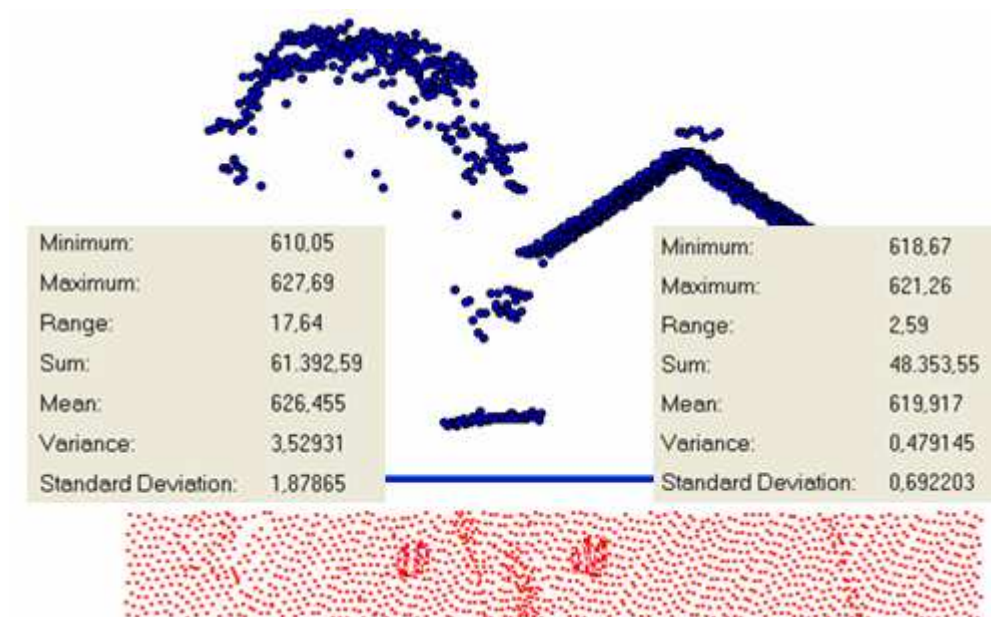
6.3 Uvedba standardne deviacije (STD)

Dreves in stavb se torej na osnovi intenzitete tudi po uvedbi višinskih pasov ne da učinkovito ločiti. Vendar če pogledamo profil lidarskih točk, opazimo, da so drevesa in stavbe zelo dobro ločljiva. Torej mora obstajati neka spremenljivka, ki bi omogočala ločitev teh dveh vrst objektov. Na manjšem območju Slivnice prikazimo profil širine 5 m, ki zajema drevo in stavbo (slika 50).



Slika 50: Točke, zajete v pasu 5 m ter njihov profil.
Fig. 50: Points in 5 m band and their profile.

Opazimo lahko, da imajo točke v krošnji drevesa precej večje razlike v višini kakor točke, razporejene po strehi objekta. Potrebovali bi torej mero za višinsko razpršenost odbojev v pikslu. Izbor točk sem vnesla v program MapInfo, jih prikazala glede na koordinate x,y in z ter na območjih 1 m^2 pod drevesom in stavbo izračunala statistiko. Dobila sem rezultate, prikazane na sliki 51.



Slika 51: Statistični podatki višine izbranih točk na območju drevesa (levo) in strehe (desno).
Fig. 51: Statistical data of selected point height on the area of the tree (left) and roof (right).

Za nas zanimiva mera je standardna deviacija, ki pod drevesom znaša 1,88, pod stavbo pa 0,69, in torej omogoča razločevanje teh dveh objektov. Kaj je standardna deviacija (v nadaljevanju STD)?

Standardna deviacija (tudi *standardni odklon*) (σ , sigma) je statistični kazalec, največkrat uporabljen za merjenje statistične razpršenosti enot. Z njim je moč izmeriti, kako razpršene so vrednosti, vsebovane v populaciji. Standardna deviacija je definirana kot kvadratni koren variance, s čimer je v vsakem primeru dosežena pozitivna vrednost kazalca. Standardni odklon vseh enot statistične populacije je definiran s formulo:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (8)$$

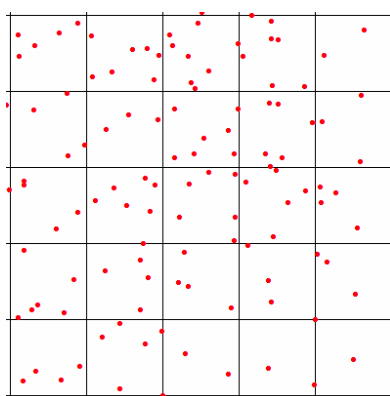
kjer je x_i i-ta enota v statistični populaciji, \bar{x} aritmetična sredina populacije, N pa število vseh enot.

Velika standardna deviacija σ kaže na veliko razpršenost enot v populaciji, tj. enote so razporejene v velikem obsegu okoli aritmetične sredine. Majhna standardna deviacija σ pa nasprotno predstavlja veliko koncentracijo statističnih enot okoli aritmetične sredine.

Za namen vpeljave STD v klasifikacijo potrebujem rastrsko podobo, kjer vsak piksel nosi vrednost standardne deviacije. Pri tem se pojavi nekaj vprašanj: kako in v kakšnem programu izračunati STD, kako uporabiti vrednosti STD, kateri red točk izbrati, kako velik naj bo raster, kako lokacija piksla vpliva na STD, pri kateri gostoti točk je uporaba STD za klasifikacijo še uporabna ter kako STD vpliva na obliko objekta. Na ta vprašanja sem odgovorila v nadaljevanju.

Način izračuna STD

Kot sem navedla pri opisu uporabljene programske opreme (priloga A), so analize na kombiniranih rastrskih in vektorskih podatkih pogosto onemogočene ali vsaj otežene. Zato sem za izračun STD najprej napisala program v Matlabu, ki je žal takšni količini podatkov podlegel. Zato sem točke uvozila v MapInfo ter tam nad vsemi točkami posameznega območja generirala mrežo z ustrežno velikostjo celice (1 m oz. 1,5 m). Izsek točk pod mrežo z velikostjo celice 1,5 m je prikazan na sliki 52.



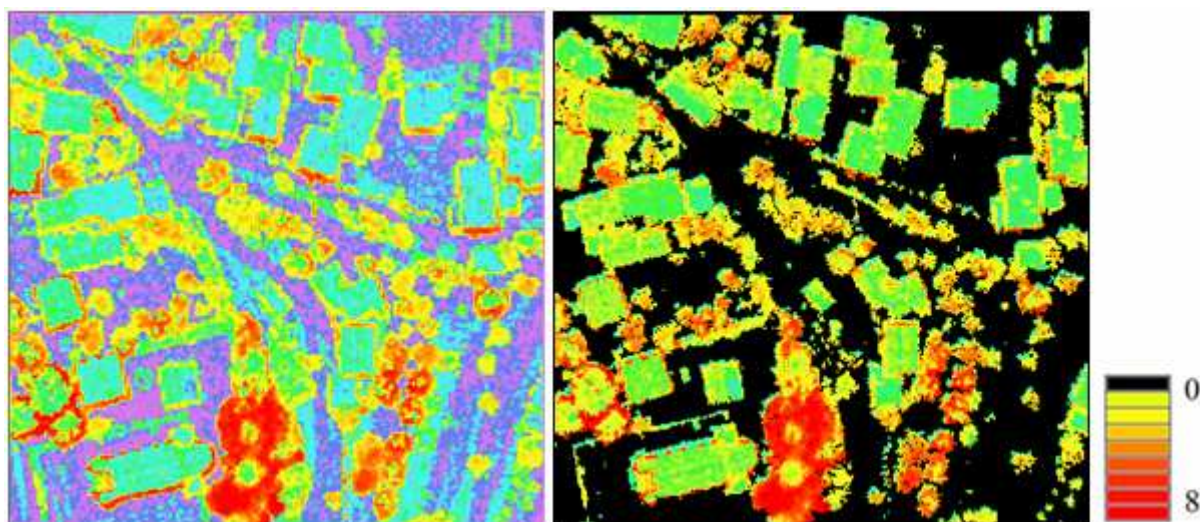
Slika 52: Točke dela območja MB 2 pod mrežo z velikostjo celice 1.5 m.
Fig. 52: Points of part of MB 2 area under net with a 1.5 m cell.

Za vsako celico sem izvedla izračun STD (izračun ni implementiran v program, potrebno ga je bilo sprogramirati). Ker pretvorba mreže z vrednosti pikselov v rastrsko podobo zopet ni

možna, sem za vsako celico izračunala njen centroid (koordinati x in y središča celice), nanj prenesla podatek o STD, centroide z atributi prenesla v tekstovno datoteko ter iz nje s programom Envi izdelala rastrsko podobo, ki sem jo kasneje prenesla v Erdas Imagine.

Omeniti moram, da izračun STD v pikslu, ki ne vsebuje nobene točke, ni izvedljiv, saj imamo opraviti z deljenjem z ničlo. Ker so točke neenakomerno razpršene, sem prišla tudi do takšne situacije. Zato sem v primeru, ko v pikslu ni bilo točk, STD na koncu izračuna popravila na vrednost nič.

Pri prvi izdelavi podobe STD je izračun temeljil na osnovi višin vseh točk. Na sliki 53 levo je prikazana barvna podoba vrednosti STD za celotno območje, na desni pa podoba vrednosti STD za objekte, višje od 1 m. Pri objektih, nižjih od 1 m, je klasifikacija na osnovi spremenljivke STD nesmiselna, saj so vsi ti objekti »ravni« (STD ≈ 0).

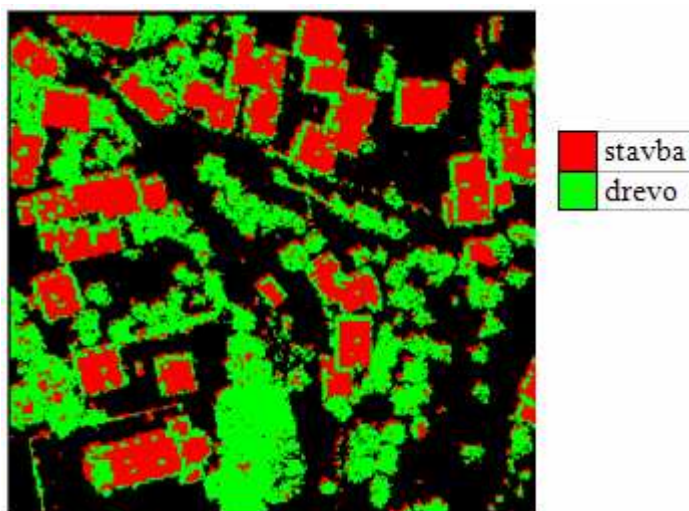


Slika 53: Barvna podoba vseh vrednosti STD (levo) in vrednosti STD za objekte, višje od 1 m (desno).
Fig. 53: Coloured image of all STD values (left) and STD values for objects, higher than 1 m (right).

Uporaba STD

Za razdelitev objektov, višjih od 1 m, na drevesa in stavbe, je treba določiti mejno število STD. Vrednosti, nižje od mejnega števila, bodo predstavljale stavbe (točke na strehi imajo skoraj enako višino), vrednosti, višje od mejnega števila, pa drevesa (točke na drevesu lahko

imajo zelo različne višine). Mejnega števila STD ni mogoče izračunati, zato sem ga določila empirično. Tudi to ni bilo enostavno, saj imajo nekatere strehe velik naklon (večja STD), veliko STD imajo tudi robovi stavb, saj tam STD računamo iz točk na tleh in točk na strehi, dodaten problem predstavljajo goste krošnje nekaterih dreves, ki zaradi neprebojnosti žarka skozi krošnjo STD zmanjšujejo. Na osnovi poskušanja je najboljšo razdelitev nudilo mejno število STD 0,35. Rezultat je prikazan na sliki 54.



Slika 54: Razdelitev dreves (zeleno) in stavb (rdeče) glede na vrednost STD.
Fig. 54: Separation of trees (green) and buildings (red), based on STD values.

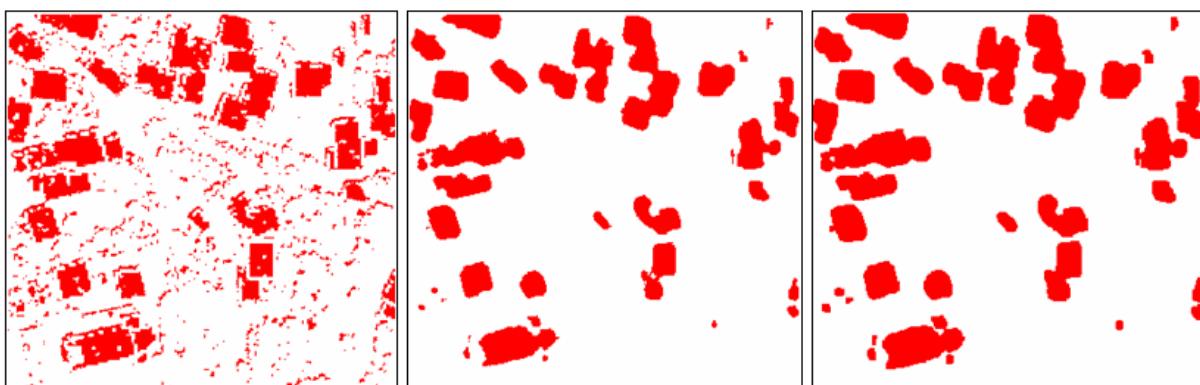
Opazimo lahko, da je klasifikacija na osnovi STD občutno boljša od klasifikacije na osnovi intenzitete (slika 49). Skoraj vse stavbe so pravilno izločene. Problem je njihova oblika ter prisotnost mnogih manjših območij, ki bi jih bilo potrebno odstraniti. Obe omenjeni slabosti sem skušala odpraviti s filtriranjem.

Filtriranje⁹ so metode, ki upoštevajo prostorske razsežnosti podatkov in različna merila na podobah (upoštevajo sosedo) (Oštir, 2006). S filtriranjem želimo, na primer, odstraniti šum na podobah in jih tako zgladiti ali pa poudariti meje med homogenimi območji in povečati njihovo prepoznavnost. V nalogi je filtriranje celotne podobe intenzitete negativno vplivalo na klasifikacijo objektov, zato sem to podobo uporabljala v prvotni, nespremenjeni obliki. Filtriranje pa sem uporabila na podobi objektov, dobljeni na osnovni vrednosti STD. Pri tem sem želela odstraniti majhne objekte, večje objekte pa zapolniti in povečati. Kot primerno se

⁹ Na tem mestu opisujem filtriranje rastra. Filtriranje oblaka lidarskih točk je opisano v poglavju 2.6.1.

je pokazalo konvolucijsko filtriranje, tj. filtriranje, ki uporablja relativno preproste matematične postopke v prostorski domeni. Pri tem uporabljamo premično »okno« velikosti nekaj pikselov, na primer 3 krat 3 ali 5 krat 5... Znotraj okna (računske matrike) opravimo določeno matematično operacijo in v izhodni sloj (v centralni piksel) zapišemo izračunano vrednost. S premikanjem okna vzdolž stolpcev in vrstic celotno podobo filtriramo in ustvarimo novo. S spreminjanjem računskih operacij znotraj okna in uteži, ki jih posamezni pikseli v njem imajo, vplivamo na obliko (učinek) filtra (Oštir, 2006). Z uporabo filtra lahko podatke izboljšamo, vendar moramo biti pri njegovi izbiri zelo pazljivi. Kaj hitro se lahko zgodi, da kaj preveč povečamo, popačimo, izbrišemo...

Za odstranitev majhnih objektov sem uporabila *filter večine (majority)*. Pri tem postopku vrednost vsakega piksla zamenjamo z vrednostjo, ki se najpogosteje nahaja na območju filtra. Učinek filtra je prikazan na podobi stavb (slika 55 levo), kjer sem uporabila filter večine velikosti 7 krat 7 (slika 55 sredina).

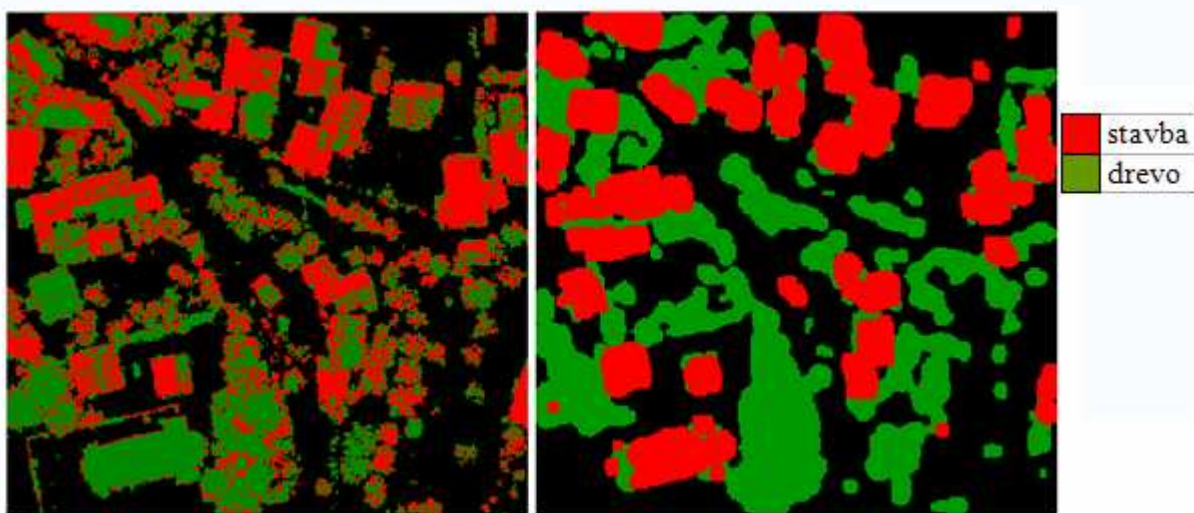


Slika 55: Stavbe po STD (levo), filtrirane s filtrom večine (sredina) in s filtrom največje vrednosti (desno).
Fig. 55: Buildings, based on STD values (left), filtered with majority filter (middle) and max filter (right).

Ker so robovi stavb zaradi velikega STD večinoma »odrezani«, sem vse stavbe, že filtrirane s filtrom večine, povečala s *filtrom največje vrednosti (max)*. Pri tem postopku vrednost vsakega piksla zamenjamo z največjo vrednostjo na območju filtra. Uporabila sem velikost filtra 3 krat 3.

Vpliv STD in filtriranja na obliko objekta

Primerjajmo drevesa in stavbe, dobljena po višinski razdelitvi in klasifikaciji intenzitete (slika 56 levo) z drevesi in stavbami, dobljenimi po klasifikaciji s pomočjo STD ter filtriranjem (slika 56 desno).



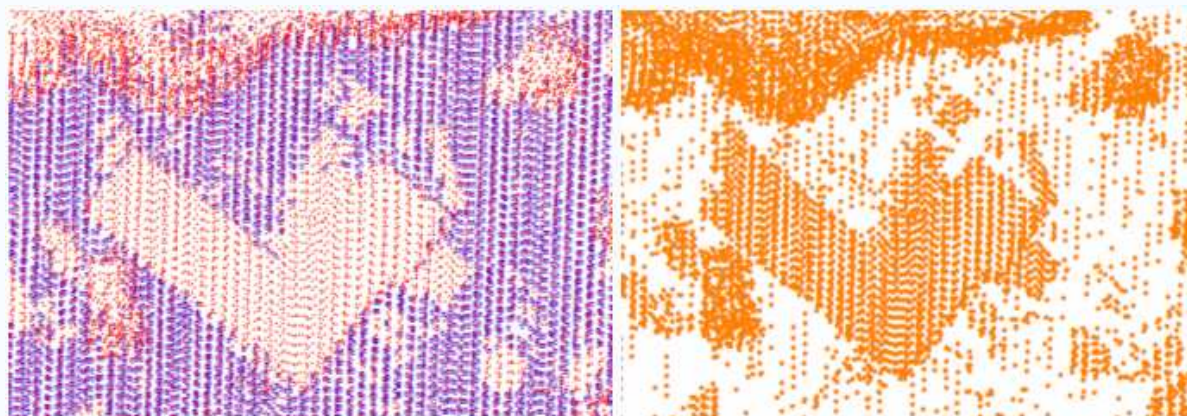
Slika 56: Klasifikacija intenzitete po višinski razdelitvi (levo) ter na osnovi STD in filtriranja (desno).
Fig. 56: Classification of intensity after height separation (left) and based on STD and filtering (right).

Ugotovimo lahko, da se je pravilnost klasifikacije občutno izboljšala. Večjih napak skoraj ni opaziti. Ohranili smo vse stavbe in se hkrati znebili vseh manjših območij, določenih kot stavbe, ki dejansko niso stavbe. Poleg vsebinske izboljšave pa lahko na prvi pogled opazimo tudi precejšnje poslabšanje oblike objektov, predvsem stavb. Poslabšanje oblike je posledica močnega filtriranja, brez katerega pa brez šuma žal ne moremo pridobiti posameznih stavb. Omeniti je prav tako potrebno, da je slabša oblika objektov tudi posledica večje velikosti piksla (1 m) kakor jo je imela podoba višin (0,5 m). Vendar manjše velikosti piksla zaradi premajhne gostote točk nismo mogli izbrati.

Odvisnost STD od vrste točk

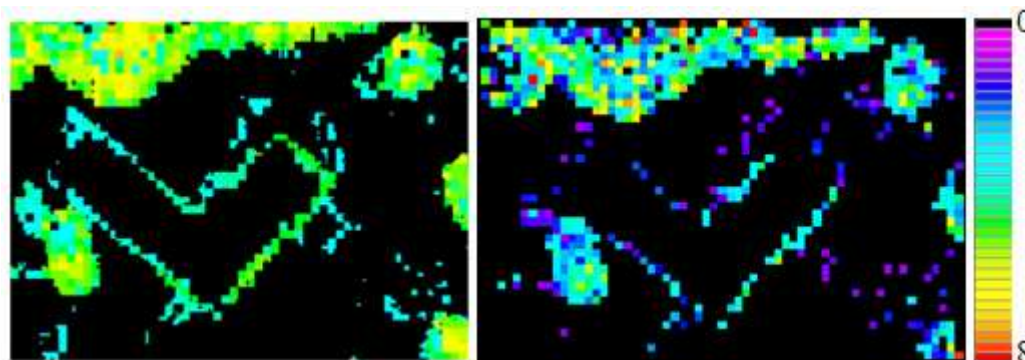
Pred izračunom STD je bilo potrebno razmisliti, katere točke je treba pri izračunu uporabiti. V prvotnem poskusu sem uporabila vse točke in rezultat je bil zelo obetaven. Vendar pa lahko

na podobi STD opazimo, da so moteči piksli, ki se nahajajo na robovih stavb, saj so v teh pikslih zajete talne točke in točke strehe, kar posledično prinaša veliko STD. Prikažimo podrobneje točke okoli stavbe. Na sliki 57 levo so prikazane vse točke (rdeče) in talne točke (modro), na sliki desno pa samo točke, ki ne predstavljajo tal.



Slika 57: Levo – vse točke (rdeče) in talne točke (modro); desno – netalne točke.
Fig. 57: Left – all point (red) and ground points (blue); right – nonground points.

Na sliki 58 je predstavljena podoba STD objektov, višjih od 1 m, pri uporabi vseh točk (slika levo) in pri uporabi netalnih točk (slika desno).

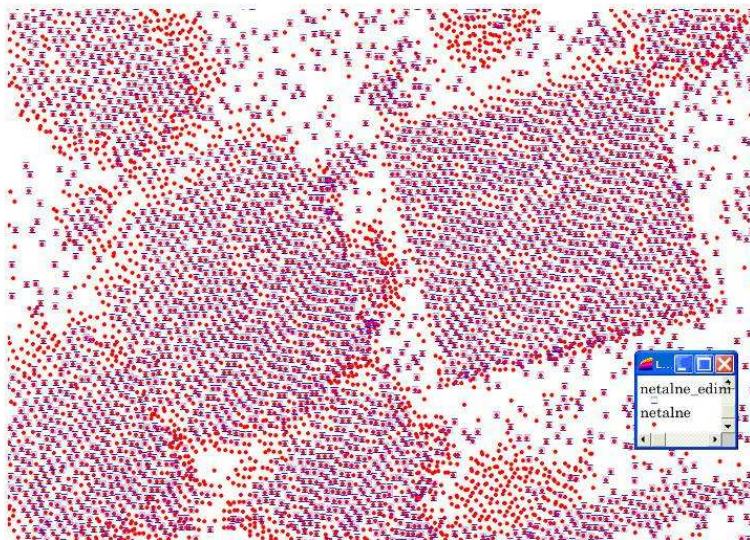


Slika 58: Podoba STD objektov, višjih od 1 m, pri uporabi vseh točk (levo) ter zgolj netalnih točk (desno).
Fig. 58: STD image of objects, higher of 1 m, based on all points (left) and only nonground points (right).

Robov okoli stavb je res precej manj. Vendar se možnost izločitve stavb ne poveča, možnost izločitve dreves pa celo zmanjša, saj izločimo točke, ki ležijo pod drevesi in pomembno pripomorejo k povečavi vrednosti STD pod drevesi.

Druga možnost za boljšo ločitev dreves in stavb se je kazala v ločitvi vseh netalnih točk (na sliki 59 rdeče) od točk reda edini (na sliki 59 modre). Strehe so za žarke namreč neprebojne,

zato bi na njihovi površini pričakovali zgolj točke reda edini. Krošnje so za žarek prebojne, zato naj bi bilo tam teh točk manj.



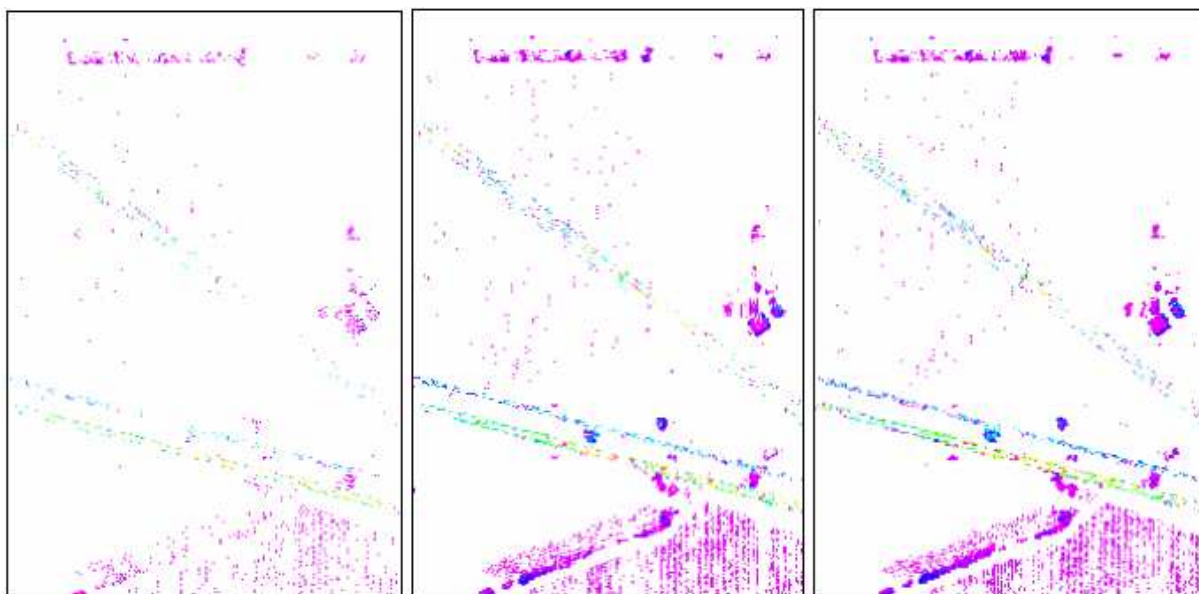
Slika 59: Primerjava netalnih točk (rdeče) ter točk reda edini (modre).
Fig. 59: Comparison of nonground points (red) and points type single (blue).

Vendar pa je opaziti, da je gostota točk reda edini približno enaka tako na strehah kakor na krošnjah. Razlog je verjetno v tem, da so krošnje precej goste (morda bi morali snemati v drugem letnem času), strehe pa imajo nezanemarljiv naklon.

Zaradi zgoraj navedenih razlogov sem v nadaljevanju STD računala iz vseh točk.

Odvisnost STD od velikosti piksla

Kot sem že omenila, je izračun STD izvedljiv samo v primeru, ko je točka v pikslu vsaj ena. Dodati moram, da je smiselno šele v primeru, ko sta v pikslu točki vsaj dve (ena točka ne more biti razpršena). Zato je treba glede na gostoto točk izbrati najbolj optimalno velikost piksla. Za testiranje koristnosti STD glede na izbrano velikost piksla sem uporabila območje MB 1. Za celotno območje sem izračunala STD za objekte, višje od 1 m pri velikosti pikslov 1 m, 1,5 m in 2 m (na sliki 60 od leve proti desni). Povprečna gostota točk na tem območju je 1,5 točke / m², kar je za ZLS malo.



Slika 60: Podoba STD območja MB 1 za objekte, višje od 1 m, pri velikosti pikslov 1 m, 1,5 m in 2 m (po vrsti).
Fig. 60: STD image of MB 1 area for objects, higher than 1 m, at 1 m, 1,5 m and 2 m pixel size (respectively).

Izseki (ločitev drevesa in stavbe po STD 1 m, 1,5 m, 2 m) so prikazani na sliki 61.



Slika 61: Izsek podob na sliki 60.
Fig. 61: Detail of images on figure 60.

Opazimo lahko, da je točk premalo, da bi STD računali v mreži z velikostjo celice 1 m. V objektih nastajajo luknje, STD dreves in stavb se ne razlikujejo. Boljše rezultate da STD, izračunana v mreži z 1,5 m velikimi celicami, najboljše razlikovanje pa nudi STD, izračunana na celice velikosti 2 krat 2 m. Žal imajo robovi stavbe veliko STD in jih morda ne bomo mogli izločiti. Velika celica lahko zajame tudi velik del strehe, ki ima značilno majhno STD, vendar pa je lahko na velikem območju naklon strehe že tako velik, da se vrednost STD strehe približa vrednosti STD drevesa, zato izbira prevelike celice tudi ni racionalna. Za vsa območja MB sem kot optimalno za izračun STD izbrala velikost piksla 1,5 m, za Slivnico pa 1 m, saj je tam gostota točk večja ($8,3 \text{ točke/m}^2$). Pravilnost izbire velikosti piksla, določene na osnovi vizualne primerjave dobljenih podob, so potrdili tudi rezultati enačbe za določitev optimalne ločljivosti celice, ki so jo na ZRC SAZU modificirali po Henglu (Hengl, 2006):

$$r \approx 2 \cdot \sqrt{\frac{S}{N}} \quad (9)$$

kjer je r velikost piksla, S velikost celice, za katero poznamo število točk, in N število točk v celici.

Za območja Maribora je po tej enačbi priporočljiva velikost piksla 1,63 m, za območje Slivnice pa 1,05 m.

Odvisnost STD od lokacije piksla

Mreža za izračun STD je položena čez celotno območje vseh točk. Njene celice so enakomerno razporejene, zato na lokacijo posamezne celice ne moremo vplivati. V večini primerov nas to ne moti in nima vpliva na klasifikacijo objektov. Moteči pa so primeri, ko celica zajame del stavbe in del tal. Tam je STD velika in tisti piksel bomo razporedili v razred z drevesi. Podobna situacija se pojavi tudi v primeru, ko ima stavba »stopničasto« obliko (večnivojska streha). Kot se vidi na zgornjih slikah, je takšnih primerov precej in nanje ne moremo vplivati.

Gostota točk in uporabnost statistike STD

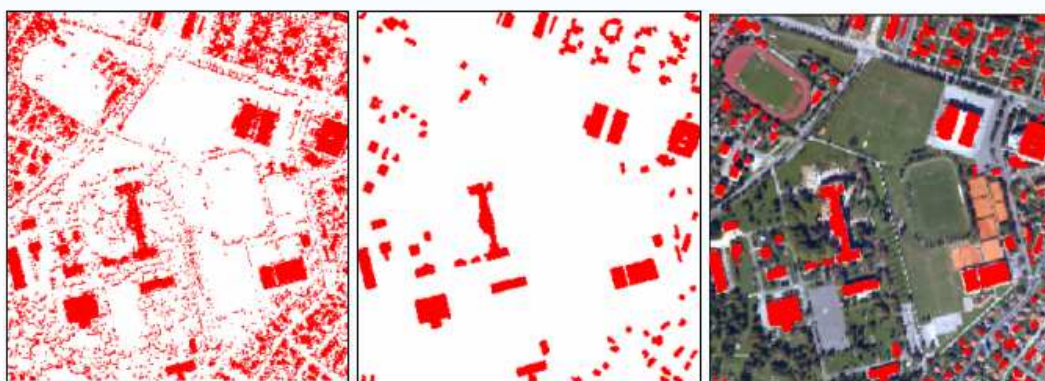
Na primeru Slivnice sem ugotovila, da je uvedba STD zelo smiselna za kategorizacijo dreves in stavb. Pravilno smo izločili praktično vse stavbe in drevesa (govorim o lokaciji teh objektov, njihova oblika je obravnavana kasneje). Kako uspešna se je STD izkazala na območju MB 2, je prikazano na sliki 62.



Slika 62: Klasifikacija dreves na osnovi STD na območju MB 2.
Fig. 62: Classification of trees, based on STD, in area MB 2.

Nekatera večja drevesa, ki stojijo samostojno, sem izločila pravilno. Drevesa, ki so poleg stavb, so se v večini primerov spojila s slednjimi. Nekateri robovi stavb so se izločili kot drevesa. Splošna ugotovitev: izločitev dreves na osnovi STD na tem območju ni uspela. Razlog: premajhna gostota točk ($2,3$ točke/ m^2).

Prikažimo še primer izločitve stavb na osnovi STD na območju MB 3 (slika 63 od leve proti desni: stavbe po STD, filtriranje ter prikaz stavb na BDOF1).



Slika 63: Stavbe po STD, filtriranje stavb ter prikaz stavb na BDOF1 (območje MB 3).
Fig. 63: Buildings, based on STD, building filtering and review of buildings on DOF (MB 3 area).

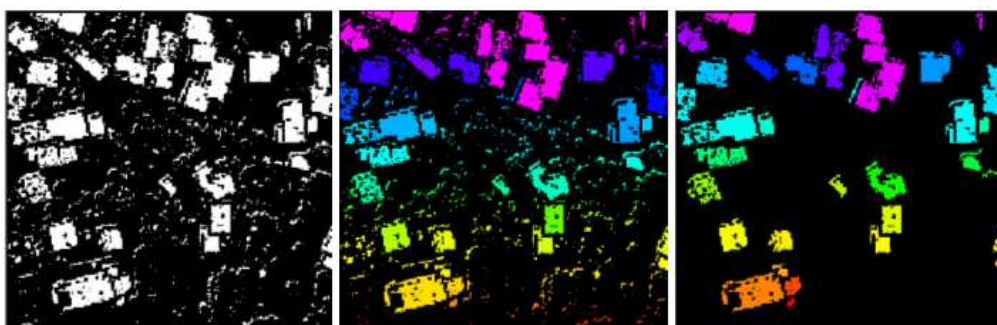
Učinkovitost klasifikacije na osnovi STD je odvisna tudi od normativov, ki jih določimo kot mejo za uspešnost klasifikacije. Če želimo na tem območju izločiti samo večje stavbe (tloris nad $100 m^2$, lahko smatramo to klasifikacijo za uspešno. Če pa želimo izločiti tudi vse manjše stavbe in vrtno lope, se klasifikacija na osnovi STD pri tej gostoti točk izkaže za neuspešno ($3,3$ točke/ m^2).

6.4 Uvedba funkcij združi in presej

V prejšnjem poglavju smo ugotovili, da je v primeru zadostne gostote točk uporaba STD zadostna mera za pravilno izločitev dreves in stavb. Žal pa oblika objektov precej odstopa od dejanskega stanja. To je posledica mnogih faktorjev, prav tako opisanih v prejšnjem poglavju, večino krivde za popačenje oblike pa nosi postopek filtriranja, saj sem morala zaradi velikega šuma uporabiti precej močne filtre. Težava se mi je zdela rešljiva, če bi pred uporabo filtra šum kar se da zmanjšala. To sem storila z uvedbo funkcij združi in presej (ang. clump and sieve), vsebovanih v programu Erdas Imagine.

Funkcija »združi« omogoča, da na osnovi primerjave štirih oz. osmih sosednjih pikslov združi piksele v posamezne skupine. Vsaki skupini dodeli enolično identifikacijsko številko ter število pikslov v tej skupini (slika 64 sredina – vsaka skupina je obarvana s svojo barvo).

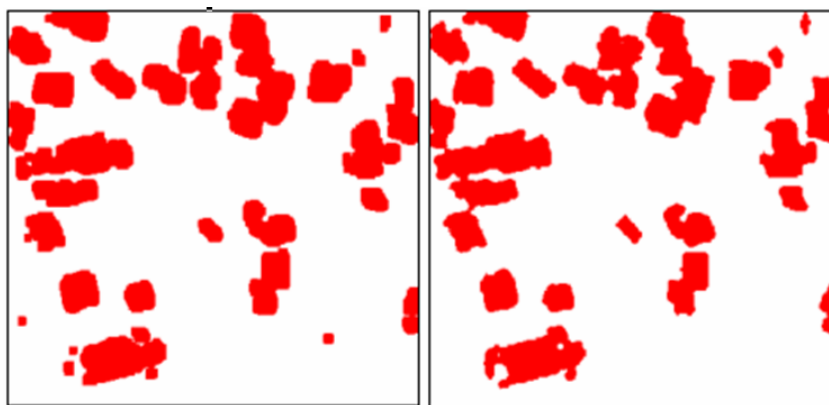
Funkcija »presej« predstavlja sito za podobo združenih pikslov. Kot vhodni podatek določimo, koliko pikslov najmanj mora vsebovati skupina pikslov, da jo ohranimo na podobi. Povedano drugače: izločimo lahko vse skupine, ki so sestavljene iz manj kot določenega števila pikslov. S tem se znebimo zelo majhnih objektov, ki dejansko predstavljajo šum (slika 64 desno).



Slika 64: Stavbe, dobljene na osnovi STD (levo) ter učinek funkcije združi (sredina) ter presej (desno).
Fig. 64: Buildings, based on STD (left), and effect of functions clump (middle) and sieve (right).

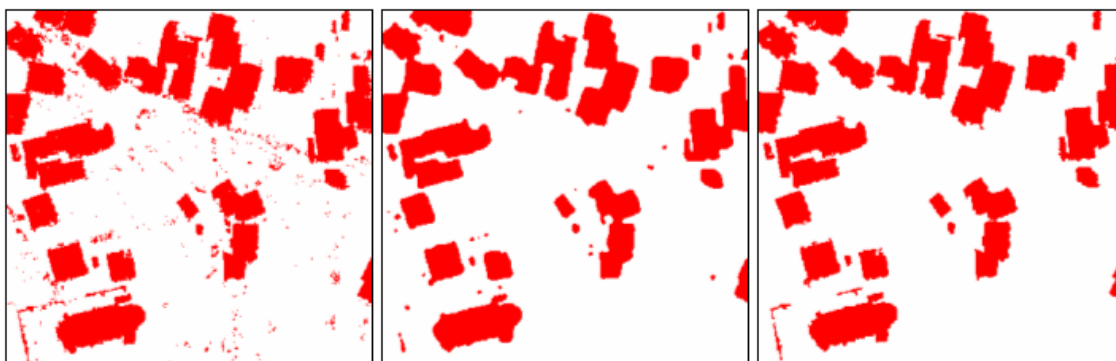
Čeprav sta funkciji enostavni, je treba pred vnosom vhodnih parametrov dobro preučiti katere piksele želimo združiti in kako velike objekte želimo obdržati. Pri funkciji združi sem temeljila na primerjavi štirih sosednjih pikslov, nad sitom pa sem skušala obdržati vse stavbe, vključno z lesenimi lopami.

Z uporabo funkcij združi in presej sem obdržala obliko stavb, določeno s STD, znebila pa sem se vseh delov, ki predstavljajo šum. Pod takšnimi pogoji lahko uporabim manjši filter, ki bo posledično tudi manj popačil oblike stavb. Uporabila sem filter največje vrednosti 3 krat 3 in filter večine 5 krat 5. Na sliki 65 lahko primerjamo stavbe, kot smo jih dobili po prvotnem filtriranju (slika levo) ter stavbe, ki smo jih spustili skozi filter po uporabi funkcij združi in presej (slika desno).



Slika 65: Prvotno filtrirane stavbe (levo) ter filtriranje po uporabi funkcij združi in presej (desno).
Fig. 65: Basic filtering (left) and filtering after use of functions clump and sieve (right).

Oblika je pri uvedbi funkcij združi in presej boljše ohranjena, majhnih, odvečnih območij ni več. Pokažimo rezultat enake zgodbe za klasifikacijo stavb na osnovi BDOF1 (slika 66). Za prvotno filtriranje sem dvakrat uporabila filter večine 7 krat 7, za filtriranje po uvedbi funkcij združi in presej pa filter večine 5 krat 5.



Slika 66: Stavbe po STD (levo), prvotno filtrirane stavbe (sredina) ter uporaba funkcij združi in presej (desno).
Fig. 66: Buildings, based on STD (left), basic filtering (middle) and use of functions clump and sieve (right).

Ugotovitve so enake. Uspešno smo odstranili šum in skoraj v celoti ohranili obliko stavb.

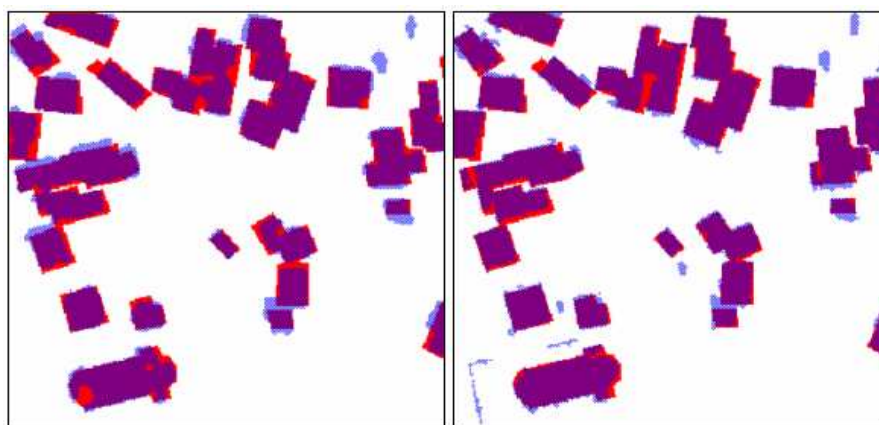
Kakovost določitve stavb

Za ugotovitev kakovosti izločitve stavb sem na osnovi BDOF1 v MapInfu ročno vektorizirala vse stavbe (slika 67 levo) in jih pretvorila v rastrsko obliko (slika desno). Slika 67 desno predstavlja najboljšo možno klasifikacijo stavb.



Slika 67: Ročno vektorizirane stavbe v vektorski (levo) in rastrski (desno) obliki.
Fig. 67: Manually vectorised buildings in a vector (left) and raster (right) form.

Na podobo teoretično najboljše določenih stavb položimo stavbe, dobljene na osnovi lidarskih podatkov (slika 68 levo) ter stavbe, dobljene s klasifikacijo BDOF1 (slika 68 desno).



Slika 68: Stavbe iz lidarskih podatkov (levo) ter stavbe iz BDOF1 (desno) na ročno izločenih stavbah.
Fig. 68: Buildings from lidar data (left) and DOF (right) on manually defined buildings.

Ugotovimo lahko, da se tako stavbe, dobljene na osnovi lidarskih podatkov, kakor tudi stavbe, dobljene na osnovi BDOF1, odlično ujemajo z dejanskimi stavbami. To sem potrdila tudi s izračunom korelacije, ki za stavbe, klasificirane na osnovi lidarskih podatkov, znaša 0,94, za stavbe, klasificirane na osnovi BDOF1 pa 0,95.

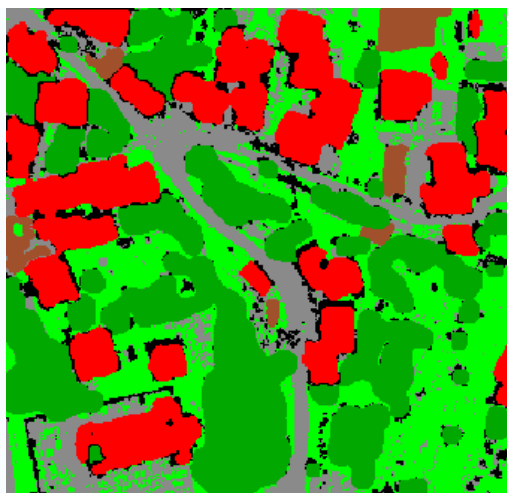
Morebitno neujemanje je tudi posledica subjektivnih odločitev osebe, ki je stavbe vektorizirala. Opazi se, da pri ročni vektorizaciji nisem zajela nekaj »stavb«, ki se mi niso zdele stavbe (npr. desno zgoraj). Izločitev stavb po obeh avtomatskih metodah (po STD ter po BDOF1) bi lahko nadomestila ročno, dolgotrajno in subjektivno vektorizacijo.

Položajna natančnost

Položajna natančnost je v prvi vrsti pogojena s položajno natančnostjo lidarja. Ta na območju Slivnice znaša 0,3 m (Pavlek, 2007). Natančnost položaja tudi ne more biti boljša od velikosti piksla, ki je odvisen od gostote točk in tako za Slivnico znaša 1 m. Prav tako je odvisna od parametrov funkcij združi in presej ter predvsem filtra, s katerimi objekte dokončno klasificiramo. Na osnovi navedenega in nekaj meritev razlik med stavbami, vektoriziranimi na BDOF1, in klasificiranimi stavbami sklepam, da se na primeru klasifikacije območja Slivnice položajna natančnost nahaja med 1 - 2 m in je zaradi »učinka sence«¹⁰ neenakomerno razporejena.

Združitev klasificiranih objektov

Po zgoraj opisani metodologiji lahko dobro izločimo posamezne razrede. Vendar pa lahko pri njihovi združitvi opazimo luknje in prekrivanja (slika 69), ki jih je treba odpraviti.



Legenda: ■ stavba ■ drevo ■ asfalt ■ trava ■ njiva ■ luknja

Slika 69: Združitev stavb in dreves s tlemi.
Fig. 69: Fusion of trees and buildings with ground.

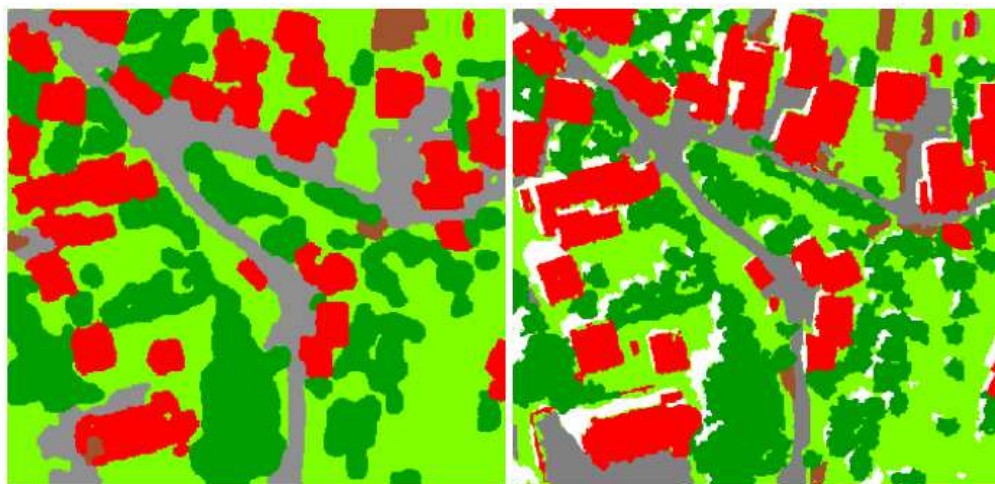
¹⁰ "Shadow effect" – lastnost lidarskih podatkov, pri katerem je npr. dvokapna streha na strani preleta letala oz. na strani, katere površina je bolj pravokotna na žarek snemanja, večja od dejanskih dimenzij, manjša pa na strani, kjer žarek pada na streho pod večjim kotom (Pavlek, 2007).

To sem rešila z določitvijo prioritete liste, po kateri sem klasificirala objekte. Povedano drugače: določila sem vrsti red slojev posameznih razredov, in sicer (od najpomembnejše navzdol): stavbe, drevesa, njive, asfalt in trava.

To pomeni, da sem najprej klasificirala stavbe, nato iz sloja objektov, višjih od 1 m, izrezala stavbe in podobo razlik vzela kot vhodni podatek za klasifikacijo dreves. Nato sem zopet od dobljenih dreves izrezala stavbe. Dobila sem sloj končnih stavb in dreves. Ta sloj sem izrezala iz podobe intenzitete ter dobljeno podobo razlik klasificirala na toliko razredov, da sem lahko izločila njive. Iz sloja končno oblikovanih njiv sem izrezala drevesa in stavbe. Po identičnem postopku sem nadaljevala še z asfaltom. Vse piksele, ki so ostali, sem dodala v razred trava.

Po enaki metodologiji sem obdelala tudi objekte, ki sem jih dobila na osnovi BDOF1.

Končne klasificirane podobe so prikazane na sliki 70 (levo: klasifikacija na osnovi lidarskih podatkov, desno: klasifikacija na osnovi BDOF1).



Legenda: ■ stavba ■ drevo ■ asfalt ■ trava ■ njiva □ senca

Slika 70: Končna podoba klasifikacije na osnovi lidarskih podatkov (levo) in podatkov BDOF1 (desno).

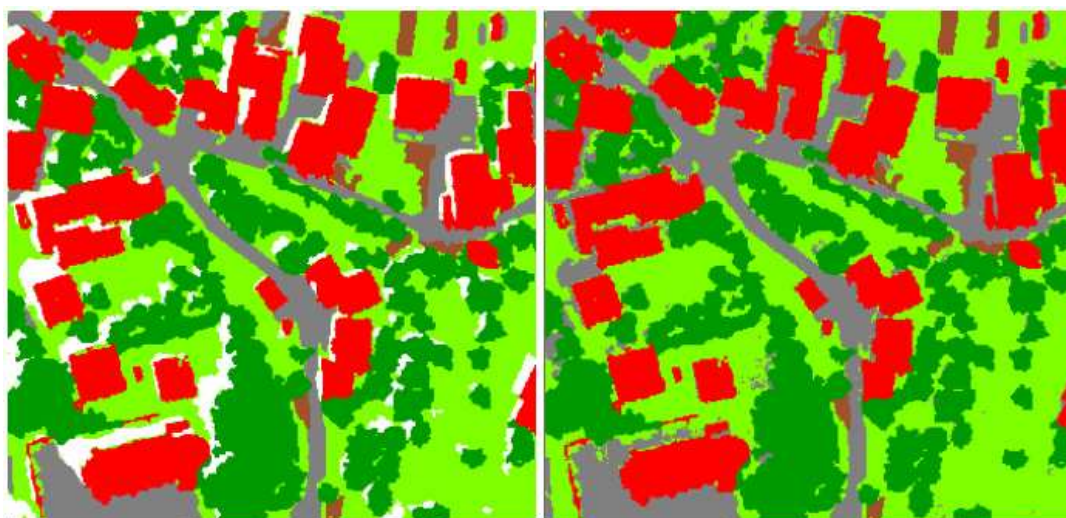
Fig. 70: Final classification image, based on lidar data (left) and DOF (right).

Podobi vsaka na svoj način dobro klasificirata objekte. Klasifikacija na BDOF1 ohrani oblike, vendar vsebuje precej velika območja senc, ki bi jih bilo potrebno v nadaljnji obdelavi odstraniti. Klasifikacija na osnovi lidarskih podatkov sicer malo popači oblike, vendar pa so objekti lokacijsko precej dobro definirani.

Velikokrat izvajamo klasifikacijo zato, da bi podatke lahko obdelovali z orodji GIS. Za ta namen potrebujemo vektorske podatke (poligone objektov). Čeprav klasifikacija na slikah 70 morda na videz ni zelo drugačna od klasifikacije pred uvedbo funkcij združi in presej, pa je odstranitev majhnih območij zelo pomembna za samodejno vektorizacijo podatkov. S podatki, kot jih imamo na voljo sedaj, je to izvedljivo.

6.5 Uporaba klasifikacije lidarskih podatkov pri sencah BDOF1

V prejšnjem poglavju smo ugotovili, da pri sicer uspešni klasifikaciji na osnovi BDOF1 predstavljajo velik problem območja senc, saj so vsa klasificirana kot poseben razred. Po drugi strani meritve ZLS zaradi uporabe aktivnega senzorja niso odvisne od časa zajema, t. j. od dnevne svetlobe, kot tudi niso obremenjene s sencami. Prav tako na zajem ne vplivajo vremenske razmere – oblaki. Zato senc na tej podobi ni. Poskusimo izkoristiti to prednost laserskih podatkov in območja, na katerih BDOF1 prekrivajo sence, klasificirati z intenziteto.



Legenda: ■ stavba ■ drevo ■ asfalt ■ trava ■ njiva senca

Slika 71: Klasifikacija BDOF1, ki vključuje sence (levo) ter podoba, kjer so sence nadomeščene s klasifikacijo lidarskih podatkov (desno).

Fig. 71: Classification of DOF, which includes shades (left) and an image, where shades are replaced with classification of lidar data (right).

Na sliki 71 levo je prikazana končna klasifikacija na osnovi BDOF1, ki vsebuje sence. Na desni strani slike 71 je prikazana ista podoba kot na levi, le da sem v tem primeru območja

senc izvzela, jih klasificirala s pomočjo intenzitete lidarskih podatkov ter jih ponovno vstavila v podobo klasificiranih objektov.

Ker je na osnovi intenzitete možno zelo dobro med seboj ločiti travo in asfalt, sem območja senc uspešno nadomestila, saj sence večinoma prekrivajo omenjena razreda. Malo težav povzroča zbita trava, kjer je vidno veliko zemlje, saj se ta območja zelo težko ločijo od asfalta. Vsekakor so bila območja senc z upoštevanjem intenzitete lidarskih podatkov uspešno klasificirana v razrede, kar je dokončno izpopolnilo podobo klasifikacije na osnovi BDOF1.

6.6 Uvedba načinov izboljšav, ugotovljenih s podrobnejšo analizo lidarskih podatkov

Klasifikacijo, ki sem jo do sedaj obravnavala v nalogi, sem izvedla na osnovi intenzitete, katere vrednosti od samega sprejema signala do uporabe niso bile obdelane. Ker se da rezultate z obdelavo podatkov navadno izboljšati, sem se za določitev glavnih spremenljivk naslonila na zelo posplošeno enačbo za izračun intenzitete:

$$I = \frac{\rho \cdot \cos(\xi)}{R^2} \quad (10)$$

Iz enačbe 10 razberemo, da je na istem objektu (teoretično enak ρ), intenziteta obratno sorazmerna s kvadratom merjene razdalje od senzorja do tarče (R) ter premo sorazmerna s kosinusom vpadnega kota laserskega žarka na tarčo (ξ). Daleč najpomembnejša spremenljivka, ki jo moramo pri popravku intenzitete upoštevati, je torej razdalja R , zato sem njen vpliv skušala analizirati na praktičnih podatkih. Kot je razvidno iz nadaljevanja naloge, popravki intenzitete za razdaljo senzor – tarča precej »stabilizirajo« podobo intenzitete, vendar občutno ne povečajo možnosti klasifikacije. Iz tega razloga nisem uvajala ostalih popravkov, kot so popravek za vpadni kot laserskega žarka na tarčo, popravek za kot snemanja, itd., saj zaradi precej majhnih kotov snemanja in nagibov terena k izboljšavi klasifikacije ne bi doprinesli.

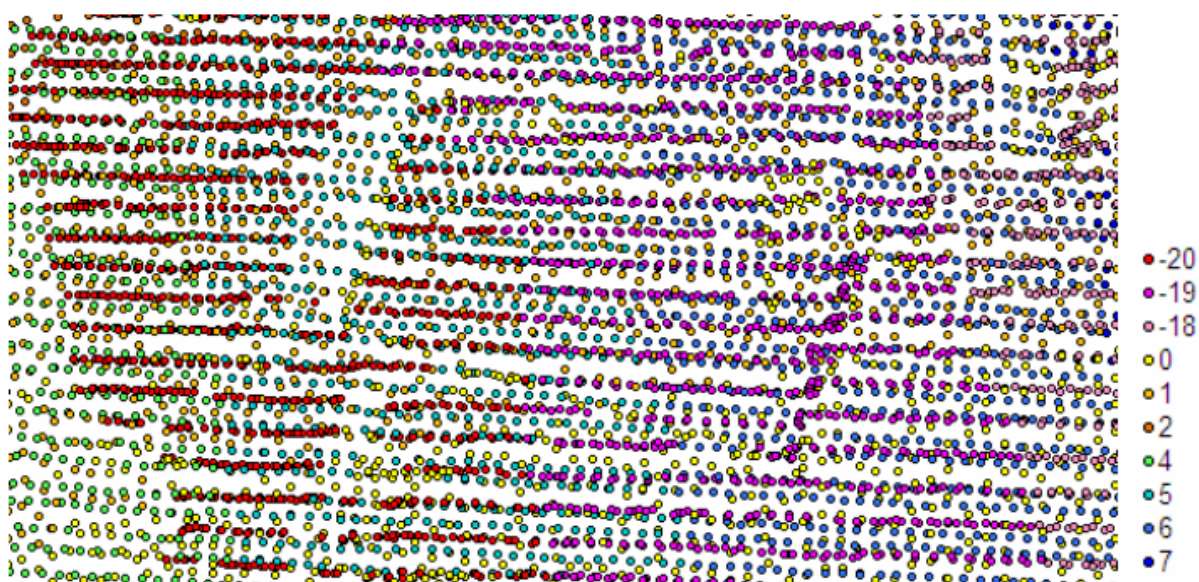
Poleg omenjenih spremenljivk, za katere vemo, da vplivajo na intenziteto, sem preverila tudi vpliv reda odboja signala na intenziteto, čeprav v literaturi tej spremenljivki nihče ne posveča pozornosti. Rezultati so pokazali, da je informacija o redu odboja vredno upoštevati.

6.6.1 Vpliv višine snemanja na intenziteto

Podatki, na katerih sem temeljila, žal niso vsebovali informacije o razdalji senzorja do tarče, zato natančne določitve odvisnosti intenzitete od razdalje nisem mogla določiti. Raziskave sem se zato lotila malenkost drugače, pri čemer so rezultati še vedno obetali dovolj dober približek za ugotovitev odvisnosti ter vpeljavo morebitnih popravkov.

Najprej sem se naslonila na sklep, da je razdalja R v prvi vrsti odvisna od višine snemanja (višine leta letala nad površino zemlje), le-ta pa se spreminja glede na serijo (pas) snemanja. Poleg že omenjene neznanne razdalje R sem se morala soočiti z novo neznancko: številka serije, v kateri je bila točka posneta. Za območje, zajeto na testnih podobah, nisem vedela niti s kolikšnimi serijami so bile točke na njem posnete, kaj šele katera točka pripada kateri seriji.

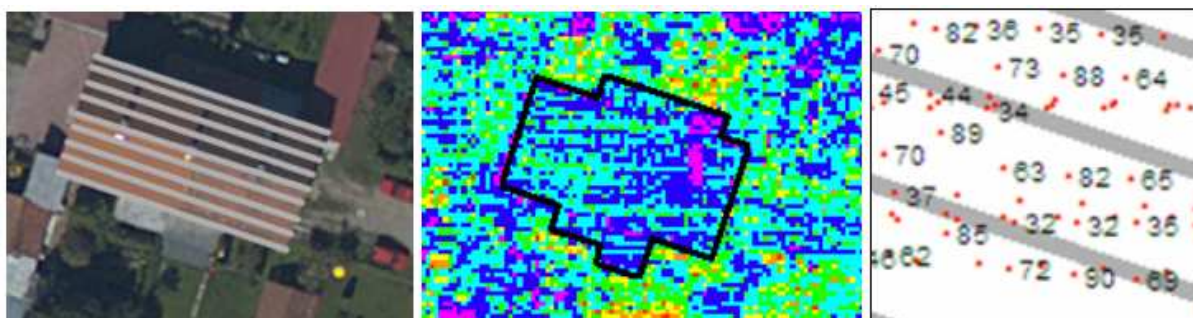
Točke sem tematsko obarvala glede na kot snemanja (slika 72), ki sem ga lahko določila.



Slika 72: Točke glede na kot snemanja.
Fig. 72: Points, based on viewing angle.

Opazila sem, da so bile točke, zajete pod koti -20° , -19° in -18° , zajete v smeri vzhod - zahod. Tudi točke, zajete pod koti 4° - 7° , nakazujejo smer snemanja, in sicer zahod – vzhod. Točke, ki so bile zajete pod koti 0° - 2° , ne nakazujejo smeri snemanja, poljubno so namreč razvrščene po prostoru. Na osnovi teh opažanj sem sklepala, da so bile točke posnete v vsaj treh serijah, ki so zajemale točke pod koti iz zgoraj navedenih skupin (serija 1: koti -20° do -18° , serija 2: koti 4° do 7° , serija 3: koti 0° do 2°).

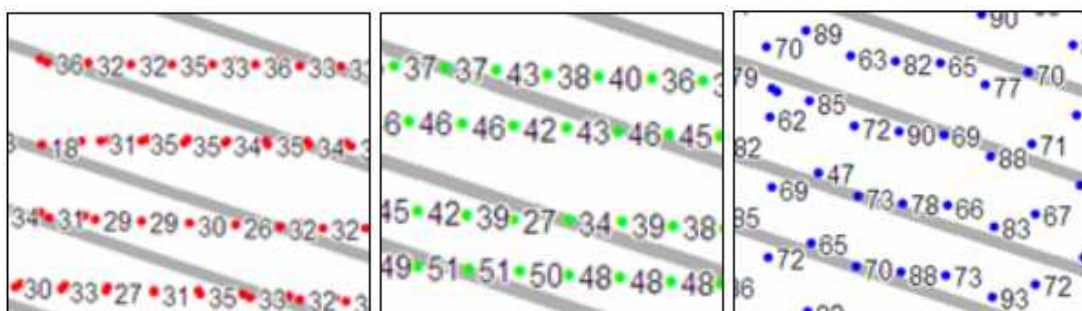
Če sem želela narediti analizo intenzitete, sem morala uporabiti samo podatke, ki se nanašajo na en objekt (zaradi teoretične izločitve spremenljivke ρ). Izbrala sem streho stavbe v območju MB 3, na katero sem dodatno narisala linije enake višine, da sem lahko opazovala vrednosti intenzitete pri isti višini (slika 73 levo). Prikažimo na tem območju podobo obarvane intenzitete – odboji reda prvi in edini (slika 73 sredina) ter izsek z nekaj vrednostmi intenzitete (slika 73 desno).



Slika 73: Linije enakih višin na strehi stavbe (levo), podoba intenzitete (sredina) ter izsek nekaj vrednosti intenzitete (desno).

Fig. 73: Lines of the same heights on building roof (left), intensity image (middle) and detail of intensity values on the roof (right).

Primer na sliki 73 daje občutek, da so vrednosti zelo poljubno razdeljene, tako znotraj iste strehe, kakor tudi v okolici. Če razdelimo vrednosti intenzitete glede na predvidene serije, dobimo (slika 74, od leve proti desni: serija 1, 2 in 3).

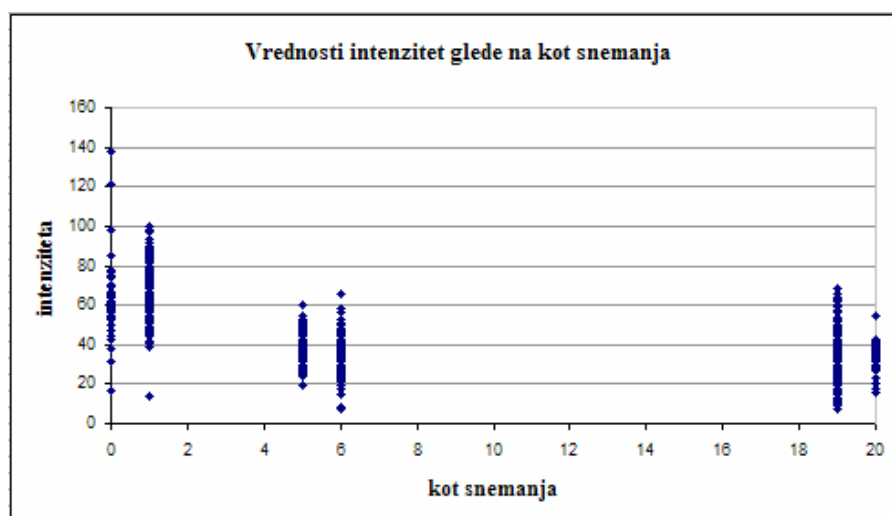


Slika 74: Izsek vrednosti intenzitete strehe točk serije 1, 2 in 3 (od leve proti desni).
Fig. 74: Detail of intensity values on the roof of series 1, 2 and 3 (respectively).

Na sliki 74 opazimo:

- vrednosti intenzitete znotraj ene serije so bistveno bolj enotne kakor iz vseh serij skupaj,
- vpliva različnih oddaljenosti tarče od sensorja zaradi naklona strehe ni opaziti,
- vrednosti intenzitete v tretji seriji so precej višje, vendar tega dejstva ne moremo pripisati zelo malemu kotu snemanja (0° do 2°), saj kot 4° ni toliko večji od 2° , da bi se lahko intenziteta tako znižala, ampak je letalo v seriji 3 po vsej verjetnosti letelo precej nižje kakor v drugih dveh serijah.

Na osnovi opazovanj sem sklepala, da razdalja R pomembno vpliva na intenziteto. Z uvedbo popravka bi vrednosti intenzitete poenotili in s tem morda izboljšali klasifikacijo. Kako pridobiti faktor popravka? Prikažimo relacije med absolutnimi koti snemanja ter intenzitetami na grafikonu (grafikon 1).



Grafikon 1: Odvisnost intenzitete od absolutnega kota snemanja.
Graph. 1: Intensity dependence of absolute viewing angle.

Ne moremo sklepati, da se vrednost intenzitete sistematično zmanjšuje s kotom snemanja. Grafikon je bližje teoriji, da so vrednosti intenzitete odvisne od serije snemanja. Zato sem za posamezno serijo izračunala nekatere statistične vrednosti: povprečni kot (absolutni), povprečna intenziteta ter standardna deviacija intenzitete znotraj posamezne serije (graf. 2).



serija	kot_avg	int_avg	int_std
3	0.82	69.31	14.38
2	5.39	39.06	8.06
1	19.21	32.64	8.17

Grafikon 2: Statistika vrednosti intenzitete glede na serije.
Graph. 2: Statistics of intensity values in view of individual series.

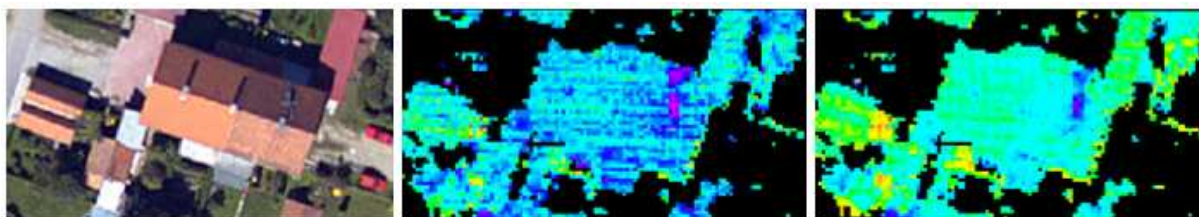
Povezava točk povprečnih vrednosti nakazuje krivuljo druge stopnje. To ustreza osnovni enačbi radarja, ki pravi, da intenziteta pada s kvadratom razdalje od senzorja do tarče. Na sicer empiričen način sem to odvisnost potrdila.

Kako podatke poenotiti? Če pogledamo standardne deviacije intenzitet znotraj posamezne serije (na istem objektu) ni težko opaziti, da so precej visoke. Na tem dejstvu sem temeljila sklep, da je dovolj, če vrednosti intenzitet vseh točk v posamezni seriji popravimo za isti faktor. Za izračun faktorjev popravka imamo dve možnosti. Lahko si izberemo eno matično serijo snemanja, in vrednosti intenzitet drugih dveh skupin priredimo tem vrednostim, lahko pa si izberemo neko poljubno vrednost in vse serije prilagodimo tej. Sama sem se odločila, da bo serija 3 (majhni koti) matična. Za izračun faktorjev popravka sem izhajala iz srednjih vrednosti. Tako sem dobila faktorje popravka, ki jih navaja preglednica 6.

Preglednica 6: Faktor popravka za posamezno serijo.
Table 6: Correction factor for individual series.

Seriya	Faktor popravka
3	1,0
2	1,8
1	2,1

V nadaljevanju je treba vrednosti intenzitet vseh točk pomnožiti z ustreznim faktorjem popravka. Rezultat, ki sem ga dobila, je prikazan na sliki 75 (levo: BDOF1, sredina: prikaz prvotnih vrednosti intenzitete objektov, višjih od 1 m, desno: prikaz popravljenih vrednosti intenzitete objektov, višjih od 1 m).



Slika 75: Od leve proti desni: BDOF1, prvotna podoba intenzitete, popravljena podoba intenzitete.
Fig. 75: From left to right: DOF, original intensity image, corrected intensity image.

Podobo intenzitete sem z uvedbo popravkov glede na višino snemanja močno poenotila. To potrjuje tudi statistika podatkov, prikazana v preglednici 7.

Preglednica 7: Statistika intenzitete na strehi stavbe.
Table 7: Statistics of intensity on building roof.

	Povprečje	STD
Prvotna intenziteta	51,8	25,1
Popravljen intenziteta	81,9	27,0

Relativna standardna deviacija popravljen intenzitete je precej manjša glede na povprečno vrednost (prej 48 %, zdaj 33 %). Kot takšna je veliko primernejša za klasifikacijo objektov, čeprav bo le-ta še vedno zelo težavna (drevesa in stavbe na sliki 75 imajo zelo podobne vrednosti).

Če bi za vsako točko poznala atribut R , potem bi lahko podatke bolje izboljšala. Takrat bi izhajala iz zelo splošene enačbe:

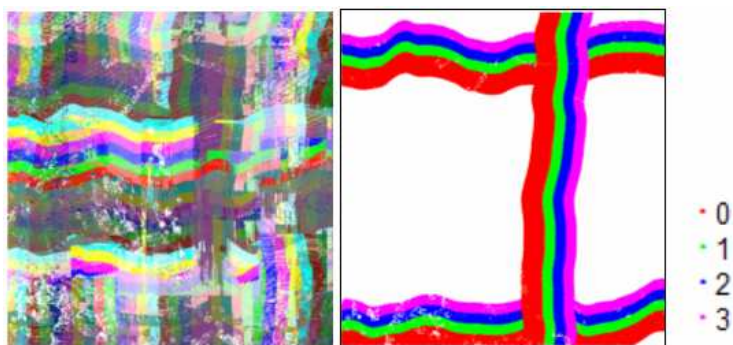
$$I = \frac{\rho}{R^2} \quad (11)$$

Pri istem objektu je ρ isti, zato za identični točki, posneti v serijah i in j velja:

$$\rho = I_i \cdot R_i^2 = I_j \cdot R_j^2 \quad (12)$$

Ker se objekti med seboj razlikujejo po koeficientu odbojnosti tarče (ρ), bi po zgornji enačbi (12) za vsako točko (ne glede na serijo snemanja) izračunala omenjeno vrednost. Dobljene vrednosti ρ bi delila s povprečno vrednostjo razdalj senzor – tarča, da bi se znebila prevelikih vrednosti za vrednosti ρ . Na končni vrednosti ρ bi potem temeljila klasifikacijo.

Kot že povedano, pa podatka R za testna območja nisem imela. V datotekah LAS sem za vsako območje sicer lahko videla število serij, vendar kje je potekala posamezna serija in katere točke je zajemala, nisem mogla določiti. Ker sem kljub temu želela izvedeti osnovne informacije o serijah na posameznih območjih, sem do rešitve prišla malo drugače. Posamezna območja sem obarvala glede na kot snemanja. Na sliki 76 je prikazana omenjena tematska karta za celotno območje MB 3 (levo: vsi koti, desno: koti $0^\circ - 3^\circ$).



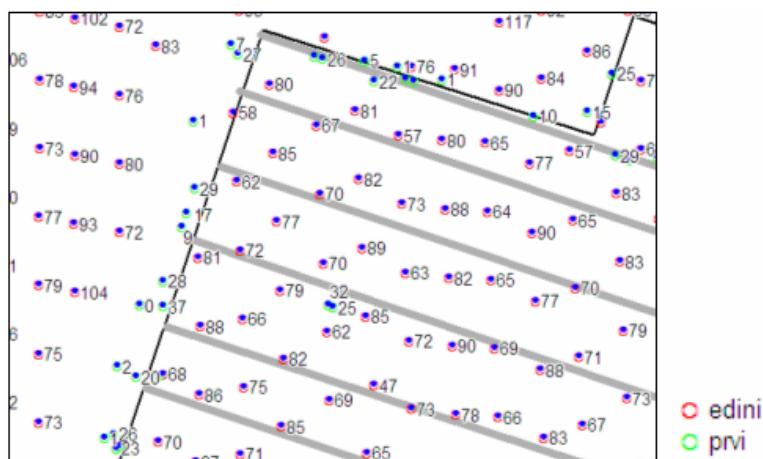
Slika 76: Prikaz kotov snemanja na območju MB3 (levo – vsi koti, desno – koti manjši od 4°).

Fig. 76: Viewing angles on area MB3 (left – all angles, right – angles smaller than 4°).

Ker je iz prikaza vseh kotov (slika 76 – levo) zelo težko razbrati število serij, sem prikazala samo določene kote (slika 76 – desno). Vidi se, da so bile serije snemanja na območju MB 3 najmanj tri. Tudi v programu LasEdit dobim informacijo, da so bile serije tri. Ker je na množici točk, združenih iz različnih serij ter brez podatka R zelo težko normalizirati intenziteto glede na višino snemanja, sem poiskala območje, kjer je bila serija samo ena. Takšno območje je ravno območje Slivnice, na katerem sem skozi celotno nalogo prikazovala rezultate klasifikacije.

6.6.2 Vpliv reda odboja na intenziteto

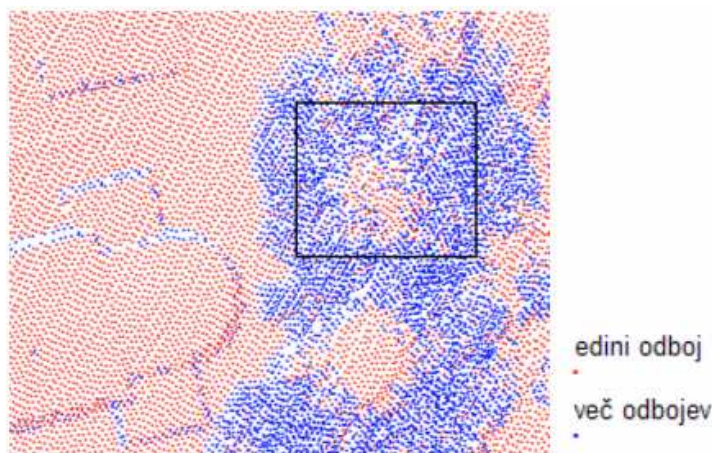
Pri izdelavi podobe intenzitete sem uporabila točke reda prvi in edini, saj le-ti predstavljajo točke, vidne tudi iz zraka (kot pri BDOF1). Pri analizi intenzitete na strehi neke stavbe v območju MB 3 sem zasledila, da intenzitete nekaterih točk na robu stavbe močno odstopajo od ostalih točk (slika 77). Pri iskanju vzroka sem točke označila glede na red odboja in dobila situacijo na sliki 77.



Slika 77: Intenziteta točk, prikazanih glede na red odboja.

Fig. 77: Intensity of points, shown in view of return type.

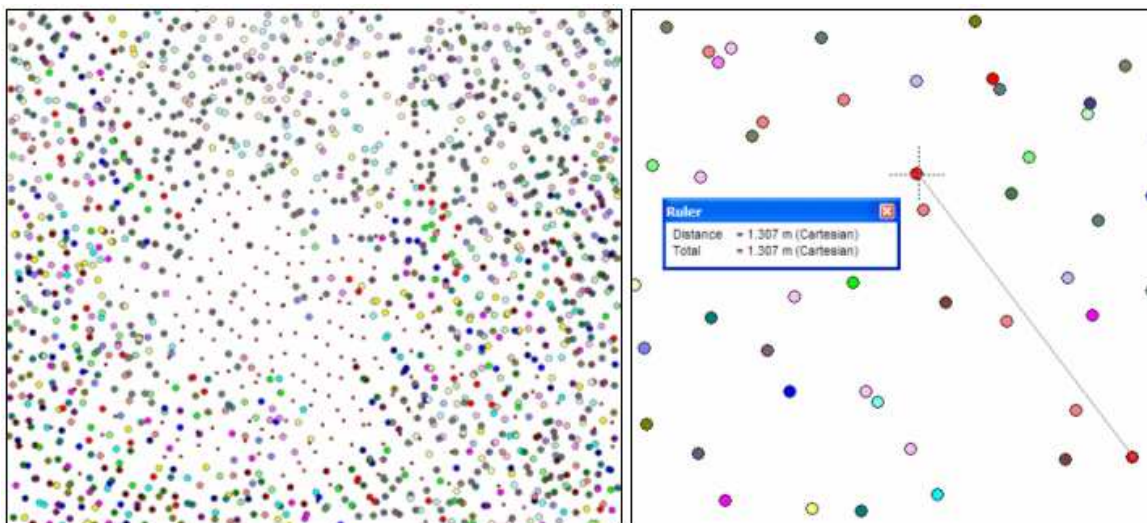
Jasno je opaziti, da so vse odstopajoče točke prvega reda. Zato lahko skoraj zagotovo sklepamo, da je intenziteta odvisna od reda odboja in se s povečevanjem reda odbojev zmanjšuje. Povezavo intenzitete in reda odboja sem skušala pridobiti na objektu, ki vsebuje točke različnih redov. Izbrala sem krošnjo drevesa v območju Slivnice (slika 78).



Slika 78: Edini odboj (rdeče) ter več odbojev pulza (modro).

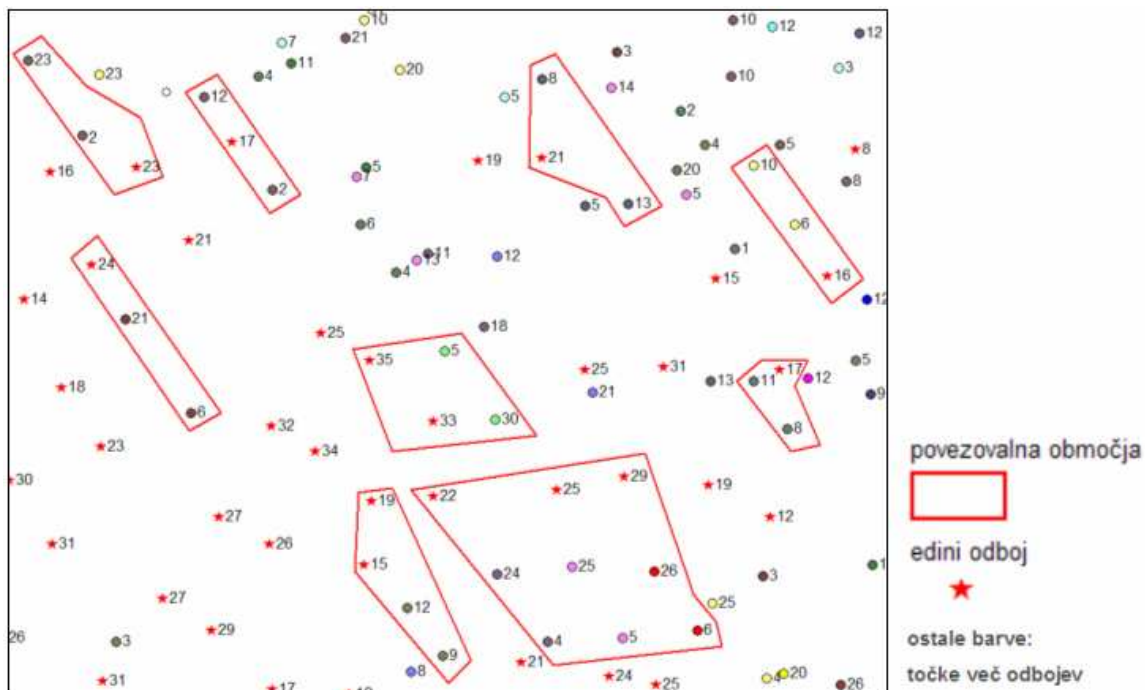
Fig. 78: Single return (red) and multiple return points (blue).

Točke sem tematsko obarvala glede na isti GPS čas zajema točke (glede na isti snop žarka) (slika 79).



Slika 79: Točke, obarvane glede na isti GPS čas (isti pulz).
Fig. 79: Points, coloured by the same GPS time (same pulse).

Točke na sliki 79, ki so iste barve, pripadajo istemu snopu žarka. Izmerila sem, da je lahko razdalja med točkami enega oddanega signala tudi več kot 1 m, kar pomeni, da z enim snopom lahko posnamemo več različnih objektov. Primerjajmo intenzitete točk, ki predstavljajo edini odboj, z intenzitetami točk, ki pripadajo snopu z več odboji (slika 80).



Slika 80: Primerjava intenzitete točk edinega odboja in točk več odbojev.
Fig. 80: Comparison of single return intensity and multiple return intensity.

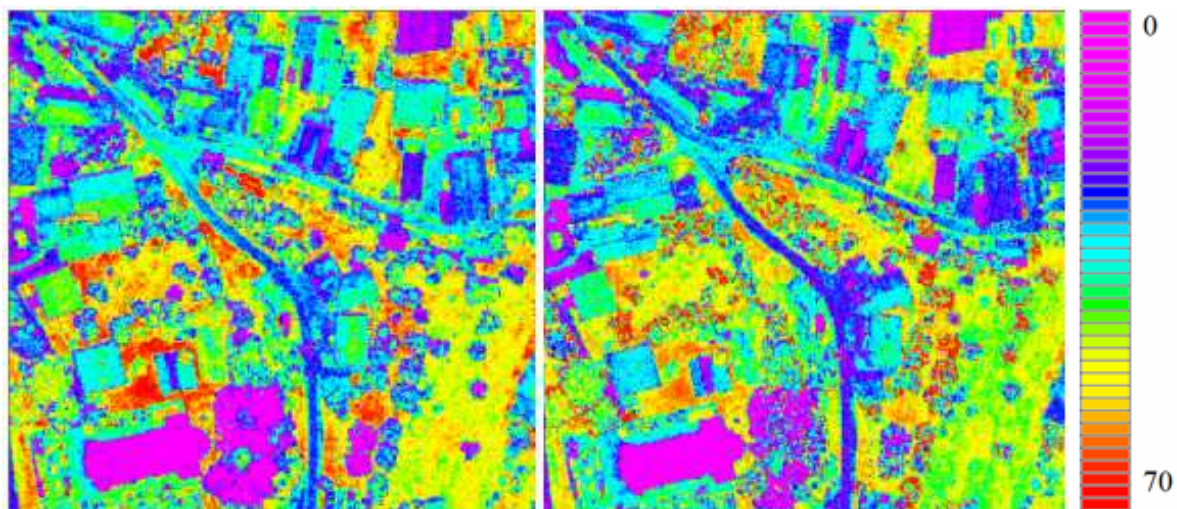
Na primeru, prikazanem na sliki 80, sem povezala območja, ki zajemajo točke snopov z različnim številom točk in ležijo zelo blizu skupaj. Opazimo lahko, da se vrednosti intenzitet točk več odbojev približno porazdelijo po posameznem odboju. Vsota intenzitet posameznih odbojev je približno enaka intenziteti enega samega odboja. To potrjuje tudi statistični izračun na osnovi vseh točk v izbrani krošnji drevesa (preglednica 8).

Preglednica 8: Statistika intenzitete na izbranem območju.

Table 8: Statistics of intensity on the selected area.

	Povprečje
Intenziteta odbojev reda edini	21,7
Intenziteta vseh odbojev, ki niso reda edini	10,2
Vsota intenzitete odbojev istega snopa	20,8
Intenziteta odbojev reda prvi	7,1

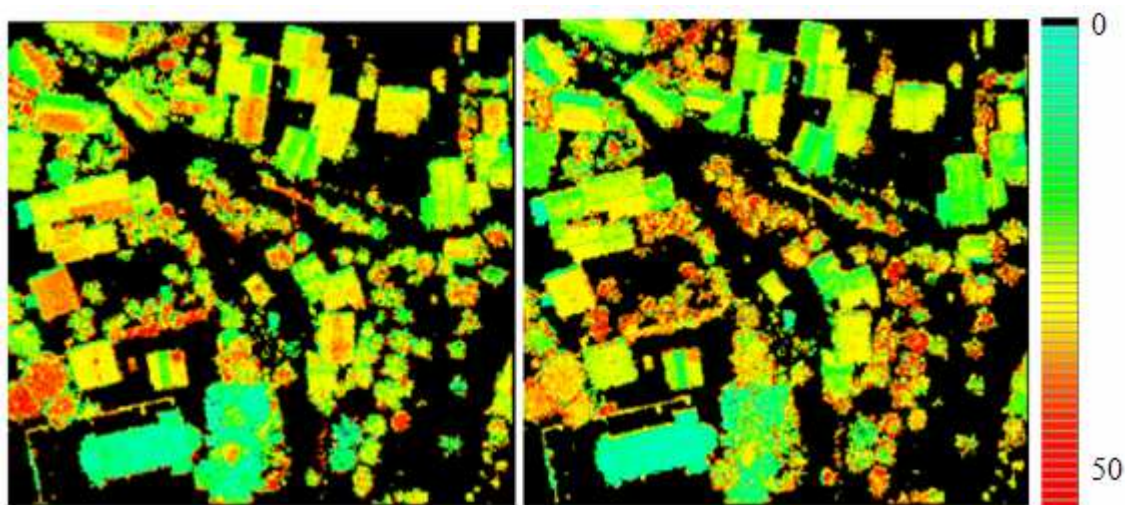
Ker vrednosti intenzitete prvih odbojev očitno kvarijo podobo intenzitete, na kateri temeljimo klasifikacijo, bi bilo potrebno te vrednosti popraviti. Neupoštevanje točk reda prvi ni smiselno, saj na podobi nastanejo luknje. Vrednosti intenzitete odbojev reda prvi bi morali pomnožiti s faktorjem popravka $21,7 / 7,1 = 3,8$. To sem tudi storila in dobila podobo, prikazano na sliki 81 desno.



Slika 81: Levo: podoba intenzitete, izdelana na osnovi prvotnih točk reda prvi in edini; desno: podoba intenzitete, izdelana na osnovi prvotnih točk reda edini ter popravljenih točk reda prvi.

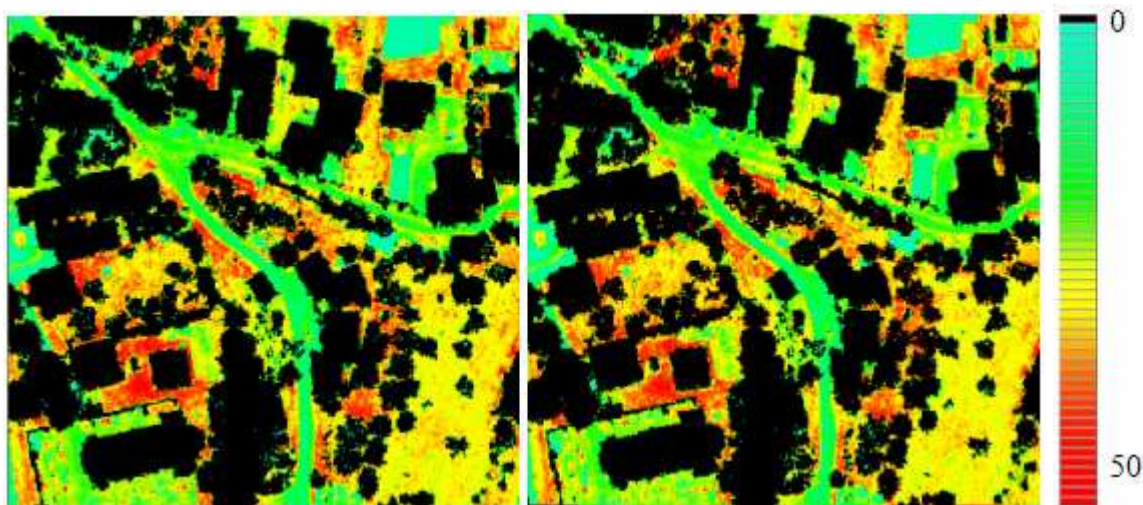
Fig. 81: Original intensity image and corrected intensity image (respectively).

Razdelimo objekte na teh dveh podobah po višini in prikažimo njihovo intenziteto (slika 82).



Slika 82: Levo: podoba intenzitete objektov višjih od 1 m, izdelana na osnovi prvotnih točk reda prvi in edini; desno: podoba intenzitete objektov višjih od 1 m, izdelana na osnovi prvotnih točk reda edini ter popravljenih točk reda prvi.

Fig. 82: Original intensity image of objects, higher than 1 m, and corrected intensity image of the same objects (respectively).



Slika 83: Levo: podoba intenzitete objektov nižjih od 1 m, izdelana na osnovi prvotnih točk reda prvi in edini; desno: podoba intenzitete objektov nižjih od 1 m, izdelana na osnovi prvotnih točk reda edini ter popravljenih točk reda prvi.

Fig. 83: Original intensity image of objects, lower than 1 m, and corrected intensity image of the same objects (respectively).

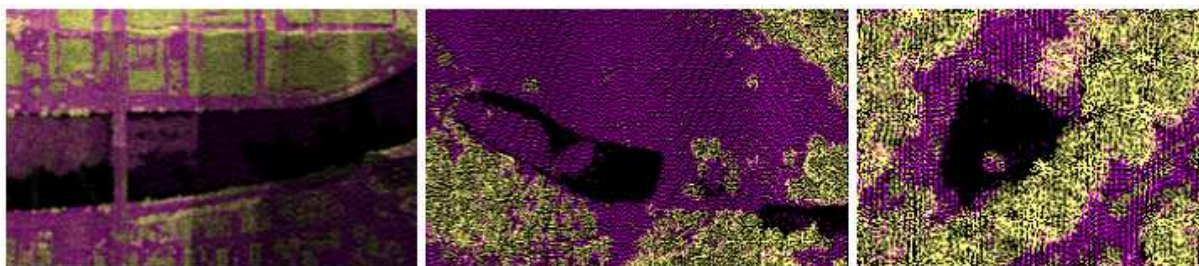
Na osnovi slik 81-83 pridemo do ugotovitve, da se s popravljenimi vrednostmi intenzitete odbojev reda prvi možnost klasifikacije precej izboljša. To velja zlasti za visoke objekte (drevesa in stavbe), saj je tam odbojev reda prvi veliko. Intenziteta nizkih objektov se skoraj ne spremeni, saj tam odbojev reda prvi skoraj ni. Kljub izboljšavi pa podoba intenzitete še vedno ni dovolj, da bi drevesa in stavbe lahko med seboj zanesljivo ločili.

6.7 Klasifikacija vode

Razred, ki zaradi svojih značilnosti potrebuje posebno obravnavo, je voda. Glede na literaturo bi moralo biti vodo na osnovi lidarskih podatkov zelo enostavno izločiti, saj vsebuje dve pomembni lastnosti:

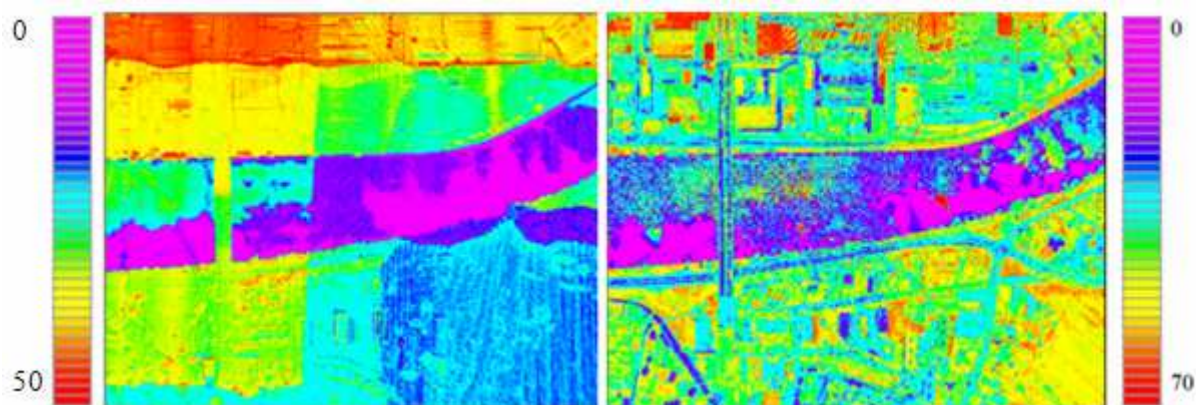
- navadno ima nižjo intenziteto kakor tla na kopnem (absorpcija valovne dolžine NIR je v vodi občutno višja kakor v zemlji) (Brzank, 2006),
- zaradi velike absorpcije je navadno signal tudi prešibak za zajem, kar za posledico nosi nič oz. manj točk laserskega skeniranja nad vodnimi površinami (Bitenc, 2007).

Zgornje navedbe sem preverila na dejanskih podatkih. Prikažimo najprej nekaj območij, prekritih z vodo, ki se nahajajo na območju Maribora (slika 84). Z vijolično barvo so prikazane talne točke, z rumeno pa netalne točke.



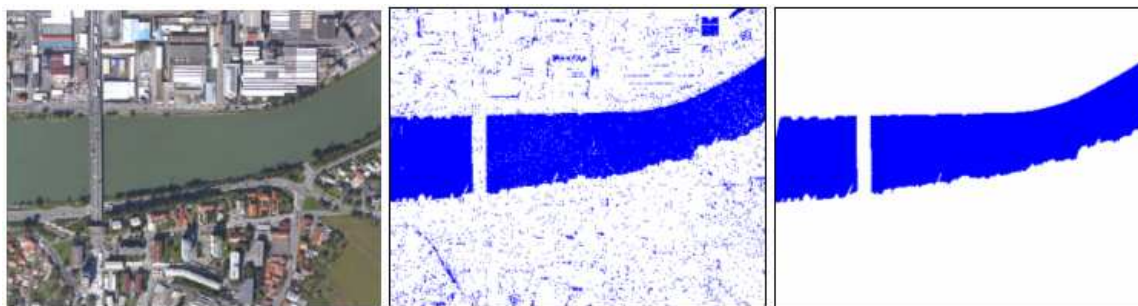
Slika 84: Območja vode v Mariboru.
Fig. 84: Water areas in Maribor.

Opazimo lahko, da točke na območju reke in jezer res manjkajo, vendar ne na celotnem območju. Vzrok je verjetno v sestavi vode, v globini vode, v gladkosti vodne površine... Preverimo ali jih je ustrezno manjše število na m^2 , da lahko na tej osnovi izločimo vodo. Na sliki 85 levo so prikazana območja glede na število točk, na desni strani pa podoba intenzitete istega območja.



Slika 85: Podoba, obarvana glede na število točk (levo) ter podoba intenzitete (desno).
Fig. 85: Image, coloured by number of points (levo) and the intensity image (right).

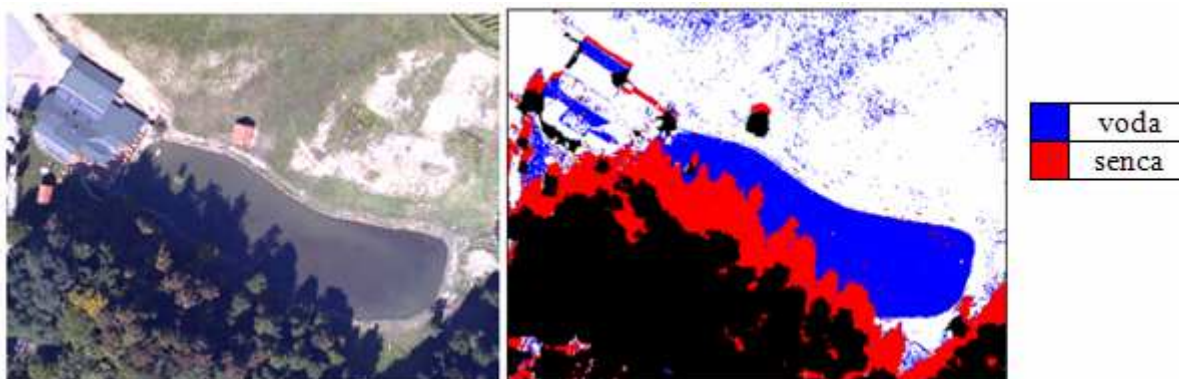
Vidi se, da bi bilo na osnovi števila točk del reke (obarvan roza) možno izločiti, del pa ne. Enako velja za klasifikacijo na osnovi intenzitete. Del reke (prav tako obarvan roza) bi lahko izločili, ostalega dela pa ne. Ker je površina reke prav tako gladka kakor npr. asfalt, odpade tudi klasifikacija na osnovi standardne deviacije. Poskusimo vodno površino izločiti še na osnovi BDOF1. Na sliki 86 so od leve proti desni prikazane podobe: BDOF1, klasifikacija vode na osnovi celotne podobe BDOF1, filtriranje vode, dobljene na osnovi klasifikacije BDOF1.



Slika 86: Od leve proti desni: BDOF1, klasifikacija na osnovi BDOF1 in njeno filtriranje.
Fig. 86: From left to right: DOF, classification on DOF and its filtering.

Voda se na osnovi celotne podobe BDOF1 zelo dobro izloči. V isti razred pade sicer nekaj ostalih objektov, ki pa se zaradi dejstva, da ima reka zelo veliko površino, s funkcijami združi, presej in filtriraj zelo dobro odstranijo. Obliko reke malenkostno kvarijo sence na južnem robu reke, kar pa bi se dalo uspešno rešiti z vpeljavo lidarskih podatkov. Problem predstavlja tudi most čez reko. Tam reka ni zajeta niti z BDOF1 niti z lidarskimi podatki, zato izločitev tistega dela reke ni mogoča.

Poglejmo si še izločitev jezera na območju MB 5. Na sliki 87 levo je BDOF1 območja jezera, na desni pa sta razreda voda in sence, klasificirana na osnovi vrednosti BDOF1 objektov, nižjih od 1 m.



Slika 87: BDOF1 jezera (levo) ter klasifikacija vode in senc na osnovi BDOF1 (desno).
Fig. 87: DOF with a lake (left) and classification of water and shades from DOF (right).

Na podobi BDOF1 je ogromno senc, ki pokrivajo približno polovico jezera. Druga opazna težava je napačno definiran DMR na območju stavbe levo od jezera. Iz slike 84 je razvidno, da je program LasEdit točke te stavbe klasificiral kot tla. Na srečo lahko zaradi dejstva, da voda zajema veliko površino, uspešno izločimo del jezera. Poleg tega lahko vpeljemo podatke intenzitete, ki na območju sence uspešno klasificirajo vodo. Na koncu območja združimo (slika 88).



Slika 88: Od leve proti desni: klasifikacija vode iz BDOF1; klasifikacija vode iz lidarskih podatkov; združeno.
Fig. 88: From left to right: classification of water from DOF; classification of water from lidar data; fusion.

Vode ne bi mogli izločiti niti samo na osnovi BDOF1 niti samo na osnovi intenzitete. Z dopolnjujočimi podatki pa je klasifikacija zelo dobro uspela.

6.8 Omejitve klasifikacije lidarskih podatkov zaradi strukture pokrovnosti

V nalogi sem že opisala nekaj vplivov na kakovost klasifikacije. Naj jih na kratko povzamem:

- natančnost določitve položaja in intenzitete lidarskih točk (posledica lastnosti samega sistema - npr. premer laserskega žarka, metoda zajemanja odboja - ter značilnosti tarče),
- spremenljivi parametri snemanja (valovna dolžina, gostota točk, kot snemanja, višina snemanja, letni čas snemanja, idr.),
- metoda klasifikacije (način obdelave podatkov in rastriranja, ustrezno izbrane točke in velikost piksla, metoda izdelave DMR, razdelitev objektov po višini, velikost filtra...).

Pri obdelavi različnih testnih območij sem opazila tudi omejitve klasifikacije, ki pri v tej nalogi uporabljenih podatkih in metodi klasifikacije nastanejo kot posledica lastnosti objektov. Ker so ta opažanja pomembna za praktično uporabo opisane metode klasifikacije, jih v nadaljevanju navajam.

- *Vrsta tarče* (odbojnost, usmerjenost, velikost): neposreden vpliv na intenziteto in s tem na klasifikacijo nizkih objektov.
- *Gosta pozidava*: možnost manjkajočih talnih točk in s tem otežena določitev DMR. V našem primeru so bile točke zajete tudi med gosto pozidavo (industrijska cona v MB), kar je posledica dovolj velike gostote točk snemanja ter dovolj majhnega kota snemanja.
- *Visoke stavbe*: za visokimi stavbami so sence. Klasifikacija je tam omejena. Problem bi rešili z večjo gostoto točk ter ustreznim kotom snemanja.
- *Nagnjen teren*: vpliva na STD, vendar tal ne klasificiramo na osnovi te spremenljivke, zato na klasifikacijo nima vpliva.
- *Velikost objekta*: je pomembna. Večji kot je objekt, lažje ga bomo izločili. Za majhne objekte obstaja možnost izbrisa s funkcijama združi in presej.
- *Oblika objekta*: za klasifikacijo je najprimerneje, če je objekt enostavnih oblik in oblikuje območje. Izločiti tako ne moremo npr. železniške proge, saj je »pretanka«.
- *Prisotnost avtomobilov*: avtomobili precej omejujejo klasifikacijo. Na njihovem območju (običajno so to ceste in parkirišča) nastajajo luknje. Pri gostem prometu celo onemogočajo izločitev objekta. Poleg njihove intenzitete povroča težave tudi njihova višina, saj so višji

od 1 m, kar jih razporedi v višinski razred dreves oz. stavb. Paziti moramo, da snemamo takrat, ko je avtomobilov čim manj (z lidarjem lahko snemamo tudi ponoči).

- *Elektro, telefonska in druga napeljava*: ni velik omejitveni faktor za klasifikacijo. Po njihovi izločitvi v talnih površinah nastajajo luknje, ki pa se s filtriranjem zapolnijo. Točke na zračnih napeljavah so sicer višje od 1 m, vendar jih s postopkom klasifikacije ne izločimo kot drevo oz. stavba, saj je njihova oblika neznačilna, predvsem »pretanka« .
- *Večnivojske strehe*: omejujejo klasifikacijo. Obstaja velika možnost, da jih določimo kot drevesa. Omejitev se zmanjša s povečano gostoto točk in s tem zmanjšanjem piksla.
- *Specifična vrsta materiala* (npr. leš): izločimo lahko vsak material, katerega intenziteta se loči od drugih. Tak primer je tudi leš (območje MB).
- *Vrsta vegetacije oz. kmetijske kulture* (npr. ločitev nasada kumar od hmelja): njive se lahko izločijo, če so brez rastja. Če je na njih nizko rastje (npr. mlada pšenica), lahko to zamenjamo s travnikom. Če je na njih visoko rastje, npr. hmelj, lahko to zamenjamo z drevesi. Podobno je s koruzo, vinogradi... Klasifikacija s pomočjo lidarskih podatkov ni primerna za kmetijske površine brez dodatne prilagoditve. Ti podatki pa so lahko izredno pomembni kot dodana vrednost npr. podatkom DOF, saj lahko na osnovi znane višine objekta veliko lažje določimo njegovo vrsto. Za izločitev njiv je najbolje snemati pozno v jeseni, ko na njivah ne raste nič. Za klasifikacijo kmetijskih površin pa bi bilo potrebno izdelati drugo, specifično klasifikacijo.

Zgornje navedbe kažejo na precejšen vpliv strukture pokrovnosti na klasifikacijo. Precej težav lahko rešimo z določitvijo zelene klasifikacije pred lidarskim snemanjem in s tem določitvijo ustreznih parametrov snemanja (valovna dolžina, letni in dnevni čas snemanja, gostota točk, kot in višina snemanja, idr.).

6.9 Uporabnost klasifikacije lidarskih podatkov v praksi

Kot že povedano, imamo za celotno območje Slovenije nekaj kart rabe tal oz. pokrovnosti. Vsaka ima svoje vrste različno velikih kategorij, pridobljenih z metodo, ki je za določen namen uporabe karte nudila najprimernejše rezultate. Postopki pridobitve karte se iz istega razloga razlikujejo v času, ki je bil potreben za njihovo izdelavo, v številu ljudi, ki so sloj

izdelovali, in potrebnih finančnih sredstvih. Nekatere lastnosti teh kart so prikazane v preglednici 9, kjer so posamezne karte označene z: Vrsta rabe v Zemljiškem katastru (ZK), Dejanska raba zemljišč (DRZ), Zbirka dejanske rabe zemljišč (ZDRZ), CORINE (CORINE), Statistični GIS pokrovnosti tal (SURS), Karta pokrovnosti ZRC SAZU (ZRC) in karta pokrovnosti izdelana na osnovi lidarskih podatkov (LIDAR).

Preglednica 9: Nekatere lastnosti kart pokrovnosti.

Table 9: Some characteristics of land cover maps.

Lastnost \ karta	ZK	DRZ	ZDRZ	CORINE	SURS	ZRC	LIDAR
Število kategorij	37	21	22	44	19	30	5
Vir	teren	DOF	DOF	Landsat	Landsat	Landsat	lidar
Najmanjša enota kartiranja (m ²)	0 - 200	10 - 5000	10- 5000	250.000	10.000	625	5
Najmanjše območje uporabe	lokalno	lokalno	lokalno	državno	regijsko	regijsko	lokalno
Položajna natančnost (m)	2 – 50	1	1	100	30	25	1
Tematska natančnost (%)	80	95	95	85	86	92	90
Obnavljanje	dnevno	na 7 let	dnevno	na 10 let	na 4 leta	po potrebi	po potrebi
Zahtevnost izdelave (časovno)	velika	velika	velika	srednja	srednja	majhna	majhna
3D pokrovnost	NE	NE	NE	NE	NE	NE	DA

Zakaj izdelati še eno karto pokrovnosti in zakaj uporabiti novo metodo?

Karta pokrovnosti, pridobljena na osnovi klasifikacije lidarskih podatkov, ima pet kategorij (stavbe, drevesa, asfalt, trava, njive), kar je precej manj od drugih kart. Od teh kategorij lahko tri, oblikovno boljše, pridobimo iz drugih kart: stavbe iz Katastra stavb¹¹, travo in njive pa iz Dejanske rabe zemljišč. Dreves in asfalta v drugih kartah ne najdemo, kar je prvi razlog za izdelavo nove karte. Drugi razlog je zelo majhna velikost najmanjše enote kartiranja. Tako lahko npr. določimo lokacijo njiv, velikih od 5 m² naprej (pri Dejanski rabi zemljišč se njive zajemajo pri velikosti od 500 m² naprej). Tretji razlog je ažurnost karte. Podatke lahko dobimo po potrebi in v kratkem času (neodvisno od letnega časa in vremena), njihova

¹¹ Kataster stavb ni zvezna karta pokrovnosti, zato v preglednici 9 ni navedena.

obdelava pa je zelo hitra (nekaj ur), zato karta praktično predstavlja dejansko stanje. Največji razlog nenazadnje predstavlja možnost prikaza pokrovnosti v trirazsežnem prostoru.

Nova metoda, klasifikacija lidarskih podatkov, je hitra, zahteva zgolj enega operaterja ter nudi položajno, tematsko in časovno natančnost, ki je primerljiva oz. preseže natančnost drugih metod.

Primeri uporabe

V nadaljevanju so navedeni primeri uporabe klasifikacije lidarskih podatkov in ne uporaba lidarskih podatkov kot takšnih (ti so uporabni v veliko širšem obsegu).

1. Urbanistično planiranje. Proučevanje urbanističnih kazalcev kakovosti bivalnega okolja, npr. izračun razmerja stavb in dreves na določenem območju za potrebe gradnje novega objekta.
2. Spremljanje sprememb pokrovnosti v kratkem časovnem obdobju (npr. sekanje dreves).
3. Turizem. Npr. prikaz trase kolesarske proge na trirazsežnem modelu (primer je prikazan v prilogi naloge).
4. Kontrola katastra stavb – iskanje črnih gradenj.
5. Kontrola Dejanske rabe tal – spremljanje zaraščanja njiv (kjer so drevesa, ne more biti njiva).
6. Določanje materiala cest – asfaltirane ceste, makadamske ceste. Gre za dejansko pokrovnost in ne za dopolnitev podatkov zemljiškega katastra, saj so tam ceste zelo neažurne, poleg tega precej odstopajo od dejanske lokacije. Lahko gre za dopolnitev Katastra cest.
7. Izdelava trirazsežnega modela pokrovnosti.
8. Pomoč pri popravi oz. ovrednotenju DMR. Na osnovi lidarskih podatkov izdelamo DMR, nato pa upoštevamo dejstva, kot so: na območju gozda DMR ni tako natančen kakor drugje, pod stavbami je DMR zgolj interpolacija točk okoli stavbe idr.
9. Arheologija. Izdelava takšnega DMR-ja, kot bi bil, če na območju ne bi bilo stavb, cest, kanalov... Dejanski primer je iskanje arheoloških ostankov na območju Francije, ki je prepleteno z umetnimi vodnimi kanali. Na osnovi klasifikacije bi bilo potrebno poiskati

kanale, jih odstraniti in izdelati DMR, kot je najverjetneje bil pred leti, ko kanalov še ni bilo. Iskanje arheoloških ostankov bi bilo tako veliko enostavnejše.

10. Pomoč pri planiranju avtocest – število oz. površina dreves, ki jih bomo morali podreti.
11. Določanje lokacije, števila dreves ter njihove višine, velikosti krošenj za bazo dreves občine (to večje občine potrebujejo, v Mestni občini Maribor ta projekt že poteka na osnovi terenskih GPS meritev posameznih dreves).
12. Kot stranski rezultat lidarskega snemanja.

Klasifikacija lidarskih podatkov morda v praksi ni tako uporabna, da bi zračno lasersko skeniranje izvajali prav s tem namenom. Ker pa so lidarski podatki uporabni na precej vsebinskih področjih in se njihova uporaba še stopnjuje, lahko kot stranski produkt projektov ponudimo tudi klasifikacijo¹². Ob ustrezni programski in strojni opremi je namreč čas njene izvedbe v primerjavi z drugimi možnimi metodami (terenske meritve ali ročna vektorizacija po BDOF1) izredno kratek.

¹² Nekateri lidarski programi že ponujajo klasifikacijo, vendar gre za praviloma manj natančno klasifikacijo točk in nato le prikaz dreves, stavb, podrastja in terena, pri čemer posamezni objekti niso združeni (so v obliki razpršenih točk).

7 ZAKLJUČEK

Tehnologija ZLS je v zadnjih letih tudi v Sloveniji prešla v vsakodnevno uporabo. S tem imam v mislih uporabo podatkov o trirazsežnih položajih objektov, uporaba intenzitete je namreč še vedno zelo omejena. Z njo se je sicer ukvarjalo nekaj slovenskih raziskovalcev (Kobler 2007, Oštir, 2006; Bitenc, 2007), in njihove ugotovitve so možnost uporabe intenzitete povečale, vendar ne do mere vsakodnevne, rutinske uporabe. Tako je tudi drugje po svetu. Znanstveniki s celega sveta so do danes odkrili že vse vplive in moteče faktorje, ki vplivajo na intenziteto. Še več, v obliki funkcije imamo zapisane celo odnose med posameznimi vplivi (Wagner, 2005). Prešli smo v obdobje, ko je intenziteta sicer dobra analizirana, vendar njenih vrednosti ne znamo oz. ne moremo popraviti glede na različne vplive. Tudi na tem področju so že bili premiki. Normalizacija glede na višino snemanja je že dobro znana, približuje se ji kalibracija za kot odboja laserskega žarka. Raziskani so tudi vplivi različnih metod interpolacij v raster ter različnih filtriranj. Mnenja sem, da bi danes teoretično lahko odpravili vse vplive na meritve intenzitete in zapisali najprimernejši model odbojnosti, vendar to močno otežujejo »faktorji«, ki niso odvisni od raziskovanj samih. Odstraniti bi morali še štiri moteče vplive:

- pomanjkanje natančnega poznavanja lastnosti opazovanih objektov (naklon, koeficient odbojnosti tarče, velikost tarče glede na velikost odtisa laserskega žarka na tleh, količina vegetacije, skozi katero je prodrl žarek, nad objektom, oddaljenost tarče od centra odtisa),
- nepoznavanje atmosferskih pogojev ter količine sevanja iz okolja, ki ima valovno dolžino enako laserski,
- pomanjkanje poznavanja parametrov opazovanj (višina in kot snemanja...),
- pomanjkanje poznavanja delovanja sistema ZLS (način merjenja razdalje...).

Vsi ti vplivi omejujejo odpravo napak intenzitete in s tem njeno uporabo. Pomanjkanje poznavanja delovanja sistema ZLS ter parametrov opazovanj je posledica poslovnih skrivnosti posameznih izdelovalcev opreme ZLS ter izvajalcev snemanja. S tem onemogočajo napredek uporabe intenzitete, ki bi sicer s poznavanjem teh parametrov lahko bil storjen.

Sevanje iz okolja, ki ima valovno dolžino enako laserski, bi lahko dobili s hkratno uporabo pasivnega senzorja, ki zaznava takšno valovno dolžino. Najverjetneje pa okoljskega sevanja sploh ni potrebno poznati, saj se vrednost intenzitete samo poveča za konstantni faktor.

Največji omejitveni faktor je nepoznavanje lastnosti opazovanih objektov. Nekatere lastnosti bi sicer lahko pridobili (npr. naklon), vendar bi njihova implementacija v kalibracijo precej podaljšala čas pridobitve uporabnih podatkov intenzitete. Temu se lahko izognemo s snemanjem pri kotu ožjem od 10° , kakor so empirično dokazali nekateri avtorji.

Tehnični problem za potrditev lidarskih podatkov intenzitete predstavlja pomanjkanje referenčnih podatkov pri ustrezni prostorski, spektralni in časovni ločljivosti, s katerimi bi lahko primerjali vrednosti lidarske intenzitete (Boyd, 2007).

Pomembno je omeniti, da so kalibracije, ki jih danes še ne moremo opraviti, pomembne predvsem za podrobne in zahtevne analize ter interpretacije podatkov intenzitete. Že danes pa lahko podatke popravimo do te mere, da jih lahko koristno uporabljamo pri precejšnjem številu nalog. Pri tem so se kot koristni v številnih eksperimentih pokazali bodisi kot samostojni podatek (npr. za klasifikacijo, ekstrakcijo določenih pojavov...) bodisi v kombinaciji z drugimi podatki, kjer so pokazali še posebej dobre rezultate. To sem prikazala tudi v sklopu te naloge, kjer sem na osnovi lidarskih podatkov uspela izdelati kakovostno karto pokrovnosti, primerno za lokalne projekte. Uporaba lidarskih podatkov se je kot zelo uspešna in nujno potrebna pokazala tudi pri izdelavi karte pokrovnosti na osnovi BDOF1. Seveda pa so nadaljnje raziskave še vedno dobrodošle in bodo vsekakor uporabo intenzitete še povečale.

Naj nalogo zaključim z navedbo osnovnih značilnosti karte pokrovnosti, izdelane na osnovi lidarskih podatkov. Značilnosti so opisane na enak način kakor pri ostalih kartah pokrovnosti (poglavje 2).

Opis: Rastrska ali vektorska trirazsežna karta pokrovnosti lokalnega območja.

Namen: Karta je bila izdelana v okviru magistrske naloge z namenom ugotovitve možnosti izdelave karte pokrovnosti na osnovi lidarskih podatkov.

Uporaba: Karta ni vezana na parcele in s tem na zemljiškoknjižna stanja. Prav tako na karti ni določena vrsta rabe, temveč zgolj pokrovnost. Ker pa lahko osnovne elemente pokrovnosti poda v trirazsežnem prostoru, je kot takšna uporabna za številne lokalne projekte, kot so urbanistična planiranja, projekti na področju turizma, možnost uporabe karte za določitev črnih zgradb v občini, idr.

Lastnik: Lastnik karte bi bil vsakokratni naročnik.

Datum: Karta v nalogi je bila izdelana leta 2008 na podlagi podatkov iz leta 2007.

Osnovni princip: Uporaba različnih lastnosti lidarskih podatkov (višine, standardne deviacije višin in intenzitete) v avtomatiziranih postopkih.

Viri: Lidarski podatki in po potrebi BDOF1.

Klasifikacija: Za nalogo sem izbrala pet osnovnih kategorij: stavbe, drevesa, asfalt, trava in njive. Po potrebi se da na osnovi lidarskih podatkov izločiti tudi vodo ter podrobnejše razrede, kot so grmičevje, različno visoko drevje in stavbe, ekstenzivni travniki in kategorija odprto. Nekaterih kultur, kot so vinogradi in hmelj, z opisano metodo ne moremo izločiti.

Klasifikacijski ključ: Mejno vrednost za standardno deviacijo, ki razločuje drevesa in stavbe, sem določila na osnovi primerjave objektov na BDOF1. Na enak način sem kategorije pripisala tudi razredom, določenim na osnovi nenadzorovane klasifikacije.

Merilo kartiranja: Merilo kartiranja ni bilo določeno, saj so se vrednosti pikslov določale po v naprej predpisani sistematiki.

Najmanjša enota kartiranja: Najmanjša enota kartiranja za objekte, nižje od 1 m, je piksel 0,5 krat 0,5 m, kar pomeni območje 0,25 m², za drevesa in stavbe pa piksel 1 x 1 m oz. 1 m². Kljub majhni velikosti piksla pa so zaradi metod filtriranja najmanjše enote velike približno 5 m².

Predobdelava: Izbor ustreznih točk (red odboja, tla, netla), popravki vrednosti točk za red odboja in za višino snemanja, rastriranje (izbor ustrezne metode), določitev zelenih razredov pokrovnosti.

Interpretacija: Sloj pokrovnosti je bil izdelan na osnovi različnih lastnosti lidarskih podatkov. V osnovi so bili podatki razdeljeni glede na višino (več oz. manj kot 1 m). Drevesa in stavbe so bile nato določene na osnovi standardne deviacije višine, njive, travniki in asfalt pa na osnovi nenadzorovane klasifikacije intenzitete. Vodo sem izločila z vpeljavo posnetka BDOF1.

Poobdelava: Vse vrste pokrovnosti so bile dokončno položajno določene z uporabo funkcij združi in presej ter ustreznim filtriranjem. Po potrebi podatke na koncu vektoriziramo z avtomatsko vektorizacijo.

Položajna natančnost: 1 m.

Tematska natančnost: Povprečna tematska natančnost karte presega 90 %, kar je za tovrstne naloge zelo dober rezultat.

Časovna natančnost: Podatki se nanašajo na stanje iz leta 2007.

Logična usklajenost: Vsakemu pikslu je določena vrednost za vrsto pokrovnosti.

Popolnost: Podatki popolnoma prekrivajo izbrano območje.

Prikaz dejanskega stanja: Prikaz dejanskega stanja je odvisen od starosti vira. V primeru, da imamo zelo svež vir podatkov, lahko glede na visoko hitrost izdelave karte izdelamo karto, ki prikazuje dejansko stanje (razen redkih tematskih napak).

Način osveževanja: Karta je bila izdelana za enkratni namen. Osveževanje ni predvideno. V primeru uporabe takšnih kart v praksi se kot način osveževanja uporabi ponovna izdelava celotne karte na novih podatkih.

Zahtevnost izdelave: Za relativno dobro izdelano karto pokrovnosti je potrebnih malo ur in finančnih sredstev. Problem predstavlja velikost območja obdelave, ki je lahko za operativno obdelavo precej majhno. Pri večjih območjih je zahteven predvsem postopek do pridobitve rastrskih podob, saj je točk zelo veliko in zahtevajo zelo sposobno strojno in programsko opremo. Zahtevnejša postane tudi izdelava specifičnih kart, ki zahtevajo npr. več kategorij pokrovnosti.

Napake – vzroki: Vzroke za napake lahko iščemo v premajhni gostoti lidarskih točk, nepoznavanju vseh atributov o točkah (predvsem višine snemanja) ter predvsem v preveč variabilni vrednosti intenzitete. Vzrok je lahko tudi premajhno število razredov, na osnovi katerih sem združevala kategorije pokrovnosti ter premalo zahtevni predobdelavi podatkov.

Napake – odprava: Potrebno gostoto lidarskih točk moramo določiti glede na konkretni projekt, preden naročimo lasersko snemanje na terenu. Od izvajalca snemanja moramo zahtevati vse attribute točk, ki jih potrebujemo za uspešno izdelavo karte.

Povezljivost z drugimi zbirkami: Karta se lahko uspešno uporabi kot rastrska podlaga drugih kart ali kot eden izmed slojev v GIS.

Prednosti: Velika podrobnost za lokalne študije; hiter in cenovno ugoden način pridobitve sloja (velika stopnja avtomatizacije); podatki se nanašajo na enak časovni trenutek; ni subjektivnih napak interpretatorja; možnost izboljšave sloja z ne preveliko napora; karta prikazuje zgolj pokrovnost in ne pravnih režimov; možnost uporabe v GIS; možnost prilagoditve sloja za specifične študije; možnost prilagoditve razredov po želji naročnika; možnost pogostega osveževanja sloja in s tem kratkoročnih časovnih primerjav; možnost prikaza karte v trirazsežnem prostoru.

Slabosti: Uporabna zgolj za študije na lokalni ravni; težavna klasifikacija zaraščenih njiv; velika količina točkovnih podatkov (potreba po zahtevni strojni in programski opremi); pomanjkanje ustrezne programske opreme, možnost objektivnih napak.

Zračno lasersko skeniranje se je uveljavilo zaradi pridobitve trirazsežnega položaja točk objektov. V nalogi sem dokazala, da je intenziteta zelo koristna dodana vrednost podatkom o višini. Z njeno pomočjo sem uspela izdelati karto pokrovnosti, ki ima na lokalni ravni precej več prednosti kakor slabosti. Z uvedbo ustrezne programske opreme (možnost kombiniranja ter velika hitrost obdelave vektorskih in rastrskih podatkov) ter (sicer precej dobrega) poznavanja lastnosti lidarskih podatkov in vplivov nanje bi bilo intenziteto smiselno uporabljati precej pogosteje. Vsekakor pa so tudi zgolj podatki o višini objektov na mnogih področjih zadosten razlog za pogostejšo rabo lidarja, še posebej v kombinaciji z drugimi vrstami podatkov (npr. DOF).

8 POVZETEK

Za celotno območje Slovenije obstaja mnogo digitalnih kart rabe tal oz. pokrovnosti, ki se med seboj tako ali drugače razlikujejo. Za pridobitev predstave o kartah pokrovnosti, ki so na voljo v Sloveniji, sem v začetnem poglavju naloge predstavila osnovne značilnosti najpomembnejših kart na to tematiko. Ugotovila sem, da karte večinoma zadoščajo zgolj analizam na ravni države oz. statistične regije. Ker poleg državne uporabnosti pokrovnost vse bolj zavzema mesto kot pomembna osnova za razne lokalne projekte, predvsem v zasebni sferi, sem v nalogi skušala izdelati karto pokrovnosti, ki bi bila primerna tudi za lokalne projekte, njena izdelava bi bila hitra in ekonomsko sprejemljiva, metodologija izdelave pa odprta za možnost prilagoditve sloja za specifične študije. Poleg hitre izdelave karte sem želela uporabiti vir podatkov, ki ga brez večjih težav znova pridobimo. Poleg omenjenih lastnosti mora biti karta uporabna v sistemih GIS ter združljiva z drugimi prostorskimi podatki. Osnovni vir, ki bi lahko zadostil takšni karti pokrovnosti, so dobro znani barvni digitalni ortofoto načrti merila 1:1000 (v nadaljevanju BDOF1) ter danes vse bolj uveljavljeni podatki lidarskega snemanja oziroma zračnega laserskega skeniranja, kjer imamo z oblakom točk predstavljene trirazsežne položaje objektov ter intenziteto odbitega signala od tega objekta.

Lidar s svojimi pridobljenimi podatki o višinah trenutno predstavlja najbolj natančno tehniko za izdelavo digitalnih modelov višin, vse več pa se uporablja tudi v geologiji, gozdarstvu, arheologiji, idr., zato sem te podatke skušala uporabiti tudi kot osnovni vir za izdelavo karte pokrovnosti nekega lokalnega območja. Pri tem sem skušala uporabiti podatke o višini in intenziteti. Potrdila sem ugotovitve številnih raziskovalcev lidarskih podatkov, da intenziteta opazovanega objekta sicer služi kot dober element za prikaz, vendar je odvisna od vrste dejavnikov in je precej težka za interpretacijo. Številni uporabniki lidarskih podatkov se je zato v interpretaciji izogibajo ali pa jo uporabljajo precej pavšalno, kar uporabniku ne more nuditi ustrezne pomoči. Sama sem podatke intenzitete skušala z različnimi načini izboljšati ter jih nato uporabila v največji možni meri. Na njihovi osnovi sem lahko zelo dobro izločila kategorije trava, njive in asfalt. Za izločitev dreves in stavb uporaba intenzitete žal ni nudila

ustreznih rezultatov, zato sem iz podatkov o višinah izračunala standardno deviacijo, ki se je za izločitev teh dveh kategorij pri dovolj veliki gostoti točk izkazala kot zelo uspešna.

V sklopu te naloge sem na osnovi samostojnih lidarskih podatkov uspela izdelati kakovostno (rastrsko in vektorsko) trirazsežno karto pokrovnosti lokalnega območja. Karta je uporabna za številne projekte, kot so urbanistično planiranje, projekti na področju turizma, idr. Za nalogo sem izbrala pet osnovnih kategorij, po potrebi pa bi jih lahko izločili tudi več. Karta je precej podrobna, saj so najmanjše enote kartiranja velike približno 5 m².

Levji delež s časovnega in kakovostnega vidika je pripadel predobdelavi (izboru ustreznih točk, preučitvi intenzitete, popravkom vrednosti točk, rastriranju), izbiri načina interpretacije ter ustrezni poobdelavi. Ko je metodologija izdelave karte znana, lahko izdelavo karte (izločitev posameznih kategorij pokrovnosti) izvedemo povsem avtomatsko, z minimalnim naporom in stroški. Pri tem dobimo karto položajne natančnosti 1 m ter zelo dobre tematske natančnosti. V primeru, da imamo zelo svež vir podatkov, lahko glede na visoko hitrost izdelave karte izdelamo karto, ki s časovnega vidika prikazuje dejansko stanje.

Prednosti takšnih kart so velika podrobnost za lokalne študije, hiter in cenovno ugoden način pridobitve sloja, časovna usklajenost podatkov, objektivna določitev pokrovnosti, možnost uporabe v GIS, možnost prilagoditve sloja za specifične študije, možnost pogostega osveževanja sloja ter možnost prikaza karte v trirazsežnem prostoru. Slabost je, da je karta uporabna zgolj za študije na lokalni ravni, saj velika količina točkovnih podatkov zahteva zahtevno strojno in programsko opremo.

Uporaba lidarskih podatkov se je kot zelo uspešna in nujno potrebna pokazala tudi pri izdelavi karte pokrovnosti na osnovi BDOF1. Seveda pa so nadaljnje raziskave v smeri odstranitve motečih vplivov na intenziteto še vedno dobrodošle in bodo vsekakor uporabo lidarskih podatkov povečale.

9 SUMMARY

There exist various digital land use and land cover maps of the whole Slovenia, which differ in one way or another. To make an overview of land cover maps of Slovenia, the opening chapter of this thesis presents basic features of the most important maps in question. On the whole, the maps are intended to serve analyses at the level of country or statistical region. Land cover serves national purposes, but since its role as a significant basis for various local projects, especially in private sphere, is gaining ground, I have tried to create a land cover map that could serve local projects as well. Its creation would be fast and economically acceptable, while the methodology of its making would be open to the adjustments of layer for specific studies. Moreover, I wanted to use the source of data which could be easily reacquired. Apart from the just mentioned features, the map must be applicable in the GIS systems and compatible with other spatial data. The basic sources to enable such land cover map are the well-known colour digital ortophoto maps at 1:1000 scale (DOF) and the increasingly used lidar data or airborne laser scanning data, where point cloud represents 3D locations of objects and the intensity of a lidar return signal from the object.

With its highly accurate elevation data, lidar is the most sophisticated technique for generating digital elevation models, and it is increasingly being used in geology, forestry, archeology, etc. I tried to use the data as a main source of generating the land cover map of a particular local area, making use of the elevation and intensity data. I can confirm the observations of several other lidar researchers that the intensity of the observed object provides a good visual representation, but it depends on many factors and is therefore not easy to interpret, for which reason numerous lidar data users will try to evade it or make only loose interpretation, and that offers no help to the user. I tried to enhance the intensity data using various methods, and applied them in the best way possible. This basis enabled me to determine the categories of grass, field and asphalt. The use of intensity, however, could not extract trees and buildings, so standard deviation was calculated from the lidar elevation data, which has actually proved to be highly successful if extracting the two categories at a high point density.

Within the framework of this thesis I have succeeded in creating a (raster and vector) 3D land cover map of local area of great quality, on the basis of independent lidar data. The map can be of use in numerous local projects, such as urban planning, tourism, etc. While generating it, different features of lidar data were handled in automated processes, namely: elevation, standard deviation of elevation and intensity. There are five categories that are determined in this thesis, although more detailed sub-categories could be introduced as well, if necessary. The map is fairly detailed; the smallest unit covers approximately 5 m².

The biggest share of my time, including quality work, was spent on preprocessing (appropriate points selection, study of intensity, point value correction, rasterizing), interpretation method selection, and an appropriate after-processing. Once the map creation methodology is determined, a map (individual land cover category extraction) can be generated fully automatically, with minimal effort and costs. The positional accuracy of the produced map is 1 m and it has a rather very high thematic accuracy. Since maps can be produced promptly, a new map can be created on the basis of new data to mirror actual state and condition.

Advantages of such maps are their usefulness for local studies, prompt and cost-friendly method of layer acquisition, time adjustment of data, objective land cover identification, GIS use possibility, possibility of layer adjustment for specific studies, possibility of frequent layer updating, and last but not least, the possibility of 3D map display. There is also one disadvantage: the map is useful merely for the study on a local level, since the great quantity of point data requires very powerful hardware and software technology.

The use of lidar data has proved very successful and appeared absolutely essential also when creating land cover map on the basis of DOF. Of course, further research of the influences on intensity is welcome and will undoubtedly take the use of lidar data at least one step forward.

VIRI

Uporabljeni viri

Abshire, J.B., Sun, X.L. 2005. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit measurement performance. *Geophysical research letters*, 32.
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentCon.jsp?punumber=9010> (01.10.2007).

AeroMap.
<http://www.aeromapss.com/lidar.htm> (15.09.2007).

Ahokas, E., Kaartinen, H. in Hyypä, J. 2003. A quality assessment of airborne laser scanner data.
http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/Ahokas_ALSDD2003.pdf (28.09.2007).

Airbornelasermapping.
<http://www.airbornelasermapping.com/ALMSkinny.html#Applications> (15.09.2007).

ALTM.
<http://www.optech.ca/altmapps.htm> (15.09.2007).

Andersen, H. 2007. The use of airborne laser scanner data (LIDAR) for forest measurement applications.
<http://westernforestry.org/wmens/m2002/andersen.ppt> (05.10.2007).

Baltsavias, E.P. 1999. Airborne Laser scanning: existing systems and firms and other resources. *ISPRS-Journal* 54, 2-3: 164-198.

Bitenc, M. 2007. Analiza podatkov in izdelkov zračnega laserskega skeniranja na projektu Neusiedler See. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo.

Boyd, D., in Hill, R. 2007. Validation of airborne lidar intensity values from a forested landscape using hymap data: preliminary analyses. *IAPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52*, 2007.
http://www.commission3.isprs.org/laser07/final_papers/Boyd_2007.pdf (01.10.2007).

Brandtberg, T., Warner, T., Landenberger, R., McGraw, J. 2003. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density LIDAR data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment* 85: 290-303.

Brenner, C., Dold, C., Jülge, K. 2002. Fusion, interpretation and combination of geodata for the extraction of topographic objects.

http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/Brenner_ALSDD2003.pdf (02.10.2007).

Briese, 2007. Airborne laser scanning – High quality digital terrain modelling.

http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo_1950.pdf (15.11.2007).

Brzank, A. in Heipke, C. 2006. Classification of lidar data into water and land points in coastal areas.

http://www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/2006/paper/Brzank_Alexander_Heipke_Christian_Watere_xtraction_final.pdf (02.10.2007).

Campbell, J.B. 1996. Introduction to remote sensing. New York, Taylor and Francis: 622 str.

Coren, F., Sterzai, P. 2005. Radiometric correction in laser scanning.

<http://www.ingentaconnect.com/content/tandf/tres/2006> (02.10.2007).

CORINE. Klasifikacijski ključ CORINE. 2007.

http://www.corine.dfd.dlr.de/media/download/clc_lut_en.pdf (02.10. 2007),

<http://reports.eea.europa.eu/COR0-landcover/en> (02.10. 2007),

<http://image2000.jrc.it/> (02.10. 2007).

Donoghue, D., Watt, P., Cox, N., Wilson, J. 2007. Remote sensing of species mixtures in conifer plantations using LiDAR height and intensity data. Remote Sensing of Environment 110: 509–522. Članek posredovan po elektronski pošti (11.09.2007).

Flood, M. 2001. Laser Altimetry: From Science to Commercial Lidar Mapping.

Photogrammetric engineering & Remote sensing. Volume 67, number 11.

<http://md1.csa.com/partners> (01.10.2007).

Foody, G. M. 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. Remote Sensing of Environment 80: 185-201.

http://www.yale.edu/ceo/OEFS/ClassificationArticle_by_Foody_2002.pdf (01.10.2007).

Gaveau, D.L.A., Hill, R.A. 2003. Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data. Canadian Journal of Remote Sensing, 29: 650- 657.

<http://pubs.nrc-cnrc.gc.ca/> (02.10.2007).

Geoin. Tehnologija LiDAR pri planiranju, projektiranju, vzdrževanju in upravljanju avtocest.

http://iaps.zrc-sazu.si/Files/File/Publikacije/delavnica%20lidar%202007/03_Supej.pdf

(18.01.2009).

GeoLas Consulting. 2007. Imaging Laser Altimetry.

<http://www.geolas.com/Pages/laser.html> (03.10.2007).

Göpfert, J., Heipke, C. 2006. Assessment of lidar DTM accuracy in coastal vegetated areas.

http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/ISPRS_Bonn_Goepfert_Heipke.pdf (15.09.2007).

GURS. Zbirka dejanske rabe tal.
<http://www.gu.gov.si/> (13.11.2007).

Hasegawa, H. 2006. Evaluations of LIDAR reflectance amplitude sensitivity towards land cover conditions.
<http://www.gsi.go.jp/ENGLISH/RESEARCH/BULLETIN/vol-53/53-6.pdf> (8.09.2007).

Helica.
<http://www.helica.it/eng/prod/applic.asp> (15.09.2007).

Hengl, T. 2006. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences* 32: 1283–1298.

Hodgson, M. in Bresnahan, P. 2004. Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation: Empirical Assessment and Error Budget.
http://people.cas.sc.edu/hodgsonm/Published_Articles_PDF/PE&RS_LIDAR_Error_Budget_Model_2004.pdf (01.10.2007).

Holmgren, J., Persson, Å. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 90: 415-423.
<http://www.sciencedirect.com> (03.10.2007).

Holmgren, J. 2003. Estimation of forest variables using airborne laser scanning. Doctoral thesis. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Silvestria* 278. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Resource Management and Geomatics, Umeå, Sweden: 43 str.

Hu, X., Tao, C. V. 2004. Automatic road extraction from dense urban area by integrated processing of high resolution imagery and lidar data.
<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm3/papers/288.pdf> (28.09.2007).

Hug, C., Wehr, A. 1997. Detecting and identifying topographic objects in imaging laser altimeter data. *IAPRS*, Vol. 32, Part III–4 W2, Stuttgart, September 17-19 1997.

Hug, C., Ulrich, A., Grimm, A. 2004. LITEMAPPER-5600 – A waveform-digitizing LiDAR terrain and vegetation mapping system.
http://www.isprs.org/commission8/workshop_laser_forest/HUG.pdf (05.10.2007).

Hyypä, J., Inkinen, M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *Photogrammetric Journal of Finland*, 16: 27–42.

Jelalian, A. V. 1992. *Laser radar systems*. Artech House, Boston and London: 292 str.
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1980easc.conf..546J> (01.10.2007).

Jonas, D. 2002. Airborne laser scanning: developments in intensity and beam divergence. AAM GeoScan Australia.

http://www.aamhatch.com.au/resources/pdf/publications/technical_papers/11arspc_jonas.pdf (9.09.2007).

Jutzi, B. in Stilla, U. 2006. Precise range estimation on known surfaces by analysis of full-waveform laser.

http://www.isprs.org/commission3/proceedings06/singlepapers/O_19.pdf (06.10.2007).

Kaasalainen, S., Hyypä, J., Litkey, P., Hyypä, H., Ahokas, E., Kukko, A., Kaartinen, H. 2007. Radiometric calibration of ALS intensity. IAPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52, 2007.

http://www.commission3.isprs.org/laser07/final_papers/Kaasalainen_2007.pdf (15.10.2007).

Katzenbeisser, R. 1999. Echo detection. Technical note. TopoSys GmbH Ravensburg.

<http://www.toposys.com/pdf-ext/Engl/echo-detec3.pdf> (8.09.2007).

Kobler, A., Pfeifer, N., Ogrinc, P., Todorovski, L., Oštir, K., Džeroski, S. 2007. Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from Aerial Laser Scanner Data in forested terrain. Remote Sensing of Environment 108: 9–23. Članek posredovan po elektronski pošti (11.09.2007).

Kokalj, Ž., Oštir, K. 2006. Ugotavljanje pokrovnosti Slovenije iz satelitskih posnetkov Landsat. Geografski vestnik 78-2, 2006: 85-95. Ljubljana.

Kukko, A., Hyypä, J. 2007. Laser scanner simulator for system analysis and algorithm development: a case with forest measurements. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, September 12-14, 2007, Finland.

Kraus, K., Ressler, C., Roncat, A. 2006. Least Squares Matching for Airborne Laser Scanner Data. ISBN 3-9809030-4-4: 7 str.

Lipej, B. 2001. Državni projekti na območju evidentiranja nepremičnin. Geodetski vestnik 45-3: 226-245.

Lovell, J. L., Jupp, D. L. B., Culvenor, D. S., Coops, N. C. 2003. Using airborne and groundbased ranging LiDAR to measure canopy structure in Australian forests. Canadian Journal of Remote Sensing, 29(5): 607-622.

Lutz, E., Geist, T., Stötter, J. 2003. Investigations of airborne laser scanning signal intensity on glacial surfaces-utilizing comprehensive laser geometry modelling and orthophoto surface modelling (a case study: Svartiseibreen, Norway). IAPRS, 34(3/W 13).

http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/Lutz_ALSDD2003.pdf (9.09.2007).

Luzum, B., Starek, M., Slatton, K.C. 2004. Normalizing ALSM intensities. GEM center report No. Rep_2004-07-001. U.S.A.: University of Florida.

Maas, H.G. 2001. On the Use of Pulse Reflectance Data for Laserscanner Strip Adjustment. IAPRS Vol. XXXIV-3/W4. Annapolis, Maryland.

Maier, B., Tiede, D., Dorren, L. 2006. Assessing mountain forest structure using airborne laser scanning and landscape metrics.

http://www.commission4.isprs.org/obia06/Papers/08_Automated%20classification%20Lidar/OBIA2006_Maier_Tiede_Dorren.pdf (01.10.2007).

MKGP. Dejanska raba tal. 2007.

<http://rkg.gov.si/GERK/> (12.11.2007).

Moffiet, T., Mengersen, K., Witte, C., King, R., Denham, R. 2005. Airborne laser scanning: Exploratory data analysis indicates potential variables for classification of individual trees or forest stands according to species. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 59, Issue 5, 1 August 2005: 289-309. Članek posredovan po elektronski pošti (11.09.2007).

Morsdorf, F., Frey, O., Meier, E., Itten, K., Allgöwer, B. 2006. Assessment of the influence of flying height and scan angle on biophysical vegetation products derived from airborne laser scanning. Proceedings of Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14–15 February, Vienna, Austria: 145–150.

Nardinocchi, C., Forlani, G., Zingaretti, P. 2003. Classification and filtering of laser data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.

http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/Nardinocchi_ALSD_D2003.PDF (02.10.2007).

Nayegandhi, A., Brock, J.C., Wright, C.W., O'Connell, M.O. 2006. Evaluating a small-footprint, waveform-resolving lidar over coastal vegetation communities. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 2006-12:1408-1417.

Nobrega, R., O'Hara, C. 2005. Segmentation and object extraction from anisotropic diffusion filtered lidar intensity data.

http://www.commission4.isprs.org/obia06/Papers/07_Adaption%20and%20further%20development%20I/OBIA2006_Nobrega_OHara.pdf (05.10.2007).

Oštir, K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Založba ZRC, 2006.

Oštir, K., Stančič, Z., Podobnikar, T., Vehovar, Z. 2000. Pridobivanje in uporaba prostorskih podatkov visoke ločljivosti pri načrtovanju omrežja mobilne telefonije. V: Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 1999-2000. Ljubljana, Znanstvenoraziskovalni center SAZU, str. 143 – 152.

Pavlek, F. 2007. Lidarsko in foto snemanje na območju jugozahodne Slovenije – območje Slivnice. Končno poročilo podjetja Geoin, d.o.o..

Petek, F. 2005. Spremembe rabe tal v slovenskem alpskem svetu. Geografija Slovenije 11. Ljubljana, Založba ZRC, 216 str.

Pfeifer, N. in Briese, C. 2007. Laser scanning – principles and applications.
http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo_1951.pdf (05.10.2007).

Popescu, S. in Zhao, K. 2007. A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. Remote Sensing of Environment. Članek posredovan po elektronski pošti (11.09.2007).

Ramšak, Ž. 2004. Vrednotenje pokrajinskoekoloških tipov Slovenije v luči pokrovnosti, izdelane s klasifikacijo satelitskih posnetkov Landsat. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo.

Shin, J., Yoon, J., Lee, K., Kim, T. 2007. Characteristics of intensity signal from airborne lidar data. Asian association of remote sensing.
http://www.aars-acrs.org/acrs/proceeding/ACRS2006/Papers/M-2_M8.pdf (03.10.2007).

Song, J.H., Han, S.H., Yu, K., Kim Y. 2002. Assessing the Possibility of Land-cover Classification Using Lidar Intensity Data. IAPRS 34, 4. Graz, 9-13 September.
<http://www.isprs.org/commission3/proceedings02/papers/paper128.pdf> (03.10.2007).

Tao, G., Yasuoka, Y. 2001. Combining high resolution satellite imagery and airborne laser scanning data for generating bareland dem in urban areas.
<http://www.acrors.ait.ac.th/kunming/download/GuoTao.pdf> (01.10.2007).

TopoSys.
<http://www.toposys.com> (15.10.2007).

Tóvári, D. in Vögtle, T. 2004. Object classification in laserscanning data.
http://www.isprs.org/commission8/workshop_laser_forest/TOVARI.pdf (01.10.2007).

Triglav, J. 2004. Letalsko lasersko skeniranje. Življenje in tehnika, oktober 2004: 20-32.

URSZR (Uprava RS za zaščito in reševanje), 2005. Ciljni razvojni projekt: Merske metode za spremljanje premikov zemeljskih plazov.
http://www.sos112.si/slo/tdocs/merske_metode.pdf (3.10.2007).

USGS.
<http://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr-03-395/ofr-03-395.html> (01.10.2007).

Wagner, W., Ullrich, A., Melzer, T., Briese, C., Kraus, K. 2004. From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges.
http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/ISPRS_2004_Istanbul/Airborne_Laser_ww_tm_cb_kk.pdf (01.10.2007).

Wagner, W. 2005. Physical Principles of Airborne Laser Scanning. Paper from University Course: Laser scanning - Data Acquisition and Modeling. Institute of photogrammetry and remote sensing, TU Vienna, 6. 10.-7. 10. 2005.

Wagner, W., Roncat, A., Melzer, T., Ullrich, A. 2007. Waveform analysis techniques in airborne laser scanning. IAPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52, 2007.

Watt, P.J. 2005. An evaluation of LiDAR and optical satellite data for the measurement of structural attributes in British upland conifer plantation forestry. Doctoral thesis. Department of Geography, Durham University, England.

Wikipedia, 2008. Intensity (physics).
<http://en.wikipedia.org/wiki/Intensity> (17.10.2008).

Willem van der Vegt in Hoffmann, 2007. Airborne Laser Scanning Reaches Maturity.
<http://training.esri.com/campus/library> (01.10.2007).

Zakon o državni statistiki. Uradni list RS, št. 45/95.

Zakon o evidentiranju nepremičnin, državne meje in prostorskih enot. Ur. l. št. RS 52/2000.

Zakon o urejanju prostora /ZUreP-1/. Ur.l. RS, št. 110/2002 (8/2003 - popr.), 58/2003 (8/2003 - popr.) – 151. člen.

Ostali viri

Digidata, 2004. Poročila o izvajanju projekta prve vzpostavitve zbirke dejanske rabe zemljišč. Končna poročila podjetja Digidata, d.o.o. Poročila posredovana po elektronski pošti (30.05.2007).

Pravilnik o evidenci dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč. Ur.l. RS, št. 90/2006.

Pravilnik o vodenju vrst rabe zemljišč v zemljiškem katastru. Uradni list SRS, št. 41/82.

Pravilnik o vsebini in načinu vodenja zbirke podatkov o dejanski rabi prostora. Ur.l. RS, št. 9/2004.

Pravilnik za katastrsko klasifikacijo zemljišč 1979. Uradni list SRS 28/79. Ljubljana.

RS MKGP 2002, Interpretacijski ključ – priročnik za izobraževanje.
http://rkg.gov.si/GERK/docs/RABA_Int-Kljuc.pdf. (12.11.2007).

SSKJ. Slovar slovenskega knjižnega jezika.
<http://bos.ZRC SAZU.si/sskj.html> (10.04.2008).

SURS. Karta pokrovnosti.
http://www.stat.si/pub_rr815-05.asp (15.11.2007).

Zemljiški kataster. 2007.

http://www.gu.gov.si/si/delovnapodrocja_gu/podatki_gu/zemljiski_kataster/ (02.10. 2007),

<http://www.geodetska-uprava.si/gu/aplik/CEPP/index.jsp> (02.10. 2007),

<http://e-uprava.gov.si/e-uprava/dogodkiPrebivalci.euprava?zdid=1385&sid=1163> (02.10. 2007),

http://193.2.111.28/gu/podatki/Zem_kat/Kat_klas/Kat_klas.asp (02.10. 2007).

PRILOGE

Priloga A: Programska oprema za obdelavo podatkov

Programska oprema, uporabljena za obdelavo rastrskih podatkov

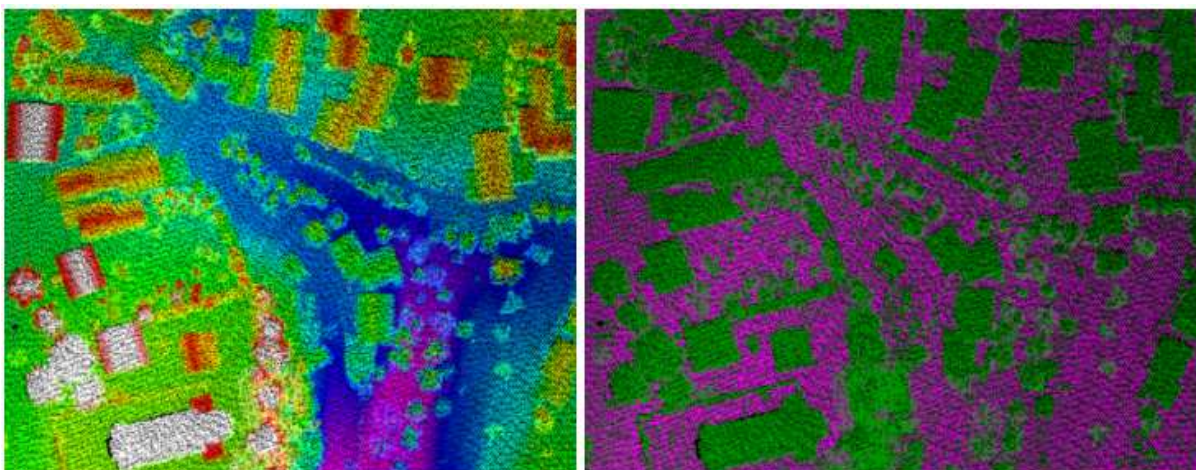
Rastrsko podobo lahko prikazujemo v številnih programih, pri njeni obdelavi in analizi pa se število programov močno omeji. V svoji nalogi sem uporabljala predvsem program Erdas Imagine, delno tudi Envi. Nad rastrskimi podobami lahko izvajamo številne analize. Prednost je majhna velikost datotek in zato hitra obdelava podatkov, slabost pa prostorska ločljivost, večinoma omejena z velikostjo piksla ter številom atributov, ki jih nosi posamezen piksel.

Programska oprema, uporabljena za obdelavo vektorskih podatkov

Vektorski podatki se lahko obdelujejo v številnih programih, vendar sem za prikaz oblakov točk uporabila program, namenjen izključno podatkom laserskega skeniranja, LasEdit.

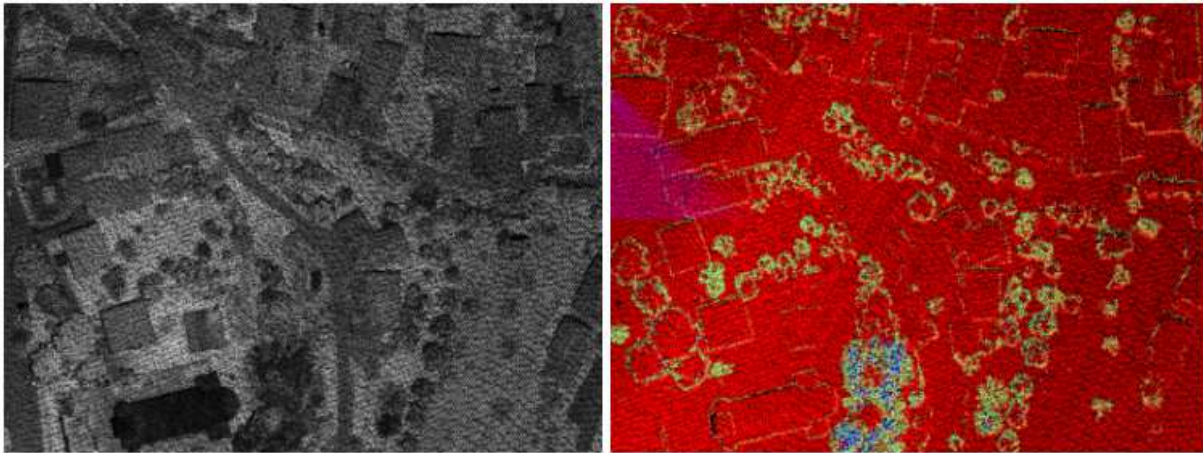
Osnovne »funkcije«, ki jih program omogoča, so:

- prikaz oblaka točk glede na višino (slika 89 levo) ali na razdelitev na talne in netalne točke (desno):



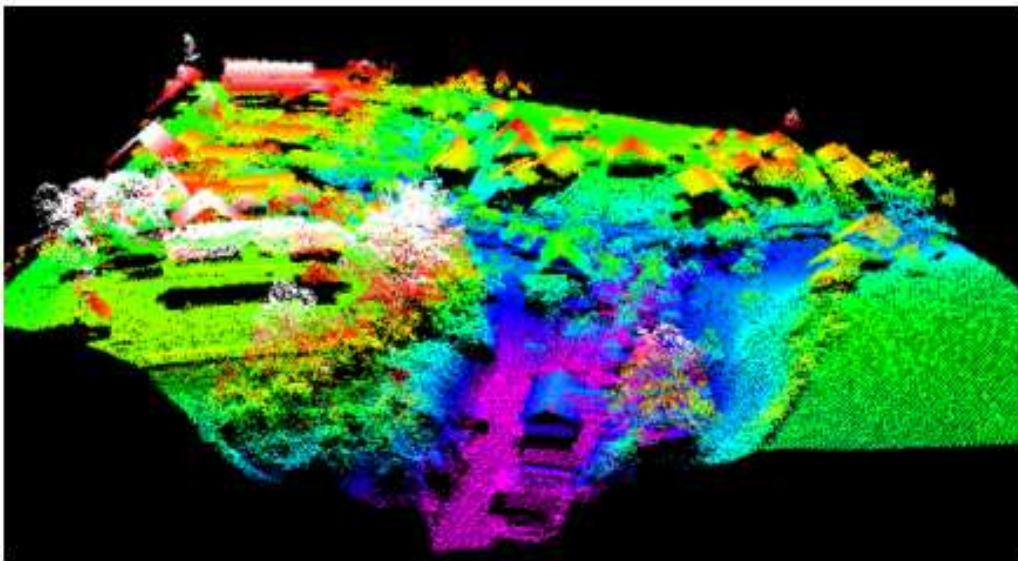
Slika 89: Prikaz oblaka točk glede na višino (levo) ali na vrsto točk tla oz. netla (desno).
Fig. 89: Point cloud, coloured by elevation (left) or type of points (ground or nonground) (right).

- prikaz oblaka točk glede na intenziteto (slika 90 levo) ali na red odboja (desno):



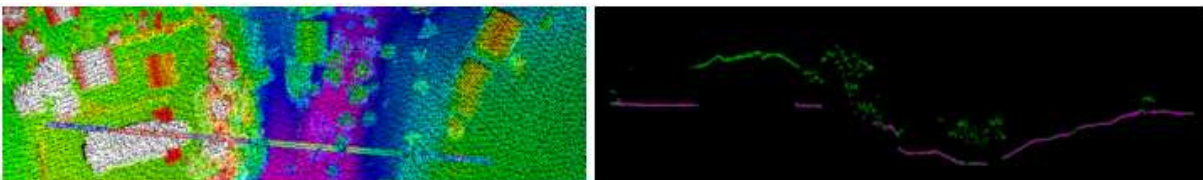
Slika 90: Prikaz oblaka točk glede na intenziteto (levo) ali na red odboja (desno).
Fig. 90: Point cloud, coloured by intensity value (left) or type of return signal (firs, last...) (right).

- trirazsežen prikaz točk (slika 91):



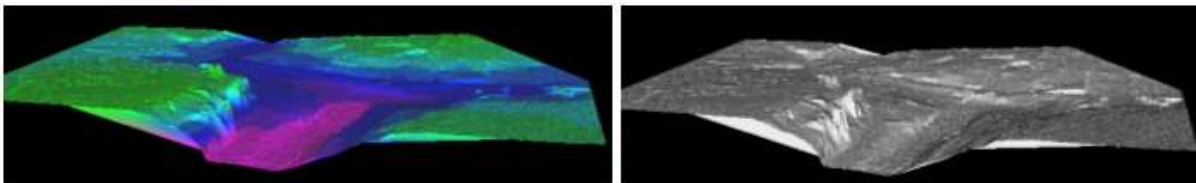
Slika 91: Trirazsežen oblak točk.
Fig. 91: 3D point cloud.

- prikaz profila (slika 92):



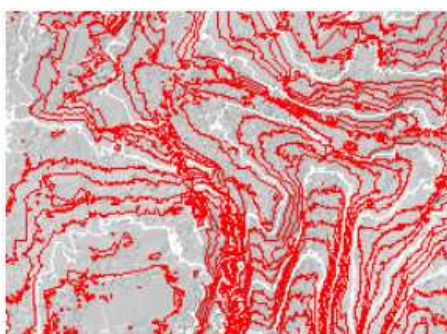
Slika 92: Prikaz profila oblaka točk.
Fig. 92: Profile of point cloud.

- prikaz barvnega ali črno-belega digitalnega modela reliefa (na osnovi TIN) (slika 93):



Slika 93: Barvni oz. črno-beli DMR.
Fig. 93: Coloured or black and white DEM.

- prikaz plastnic na želen višinski razmik med plastnicami (slika 94):



Slika 94: Plastnice.
Fig. 94: Contours.

Poleg osnovnih funkcij lahko uporabimo še mnoge druge, vendar pri vseh operiramo predvsem z različnimi vrstami prikaza oblaka točk, kar mi je pri nalogi predstavljalo precejšnjo omejitev. Program sicer prikaže splošno statistiko o podatkih (število točk, povprečna razdalja med točkami, povprečna gostota točk, prostorski obseg podatkov itd.), ne moremo pa v njem izračunati npr. standardne deviacije višine točk v mreži 1 m^2 . S tem namenom sem točke prevzela v tekstovni datoteki ter jih uporabila v programu Matlab. Za izračun zelene standardne deviacije sem zapisala program in po zagonu ugotovila, da Matlab ni namenjen za obdelavo takšne količine podatkov. Ker nisem našla programske opreme, ki bi izvajala analize na kombinaciji podatkov (npr. število točk v pikslu oz. povprečna višina točk v pikslu), sem uporabila MapInfo. Iz tekstovne datoteke sem uvozila točke ter jih prikazala v pravkar omenjenem programu. Tudi tukaj sem hitro ugotovila, da bo že sam prikaz točk precej počasnejši kakor v programu LasEdit, vendar izvedljiv. Nad točke sem napela mrežo, ki je predstavljala piksle rastrske podobe in izvedla mnoge analize.

Pretvorba lidarskih podatkov v rastrsko obliko

Zaradi lastnosti, navedenih zgoraj (nezmožnost kombinacije vektorskih in rastrskih podatkov, izredno počasna obdelava vektorskih podatkov...), sem informacije, ki sem jih potrebovala od lidarskih podatkov, morala pretvoriti v rastrsko obliko. Tudi tukaj se je pojavil problem izbire programske opreme. LasEdit namreč te pretvorbe ne omogoča, Erdas pri velikem številu točk odpove. Kot primeren program za pretvorbo se je izkazal Envi. Pretvorba točk v raster je bila zelo hitra, vendar je treba pri prenosu rastrske podobe v Enviju v rastrsko podobo v Erdasu biti posebno pazljiv pri izbiri formata in koordinatnega sistema podobe. Poleg tehničnih omejitev pretvorbe sem bila obremenjena še z uporabniškimi. Program LasEdit je sicer uporabniško zelo prijazen, kar pa se za podrobnejše raziskave ne izkaže vedno primerno. Ne vemo namreč po kakšni metodi so bile točke klasificirane na talne in netalne. Ne vemo kakšna velikost piksla bi bila primerna za določeno gostoto točk. Neznanka ostaja tudi izbira točk za prikaz podobe intenzitete ter metoda rastriranja itd. Na ta vprašanja sem si skušala odgovoriti iz mnogih člankov, logičnega sklepanja in nenazadnje praktičnega preizkušanja. Kljub precejšnjim naporom pri pretvorbi točk v raster, sem za vsa območja uspela pridobiti optimalne zelene podobe.

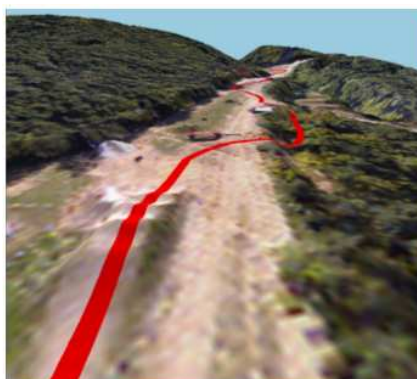
Priloga B: Izdelava trirazsežnega modela kolesarske proge

Primer uporabnosti klasifikacije sem skušala ponazoriti z izdelavo trirazsežnega modela kolesarske proge "four cross" na Pohorju (območje MB 2). Značilnosti točk lidarskega snemanja omogočajo izdelavo zelo natančnega DMR. Na sliki 95 sem prikazala trirazsežni DMR (pogled s cilja proge), nanj pa sem naložila tudi vektorsko traso proge.



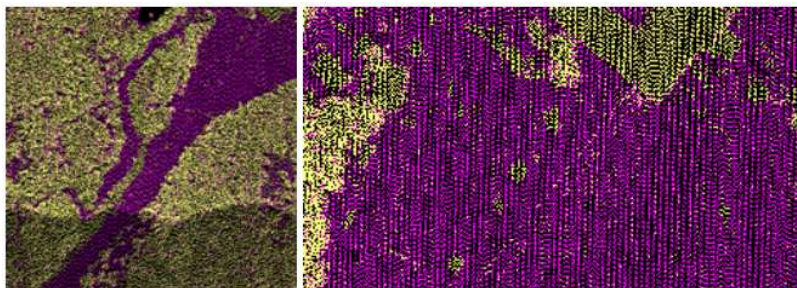
Slika 95: Različna trirazsežna pogleda DMR s traso kolesarske proge.
Fig. 95: Different 3D views of DEM with cycling line.

Na trirazsežni DMR položimo BDOF1 (slika 96).



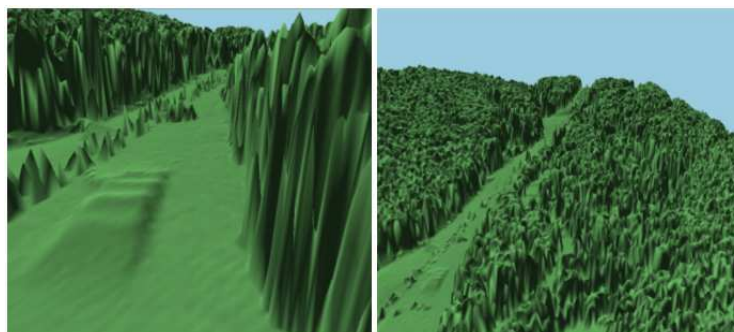
Slika 96: BDOF1 na trirazsežnem DMR.
Fig. 96: DOF on 3D DEM.

Izkaže se potreba po dvigu dreves na njihovo višino. Potrebujemo torej DMP. Specifika tega območja je, da čeznjo poteka vzpenjača, zato je v tisti liniji kar nekaj točk, ki pačijo DMP (slika 97).



Slika 97: Točke vzpenjače nad traso kolesarske proge.
Fig. 97: Cable railway above cycling line.

DMP je zato videti kakor na sliki 98.



Slika 98: DMP na območju kolesarske proge.
Fig. 98: DSM in cycling area.

Če nanj položimo BDOF1, dobimo situacijo, prikazano na sliki 99.



Slika 99: BDOF1 na DMP na območju kolesarske proge.
Fig. 99: DOF on DSM in cycling area.

Za izločitev moteče vzpenjače moramo uporabiti klasifikacijo. Ohraniti moramo samo stavbe in drevesa ter jih dvigniti na njihovo višino, vse ostale objekte pustimo na višini DMR. Na sliki 93 tudi opazimo, da moramo progo pod drevesi izrezati, da ne bo potekala po krošnjah dreves.

Drevesa in stavbe sem zato klasificirala po metodah, opisanih v prejšnjih poglavjih. Pri tem sem na progi pustila višino ciljnega balona ter večjega stebra vzpenjače. Rezultat je prikazan na sliki 100.



Slika 100: DMP, popravljen s klasifikacijo.
Fig. 100: DSM; corrected with classification.

Vzpenjača je uspešno izločena. Tudi balon je dvignjen, vendar je njegova pravilna lokacija vidna šele iz pogleda "od zgoraj in od daleč" (slika 100 desno), saj je tudi BDOF1 posnet iz takšne perspektive. Seveda je njegova oblika zelo popačena, saj ga pokriva občutno premalo število lidarskih točk. Popačene so tudi oblike dreves, vendar je za hitro predstavo o lokaciji proge v prostoru to več kot dovolj. Pravilno so se locirale tudi sence dreves, ki so na tleh. Za konec v model dodajmo še traso proge, ki je vidna samo na območjih izven gozda (slika 101).



Slika 101: Trirazsežni model trase kolesarske proge.
Fig. 101: 3D model of cycling line.