

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo

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



Univerzitetni program Geodezija,  
smer Geodezija

Kandidatka:

**Maja Bitenc**

# **Analiza podatkov in izdelkov zračnega laserskega skeniranja na projektu Neusidler See**

**Diplomska naloga št.: 702**

**Mentor:**

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

**Somentor:**

Maria Attwenger

Ljubljana, 11. 1. 2007

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

<b>Stran z napako</b>	<b>Vrstica z napako</b>	<b>Namesto</b>	<b>Naj bo</b>
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana **MAJA BITENC** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:

**»ANALIZA PODATKOV IN IZDELKOV ZRAČNEGA LASERSKEGA SKENIRANJA  
NA PROJEKTU NEUSIEDLER SEE«.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,  
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 14.12.2006

Maja Bitenc

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

- UDK:** 528.7:528.8(043.2)
- Avtor:** Maja Bitenc
- Mentor:** doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
- Somentor:** Maria Attwenger, univ. dipl. inž. (TU Dunaj)
- Naslov:** Analiza podatkov in izdelkov zračnega laserskega skeniranja na projektu Neusiedler See
- Obseg in oprema:** 123 str., 11 pregl., 70 sl., 51 en., 7 pril.
- Ključne besede:** zračno lasersko skeniranje, projekt Neusiedler See, kakovost DMR, intenziteta

### **Izvleček**

Glavna tema diplomske naloge je zračno lasersko skeniranje, ki predstavlja atraktivno, učinkovito in napredno tehnologijo daljinskega zaznavanja površja in objektov na njem. Delovanje omenjene tehnologije in aktualne smernice razvoja sem kot študentka v programu Erasmus spoznavala na I.P.F TU Dunaj. V teoretičnem delu diplomske naloge so najprej opisane osnove merskega sistema. Laserski skener meri polarne koordinate odbitega laserskega žarka, s kinematično metodo DGPS je določen položaj in z meritvami INS orientacija LS v prostoru v trenutku registracije odboja. 3D koordinate lidarskih točk so nato določene naknadno z združitvijo meritev. Za povečanje absolutne in relativne natančnosti lidarskih pasov se izvede postopek preverjanja kakovosti in skrbnega georeferenciranja pasov. Naslednji korak obdelave je filtriranje lidarskih točk ter interpolacija digitalnih modelov. Najpomembnejši je digitalni model reliefa. Vključena sem bila v projekt ZLS nacionalnega parka Neusiedler See – Seewinkel, katerega glavni cilj je bil izdelava natančnega DMR-ja za potrebe hidroloških analiz. Uporabljena je bila metoda hierarhične robustne interpolacije. Na podatkih projekta Neusiedler See sem izvedla dve ločeni analizi. Namen prve je bil s programom *sigmaDTM.exe* preveriti kakovosti DMR-ja na območju projekta. Uporaba programa je preprosta, rezultat pa podroben opis kakovosti DMR-ja z lokalnimi parametri kakovosti. Druga analiza se je nanašala na intenziteto odboja, ki se kot dodatna meritev registrira v LS in nosi informacije o odbojnosti tarče. Namen je bil ugotoviti, kako in katere pojave se lahko identificira in klasificira na podlagi vrednosti intenzitete. Razpoznavanje nekaterih pojavov na terenu je sicer mogoče, vendar za natančnejšo klasifikacijo le lidarski podatki ne zadostujejo.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 528.7:528.8(043.2)  
**Author:** Maja Bitenc  
**Supervisor:** Assist. Prof. Dr. Mojca Kosmatin Fras, Ph.D.  
**Cosupervisor:** Maria Attwenger, Dipl.-Ing. (TU Vienna)  
**Title:** Analysis of Airborne Laser Scanning data and products  
in the project Neusiedler See  
**Notes:** 123 p., 11 tab., 70 fig., 51 eq., 7 ann.  
**Key words:** Airborne laser scanning, project Neusiedler See, DTM quality,  
intensity

**Abstract**

The main topic of my diploma thesis is attractive, useful and advanced technology of remote sensing, called airborne laser scanning. I have learned about the system and his state-of-the-art research at the I.P.F. TU Vienna, while studying there in Erasmus program. In the first, theoretical part, I explain the principle of different ALS measurements. The laser scanner measures a bundle of 3D-vectors (polar coordinates), which are positioned by DGPS and oriented by IMU. In post-flight processing, the laser range, scan angle, kinematic DGPS data and INS data are combined to accurately determine the position of a point on the Earth's surface. In order to enhance the relative and absolute accuracy, quality check and fine georeferencing of ALS strips have to be done. The next step is filtering the ALS data and interpolating the digital model. The main model is DTM, which was in the case of the project Neusiedler See, calculated with robust linear prediction in a hierarchical approach. It provides accurate model needed for hydrological analyses. I used the data of the mentioned project for two separated analyses. First, I check the quality of the DTM using the I.P.F. program *sigmaDTM.exe*. Results (local quality parameters) are easily computed and present detailed quality information. The second analysis aims to investigate intensity (measured with LS) for the purpose of the land cover identification and classification. Some land cover is separable with intensity data, but it was found out, that just ALS data is not sufficient.

## ZAHVALA

Najprej bi se iskreno zahvalila mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras, pri kateri se je začelo in nenazadnje tudi končalo moje diplomsko delo. Glede na željo po študiju v tujini me je usmerila in osebno priporočila na I.P.F. TU Dunaj, v zadnjih mesecih pa pozorno spremljala in popravljala pisanje diplomske naloge. Hvala za ves čas, trud in ne le strokovno pomoč.

Velika zahvala gre celotnemu osebju inštituta I.P.F. na Dunaju za prijazen sprejem, pomoč pri vsakem problemu in odgovore na številna strokovna in zvedava vprašanja. Hvala tudi, ker ste mi omogočili spoznavanje fotogrametrije in daljinskega zaznavanja nasploh in me še bolj navdušili za delo na tem področju. S hvaležnostjo se spominjam prof. dr. Karla Krausa, ki je žal kmalu po mojem odhodu iz Dunaja nepričakovano preminil. V času izmenjave mi je v vseh pogledih prijazno pomagal. Seveda se moram posebej zahvaliti somentorici Marii Attwenger, ki je usmerjala moje delo na inštitutu kljub svojim številnim obveznostim.

Najlepša hvala staršema za vso finančno in moralno podporo skozi vsa študijska leta. Brez vaju ne bi mogla tako brezskrbno uživati študentskih let in pričujoča diploma ne bi bila takšna, kot je.

Hvala bratu Marku in njegovi ženi Maji za vzpodbude in nasvete pri pisanju ter oblikovanju besedila.

Nenazadnje hvala tudi vsem dragim prijateljem, ki ste mi stali ob strani ta čas in potrpežljivo prenašali moje tegobe in se tudi veselili z menoj.

**KAZALO VSEBINE**

<b>1</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OSNOVE TEHNOLOGIJE ZRAČNEGA LASERSKEGA SKENIRANJA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Uvod v metodo zračnega laserskega skeniranja .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Osnove metode ZLS.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3</b>	<b>Zajem podatkov z merskim sistemom ZLS .....</b>	<b>8</b>
<b>2.4</b>	<b>Laserski razdaljemer in merjenje razdalje .....</b>	<b>9</b>
2.4.1	Laserski žarek .....	9
2.4.2	Merjenje razdalje.....	10
2.4.3	Natančnost merjene razdalje .....	12
2.4.4	Ločljivost merjene razdalje.....	12
2.4.5	Največja izmerjena razdalja .....	13
<b>2.5</b>	<b>Naprava za odklon laserskih žarkov in merjenje odklona.....</b>	<b>13</b>
2.5.1	Skener z nihajočim zrcalom (angl. oscillating mirror).....	14
2.5.2	Skener z rotirajočo prizmo (angl. rotating polygon).....	15
2.5.3	Skener z optičnimi vlakni (angl. fiber scanner) .....	15
2.5.4	Palmerjev skener .....	16
<b>2.6</b>	<b>Sistem za določanje položaja in orientacije POS .....</b>	<b>17</b>
2.6.1	Določanje položaja s sistemom GPS .....	18
2.6.2	Določanje orientacije s sistemom INS .....	19
<b>2.7</b>	<b>Registracija večkratnega odboja laserskega pulza .....</b>	<b>20</b>
<b>2.8</b>	<b>Parametri merskega sistema ZLS .....</b>	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>OBDELAVA MERITEV IN IZDELKI ZLS.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Integracija sistema DGPS in INS .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>Neposredna orientacija laserskega skenerja .....</b>	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>Natančnost 3D koordinat laserskih točk.....</b>	<b>29</b>
<b>3.4</b>	<b>Simultana povezava pasov ZLS .....</b>	<b>32</b>
3.4.1	Preverjanje kakovosti lidarskih podatkov .....	33
3.4.2	Skrbno georeferenciranje lidarskih podatkov .....	33

3.4.2.1	Določitev veznih ploskev .....	34
3.4.2.2	Določitev terenskih oslonilnih ploskev .....	36
3.4.2.3	Simultana 3D blokovna izravnava pasov po MNK.....	37
<b>3.5</b>	<b>Izdelava digitalnega modela reliefa .....</b>	<b>38</b>
3.5.1	Iterativna robustna interpolacija .....	39
3.5.2	Hierarhična robustna interpolacija.....	42
<b>3.6</b>	<b>Uporaba ZLS v praksi.....</b>	<b>43</b>
3.6.1	Izdelava DMR-ja za različne izdelke, ki se jih uporablja v GIS-ih in kartografiji....	44
3.6.2	Gozdarstvo.....	44
3.6.3	Obalno inženirstvo.....	45
3.6.4	Kartiranje koridorjev .....	46
3.6.5	Kartiranje poplavnih območij.....	47
3.6.6	Modeliranje mest .....	47
3.6.7	Odziv na naravno nesrečo in ocenitev škode.....	48
3.6.8	Zaščita naravne dediščine – mokrišča in druga težko dostopna območja .....	48
3.6.9	Arheologija .....	48
<b>4</b>	<b>PROJEKT ZLS NACIONALNEGA PARKA NEUSIEDLER SEE-SEEWINKEL V AVSTRIJI .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1</b>	<b>Motivacija in okvir izvedbe projekta Neusiedler See-Seewinkel .....</b>	<b>50</b>
<b>4.2</b>	<b>Izvedba misije zračnega laserskega skeniranja Neusiedler See .....</b>	<b>53</b>
4.2.1	Merski sistem in planiranje misije ZLS.....	53
4.2.2	Zajeti podatki.....	56
4.2.3	Obdelava zajetih podatkov v podjetju TopScan .....	57
4.2.4	Rezultati obdelave podjetja TopScan .....	57
<b>4.3</b>	<b>Terenske meritve .....</b>	<b>58</b>
<b>4.4</b>	<b>Obdelava 3D podatkov za izračun digitalnega modela.....</b>	<b>59</b>
4.4.1	Preverjanje kakovosti .....	60
4.4.2	Skrbno georeferenciranje.....	62
4.4.3	Upoštevanje goeidne ondulacije.....	64
4.4.4	Izračun digitalnih modelov reliefa in površine v SCOP++ .....	64
4.4.5	Združitev avstrijskega DMR z madžarskim .....	67
4.4.6	Transformacija ETRS89 (UTM cona 33) v MGI (BMN) .....	67
4.4.7	Združitev z DMR-jem iz leta 1999.....	68
<b>5</b>	<b>KONTROLA KAKOVOSTI DIGITALNEGA MODELA RELIEFA .....</b>	<b>69</b>
<b>5.1</b>	<b>Globalni parametri kakovosti DMR-ja .....</b>	<b>70</b>



<b>5.2</b>	<b>Lokalni parametri kakovosti DMR-ja .....</b>	<b>71</b>
5.2.1	Razporeditev originalnih točk.....	72
5.2.2	Ukrivljenost terena.....	73
5.2.3	Natančnost višin originalnih terenskih točk (RMSE) .....	74
5.2.4	Kakovost modela DMR .....	76
<b>5.3</b>	<b>Lokalni parametri kakovosti DMR-ja v projektu Neusiedler See .....</b>	<b>78</b>
5.3.1	Izračun vrednosti lokalnih parametrov v programu sigmaDTM.exe.....	79
5.3.2	Vizualizacija rezultatov.....	81
5.3.3	Primerjava lokalnih parametrov kakovosti za različne pojave .....	86
<b>6</b>	<b>MERITVE INTENZITETE ODBOJA LASERSKEGA ŽARKA .....</b>	<b>89</b>
<b>6.1</b>	<b>Različne uporabe meritev intenzitete odboja .....</b>	<b>89</b>
<b>6.2</b>	<b>Opredelitev intenzitete odbitega laserskega žarka .....</b>	<b>91</b>
<b>6.3</b>	<b>Enačba radarja.....</b>	<b>92</b>
<b>6.4</b>	<b>Merjene vrednosti intenzitete .....</b>	<b>94</b>
<b>6.5</b>	<b>Prečni prerez odbitega laserskega žarka .....</b>	<b>96</b>
<b>6.6</b>	<b>Analiza intenzitete odboja na območju projekta Neusiedler see.....</b>	<b>98</b>
6.6.1	Podatki za analizo intenzitete na območju Neusiedler See.....	99
6.6.2	Analiza intenzitete znotraj določenih pojavov.....	101
6.6.3	Analiza vplivov na merjeno intenziteto .....	104
6.6.4	Popravki merjene intenzitete za identične točke.....	105
6.6.4.1	Priprava podatkov lidarskih točk .....	106
6.6.4.2	Iskanje identičnih točk in analiza razlik spremenljivk.....	107
6.6.5	Izračun popravkov in normalizacija intenzitete.....	110
6.6.6	Klasifikacija pojavov .....	112
6.6.7	Sklep .....	113
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>114</b>
	<b>LITERATURA IN VIRI.....</b>	<b>117</b>
	<b>PRILOGE</b>	
	<b>Priloga A: Določitev absolutne natančnosti DMR-ja z uporabo triangulacijskih točk</b>	
	<b>Priloga B: Uvodno besedilo programa <i>sigmaDTM.exe</i></b>	
	<b>Priloga C: Primer uporabe in delovanja programa <i>sigmaDTM.exe</i></b>	

**Priloga D: Rezultati analize kakovosti DMR-ja z lokalnimi parametri**

**Priloga E: Programska koda za izračun identičnih točk (*Matlab*)**

**Priloga F: Prileganje linearne funkcije in normalizacija intenzitete (*Matlab*)**

**Priloga G: Fotokopija dovoljenja I.P.F. TU Dunaj za uporabo programskega modula  
SCOP++ doma**

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 2-1: Primerjava merskih sistemov ZLS, glede na glavne tehnične parametre.....	23
Preglednica 2-2. Tipična vrednost frekvence merjenja za GPS in INS [Baltsavias, 1999a]. ..	25
Preglednica 3-1: Prednosti integracije sistema INS in DGPS [Skaloud, 1999].....	26
Preglednica 4-1: Strojna oprema merskega sistema podjetja TopScan. ....	53
Preglednica 4-2: Parametri laserskega skenerja ALTM 2050 in digitalne merske kamere – Emerge DSS [Optech], [Laserscannermessung ..., 2005].....	53
Preglednica 4-3: Parametri planiranja leta, uporabljenega merskega sistema in ostali parametri [Laserscannermessung ..., 2005].....	54
Preglednica 4-4: Transformacijski parametri [Attwenger in Chlaupek, 2006].....	61
Preglednica 5-1: Reprezentativne vrednosti lokalnih parametrov kakovosti na izbranih območjih.....	86
Preglednica 6-1: Koeficient odbojnosti za različne materiale tarče pri valovni dolžini 1 $\mu\text{m}$ [Wagner, 2005]. ....	98
Preglednica 6-2: Različni pojavi (objekti, raba tal) znotraj izbranih lokacij in ocena vrednosti intenzitete.....	102
Preglednica 6-3: Pregled rezultatov normalizacije pasov 22 in 54 ( <i>osnovni</i> ) – za identične točke.....	111

## KAZALO SLIK

### PRIVZETE SLIKE

Slika 2-1: Zajem podatkov v misiji zračnega laserskega skeniranja [ALTM].....	5
Slika 2-3: Princip merjenja razdalje s pulznim in kontinuirnim laserjem [Wehr in Lohr, 1999]. .....	10
Slika 2-4: Princip skeniranja z nihajočim zrcalom [Gajski, 2004].....	14
Slika 2-5: Princip skeniranja z rotirajočo prizmo [Gajski, 2004].....	15
Slika 2-6: Princip skeniranja z optičnimi vlakni [Gajski, 2004]. .....	16
Slika 2-7: Princip skeniranja s palmerjevim skenerjem [Gajski, 2004]. .....	17
Slika 2-8: Koti rotacije okrog vseh treh osi INS koordinatnega sistema [Wikipedija]. .....	20
Slika 2-9: Več odbojev enega laserskega žarka na drevesu [TopoSys]. .....	21
Slika 3-1: Lega merskih komponent ZLS: laserski skener, GPS in IMU [Cramer].....	28
Slika 3-2: Princip veznih ploskev v sosednjih lidarskih pasovih [Kager, 2004].....	35
Slika 3-4: Skica usmerjenosti treh veznih ploskev, ki so enakovredne eni vezni točki [Kager, 2004].....	36
Slika 3-5: Asimetrična utežna funkcija $p$ [Kraus in Pfeifer, 1998]. .....	39
Slika 3-6: Originalne lidarske točke, trend in rezultat linearne predikcije s simetrično utežno funkcijo [Kraus, 2000].....	41
Slika 3-7: Histogram izračunanih vrednosti filtra $r$ in asimetrična utežna funkcija z zamikom $g$ [Pfeifer, 2001 et. al].....	41
Slika 3-8: Uteži izračunane za vsako originalno točko po enačbi (3-7) [Kraus, 2000].....	41
Slika 3-9: Rezultat interpolacije z asimetrično utežno funkcijo [Kraus, 2000].....	42
Slika 3-10: Strategija hierarhične robustne interpolacije – najvišji nivo z izbiro najnižje točke [Mandlbürger, 2005].....	43
Slika 3-11: Primer DMP (levo) in DMR (desno) [TopScan]. .....	45
Slika 3-12: 3D model površine krošenj in barvno kodiran teren pod njo [TopScan].....	45
Slika 3-13: Slika terena dela obale na Nizozemskem leta 2000 (levo) in 2002 (desno) [TopoSys] .....	46
Slika 3-14: 3D pogled na oblak točk v linijskem koridorju [TopoSys].....	46
Slika 17: Simulacija poplavnega območja [TopoSys].....	47

Slika 3-15: Barvno kodirane lidarske točke zajete na urbanen območju [ALTM].....	48
Slika 3-16: DMV Trajanovega šestkotnega pristanišča (Rim), bližnjih cest in železnice [Helica].....	49
Slika 4-1: Lega nacionalnega parka Neusiedler See na karti Avstrije [Attwenger, 2005]. ....	50
Slika 4-2: Prikaz prostora CADSES in regij projekta [SISTEMaPARC2].....	51
Slika 4-3: Merski sistem ALTM 2050 [Optech].....	53
Slika 4-4: Geometrija vzorca laserskega skeniranja z nihajočim zrcalom [Gajski, 2004] .....	55
Slika 4-5: Pregled snemalnih pasov in mej projekta Neusiedler See [Attwenger, 2005]. .....	56
Slika 4-6: Skica s položaji mest oslonilnih meritev (rdeče točke) na območju projekta [Attwenger, 2005]. .....	59
Slika 4-7: Primer terenskih meritev znotraj oslonilne ploskve 10: tahimetrične točke na strehah hiš in položaj streh hiš na terenu [Attwenger, 2005]. .....	59
Slika 4-8: Barvni prikaz izreza avstrijskih podatkov ZLS (levo), madžarskih podatkov ZLS (sredina) in prekrivanja obeh setov podatkov (desno) [Attwenger, 2005]. .....	60
Slika 4-9: Izrez senčnega DMP-ja in barvno kodiranih rDMP-jev - iz originalnih in skrbno georeferenciranih podatkov [Attwenger, 2005]. .....	61
Slika 5-1: Minimalna, maksimalna ukrivljenosti ter ukrivljenosti v poljubni smeri na točki mreže [Kraus, 2005]. .....	73
Slika 5-2: Razlike višin $d_i$ med površjem DMR in originalnimi točkami [Kraus, 2005]. .....	75
Slika 6-1: Primera slik intenzitete za preprosto (levo) in bolj zapleteno območje (desno) [Katzenbeisser, 2002]. .....	90
Slika 6-2: Skica geometrije zajema lidarskih točk [Wagner, 2005]. .....	92

## AVTORSKE SLIKE

Slika 2-2: Diagram osnovnih elementov in procesov pri zračnem laserskem skeniranju. ....	7
Slika 3-3: Skica vektorja linij in pasu iskanja veznih pojavov v lidarskem pasu. ....	35
Slika 4-10: Diagram korakov obdelave skrbno georeferenciranih podatkov do končnih rezultatov DMR in DMP.....	65
Slika 4-11: Primer digitalnih modelov za eno računsko enoto: DMP in DMR. ....	67
Slika 5-3: Primer senčenega prikaza DMP in barvno kodiranih višin DMP istega območja – <i>Naselje</i> .....	78

Slika 5-4: Primer senčenega prikaza DMR in barvno kodiranih višin DMR istega območja – <i>Naselje</i> .....	79
Slika 5-5: Primer v programu GVE barvno kodiranih višin vhodnih podatkov: točke mreže in originalne terenske točke.....	80
Slika 5-6: Primer histograma za parameter najmanjša razdalja.....	81
Slika 5-7: Primer barvno kodiranega modela najmanjših razdalj $s_{mi}$ .....	82
Slika 5-8: Primer histograma za parameter največja glavna ukrivljenost.....	82
Slika 5-9: Primer barvno kodiranega modela največje glavne ukrivljenosti.....	83
Slika 5-10: Primer histograma za parameter RMSE.....	83
Slika 5-11: Primer barvno kodiranega modela natančnosti višin $\sigma_{0,d}$ originalnih točk.....	84
Slika 5-12: Primer histograma za parameter utežni koeficient.....	84
Slika 5-13: Primer slike barvno kodiranega modela kofaktorja višin nagnjenih ravnin.....	85
Slika 5-14: Primer barvno kodiranega modela natančnosti višin DMR $\hat{\sigma}_{DTM}$ .....	85
Slika 5-15: Histogrami vrednosti sigme DMR za posamezno obravnavano območje: <i>Trsje</i> (zgoraj levo), <i>Naselje</i> (zgoraj desno), <i>Vinograd</i> (sredina levo), <i>Polje</i> (sredina desno) in <i>Gozd</i> (spodaj).....	88
Slika 6-3: Senčen prikaz DMP-ja za Lokacijo 1 in Lokacijo 2.....	100
Slika 6-4: Sliki intenzitete za Lokacijo 1 in Lokacijo 2.....	101
Slika 6-5: Primer digitalne slike in slike intenzitete za isto območje.....	101
Slika 6-6: Primer barvno kodiranih vrednosti intenzitete v programu GVE.....	102
Slika 6-7: Barvno kodirane vrednosti intenzitete in DMP na območju rastlinjakov.....	103
Slika 6-8: Primer različnih slik intenzitete iz dveh lidarskih pasov za isto območje.....	103
Slika 6-9: Grafa odvisnosti intenzitete od merjene razdalje.....	105
Slika 6-10: Skica geometričnih razmerji spremenljivk za identično točko v dveh lidarskih pasovih.....	105
Slika 6-11: Diagram poteka empirične analize za normalizacijo intenzitete.....	106
Slika 6-12: Primerjava slik merjene intenzitete na istih območjih iz dveh pasov.....	107
Slika 6-13: Par slik intenzitete za identične točke.....	108
Slika 6-14: Par histogramov z vrednostmi intenzitete za identične točke.....	108
Slika 6-15: Slika razlike intenzitet in histogram razlik.....	109
Slika 6-16: Graf odvisnosti <i>razlike intenzitete</i> od <i>razlike razdalj</i> .....	109

---

Slika 6-17: Primerjava slik normaliziranih intenzitet za identične točke in histogram razlik normaliziranih vrednosti. ....	111
Slika 6-18: Primerjava slik relativno normalizirane intenzitete na istih območjih iz dveh pasov. ....	112
Slika 6-19: Primer slike intenzitete za njene vrednosti od 90 do 106. ....	112

## OKRAJŠAVE IN SLOVAR

okrajšava	angleški termin	slovenski prevod - opis pojma
ALS	Airborne Laser System	ZLS, Zračno Lasersko Skeniranje.
ALTM	Airborne Laser Terrain Mapper	<i>Sistem za zračno lasersko kartiranje, ki ga razvija podjetje Optech, Kanada.</i>
	angular rates	roll zasuk - je kot rotacije objekta (nosilca laserskega skenerja) okoli njegove x-osi.
		pitch nagib - je kot rotacije objekta okrog njegove y-osi.
		heading smer ali kurz - je kot rotacije objekta okrog njegove z-osi
	control patch	oslonilna ploskev
	cycle slip	krajši izpad signala na sprejemni GPS anteni
DGPS	Differential Global Positioning System.	diferencialni GPS - nadgradnja sistema GPS, pri kateri se uporablja mreža baznih referenčnih točk.
DEM	Digital Elevation Model	DMV, Digitalni Model Višin .
DSM	Digital Surface Model	DMP, Digitalni Model Površine - opisuje površino, kot bi jo videli iz točke v zraku – poteka po krošnjah dreves, strehah hiš, itd.
dDSM	Difference-DSM	rDMP, razlika DMP-jev - ploskvi dveh DMP-jev odštejemo med seboj.
DTM	Digital Terain Model	DMR, Digitalni Model Reliefa - je digitalni model, ki prikazuje površino terena.
	drift	zanos - pomeni spremembo zamika linearno s časom.
	fine georeferencing	skrbno georeferenciranje - je postopek posredne določitve elementov zunanje orientacije v izravnavi, v katero so vključene tudi terenske točke.
	first pulse	prvi odboj
	footprint	odtis laserskega žarka na tleh



GPS	Global Positioning System	sistem globalnega določanja položaja.
GCP	Ground Control Point	terenska oslonilna točka.
IMU	Inertial Measurement Unit	inercialna merska enota.
INS	Inertial Navigation System	inercialni navigacijski sistem – z njim oz. natančno rečeno z IMU je zabeležena orientacija nosilca med letom.
I.P.F. Vienna	Institute of Photogrammetry and Remote Sensing Vienna	Inštitut za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje na Dunaju.
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar.	interferometrični umetno odprtinski radar
	laser scanner	laserski skener (LS) - naprava, ki združuje komponenti laser in skener.
	last pulse	zadnji odboj
lidar	LIght Detection And Ranging	Običajna raba kratice za označitev sistema, podatkov in izdelkov tehnologije zračnega laserskega skeniranja.
	loos of lock	izguba signala satelita
	misalignment	Zasuk koordinatnih osi med komponentami sistema ZLS-a.
	multipath	večkratni odboja GPS signala
	multiple echoes	večkratni odboj laserskega žarka - na različnih tarčah.
POS	Positioning and Orientation System.	sistem za določanje položaja in orientacije
	raw georeferencing	grobo georeferenciranje - je postopek neposredne določitve elementov zunanje orientacije s pomočjo DGPS/INS, brez uporabe terenskih točk.
RMSE	Root Mean Square Error	napaka srednjega kvadratnega odklona - mera točnosti

	scan angle	odklon laserskega žarka <i>ali krajše</i> kot skeniranja.
	scanner	naprava za odklon in merjenje odklona laserskih žarkov <i>ali krajše</i> skener.
	shift	prostorski zamik - <i>med komponentami sistema ZLS-a.</i>
SIS	Spatial Information System.	PIS, Prostorski Informacijski Sistem.
	target	tarča - <i>je tisti del pojava na terenu ali del površja samega, na katerega pade laserski žarek in se od njega odbije. Velikost tarče pomeni velikost osvetljene (efektivne) ploskve.</i>
	time-walk	<i>Je fenomen vertikalne (in horizontalne) razširitve pulza na nagnjenem terenu.</i>
WGS84	World Geodetic System 1984	<i>Koordinatni sistem, na katerega se nanašajo GPS meritve.</i>

## 1 UVOD

Zračno lasersko skeniranje (ZLS, angl. ALS) je relativno nova tehnika daljinskega zaznavanja, s katero iz zraka pridobivamo podatke o površju in objektih na njem. Relativno nova je zato, ker njen način merjenja temelji na znani in že uveljavljeni tehnologiji radarskega razdaljemerstva, uporaba laserske svetlobe pa se je uveljavila proti koncu 80-ih. Sprva je bila namenjena topografskemu kartiranju in je v tem pogledu predstavljala alternativno metodo tradicionalni fotogrametriji. Vendar pa se je zaradi hitrega razvoja tehnologij, ki jo podpirajo (t. j. sistemov GPS in INS) oz. so uporabljene znotraj sistema (svetlobni detektorji, medij za shranjevanje podatkov), in zaradi prednosti glede na fizikalne lastnosti laserske svetlobe, uporaba ZLS razmahnila še na druga področja. V svetu je danes na razpolago lepo število različnih merskih sistemov in na ducate podjetij, ki izvajajo zajem ter obdelavo podatkov, medtem ko v Sloveniji metodo šele preizkušamo. S prvimi projekti spoznavamo prednosti ZLS pred fotogrametrijo, ki so v večji gostoti zajetih točk, boljši višinski natančnosti, v zmožnosti prodora vegetacije 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. Z željo podrobneje spoznati to atraktivno tehnologijo, raziskati njene lastnosti, pridobljene podatke in preučiti končne izdelke, sem jo izbrala za glavno temo diplomskega dela. Dejansko razsežnost tehnologije in stanje njenega trenutnega razvoja sem imela priliko poglobljeno spoznati na Inštitutu za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje na Tehnični Univerzi Dunaj (I.P.F.), v času polletne študentske izmenjave v okviru programa Erasmus. Omenjeni inštitut je med vodilnimi v Evropi in svetu v raziskavah na tem področju.

S skeniranjem površja iz zraka z lasersko svetlobo pridobimo polarne koordinate točk, na katerih se je žarek odbil, iz razdalje, ki jo meri laserski razdaljemer posredno preko časa potovanja žarka ter odklona laserskega žarka v smeri prečno na let letala ali helikopterja (nosilec sistema). Laserski žarek se lahko na svoji poti odbije od različnih površin (kot so listje in veje drevesne krošnje, zgradbe, avtomobili itd.) ter od tal. Kinematična metoda diferencialnega GPS-ja poda položaj v zraku premikajočega se nosilca, sistem INS pa

orientacijo laserskega skenerja (LS) v času meritev odbojev. 3D koordinate registriranih točk nato izračunamo v procesu naknadne obdelave podatkov z združitvijo meritev LS in integriranega sistema DGPS in INS. S slednjim dejansko pridobimo elemente zunanje orientacije LS neposredno, brez uporabe terenskih oslonilnih točk. Za večjo natančnost določitve 3D položaja so lahko elementi zunanje orientacije določeni posredno v izravnavi. Postopek izravnave, kot ga izvajajo na I.P.F. Dunaj, je izpeljan iz fotogrametrične izravnave neodvisnih modelov, s tem da so med neznanke dodatno vključeni parametri orientacije in kalibracije sistema ZLS. Georeferencirane 3D koordinate lidarskih točk sedaj služijo za modeliranje površine DMP-ja (angl. DSM), v katerega so vključene vse točke. Če oblak točk klasificiramo v ne-terenske in terenske točke, pa lahko iz slednjih interpoliramo digitalni model površja oz. reliefa (DMR, angl. DTM). Ta dva digitalna modela sta najbolj pogosta izdelka tehnologije ZLS.

Na inštitutu I.P.F. Dunaj sem spremljala in bila deloma vključena v mednarodni projekt (na območju nacionalnega parka Neusiedler See - Seewinkel, kot del projekta SISTEMaPARC v programu Interreg IIIB), kjer sem sodelovala pri postopku od obdelave podatkov pridobljenih v misiji ZLS do izračuna končnih rezultatov. Glavni namen laserskega skeniranja omenjenega nacionalnega parka je bil modeliranje visoko ločljivega in natančnega digitalnega modela terena za potrebe hidroloških analiz. DMR je bil izdelan v programu SCOP++ s hierarhično robustno interpolacijo. Postopek kot tudi program so razvili na I.P.F. Prednost pristopa je v visoki stopnji avtomatizacije izračuna (filtracije in interpolacije) natančnega DMR-ja.

Moje delo pri analiziranju podatkov in izdelkov projekta Neusiedler See je obsegalo dve ločeni raziskavi: preverjanje kakovosti izračunanega DMR-ja in preučevanje meritev intenzitete.

Ker se lidarski DMR uporablja vse pogosteje in se njegova uporaba širi na številna področja, je poznavanje njegove kakovosti odločilnega pomena. Pri preučevanju različnih vplivov na kakovost je poleg merskega sistema potrebno upoštevati tudi postopek obdelave lidarskih podatkov za izračun DMR-ja. Le-ta ima največkrat večji vpliv, vendar pa je zaradi zapletenih funkcij, ki so uporabljene pri interpolaciji površja, ta vpliv težje razčleniti in določiti. Kot so se v preteklosti pospešeno razvijali različni algoritmi za izračun DMR-ja, se sedaj izvajajo

različne raziskave za avtomatsko preverjanje njegove kakovosti. Na I.P.F. so razvili teorijo za izračun (lokalnih) parametrov kakovosti DMR-ja za vsako točko mreže in jo zapisali v program *sigmaDTM.exe*, ki sem ga preizkusila na DMR-ju območja Neusiedler See. Drugi cilj uporabe programa *sigmaDTM.exe* je bil prikazati doseženo kakovost DMR-ja v projektu Neusiedler See z vizualizacijo lokalnih parametrov v modularnem programu SCOP++.

Intenziteta odbitega laserskega žarka se beleži hkrati z registracijo polarnih koordinat v LS in nosi informacijo o tipu materiala objekta oz. terena, od katerega se je žarek odbil. Glede na to, da sam 3D lidarski oblak točk nima nikakršne informacije o objektih, na katerih točke dejansko ležijo, predstavljajo meritve intenzitete pomemben podatek za identifikacijo objektov oz. pojavov na terenu. To potrjuje slika barvno kodiranih vrednosti intenzitete, na kateri lahko razločimo posamezne pojave (asfaltna cesta, trava, zgradba itd.). Z analizo meritev intenzitete na primeru projekta Neusiedler See sem želela ugotoviti, katere pojave lahko razločimo med seboj glede na vrednosti intenzitete in kako bi lahko meritve intenzitete uporabili v postopku klasifikacije skeniranih objektov in pojavov na terenu.

Ker je uporaba tehnologije ZLS pri nas še bolj na začetku in je slovenske strokovne literature na to temo malo, sem želela čim celoviteje zajeti in hkrati čim nazorneje predstaviti njeno delovanje in izvedbo različnih postopkov do končne uporabe izdelkov. Vsebinsko je diplomska naloga razdeljena na tri glavne dele. V prvem delu je opisana teorija tehnologije ZLS, in sicer so v poglavju 2 po uvodni predstavitvi tehnologije ZLS predstavljene glavne meritve, ki jih pridobimo v zračni misiji, in najpomembnejši parametri merskega sistema ZLS. V poglavju 3 so obravnavani postopki obdelave zajetih meritev do končnih izdelkov in nenazadnje njihova uporaba v številnih panogah. Drugi del podaja informacije o projektu Neusiedler See. V poglavju 4 je časovno opisan potek vseh izvedenih nalog za izdelavo DMR-ja, ki se nanašajo na teorijo iz prvega dela. Tretji del vsebuje ločeni analizi kakovosti DMR-ja in meritev intenzitete, kar opisujem v poglavju 5 in 6.

## 2 OSNOVE TEHNOLOGIJE ZRAČNEGA LASERSKEGA SKENIRANJA

### 2.1 Uvod v metodo zračnega laserskega skeniranja

Čeprav se tehnika laserskega merjenja razdalj (laser nameščen v letalo) že od leta 1960 uporablja v vojski (za vojno obveščevalno službo) in gradbeništvu, je šele na koncu 80-ih let dobila prvo veljavo v komercialnem zračnem laserskem skeniraju terena, torej za kartiranje topografije. Začetki ZLS tehnologije v tistem času so bili povezani z izboljšanjem konstrukcije senzorjev (njihovih sposobnosti za zaznavanje svetlobe) ter tudi z lažjo dostopnostjo senzorjev. Prav tako je uporabo ZLS pospešil razvoj kinematične metode za določane položaja sistema z **diferencialnim GPS**-jem ter razvoj **sistema INS** za določanje orientacije, ki skupaj omogočata natančno povezovanje lidarskih podatkov z referenčnim koordinatnim sistemom. Nenazadnje je pomembno vlogo odigralo tudi povečanje procesorske moči računalnikov, ki je potrebna za obdelavo pridobljene velike količine podatkov.

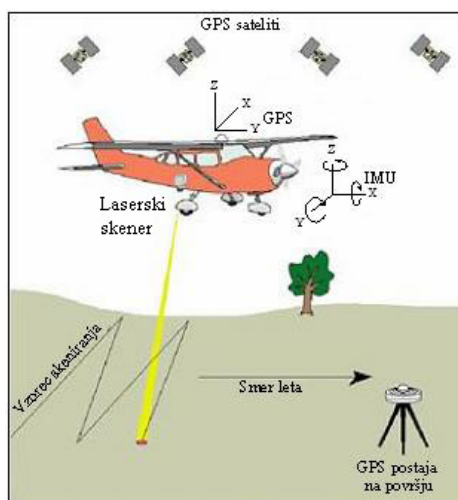
V strokovni terminologiji se za to **metodo merjenja** uporablja več izrazov. Ker tehnologija ZLS (optično-mehanični skener) pravzaprav izhaja iz že uveljavljenih metod daljinskega zaznavanja (npr. vesoljski skener Skylab, Landsat MSS, Thematic Mapper) med izrazi največkrat zasledimo termin kartiranje LIDAR<sup>1</sup> (angl. LIDAR mapping) in zračno lasersko kartiranje (angl. Airborne Laser Mapping). V Evropi se namesto termina LIDAR pogosteje uporablja izraz **zračno lasersko skeniranje**, ZLS (angl. Airborne Laser Scanning, ALS), ki ga tudi uporabljam v diplomski nalogi [Kraus in Pfeifer,2001]. Podobno se **za merski sistem**, s katerimi izvajamo meritve, glede na različne stroke uporabljajo izrazi kot so zračni laserski skener (angl. airborne laser scanner), laserski višinomer (angl. laser altimeter), lidar ali laserski radar (angl. laser radar). V tej diplomski nalogi je zaradi krajšega zapisa uporabljen izraz **lidar**.

---

<sup>1</sup> Light Detection And Ranging

## 2.2 Osnove metode ZLS

Zračno lasersko skeniranje (ZLS) je relativno nova, vendar hitro razvijajoča se metoda daljinskega zaznavanja, s katero pridobivamo 3D informacije o objektih na zemeljskem površju in o površju samem, ne da bi bila v stiku z njimi oz. s površjem. Za zajem površja in objektov na njem se uporablja aktivni senzor t.j. laserski skener (LS), ki je vgrajen v dno nosilca t.j. helikopterja ali letala (Slika 2-1).



Slika 2-1: Zajem podatkov v misiji zračnega laserskega skeniranja [ALTM].

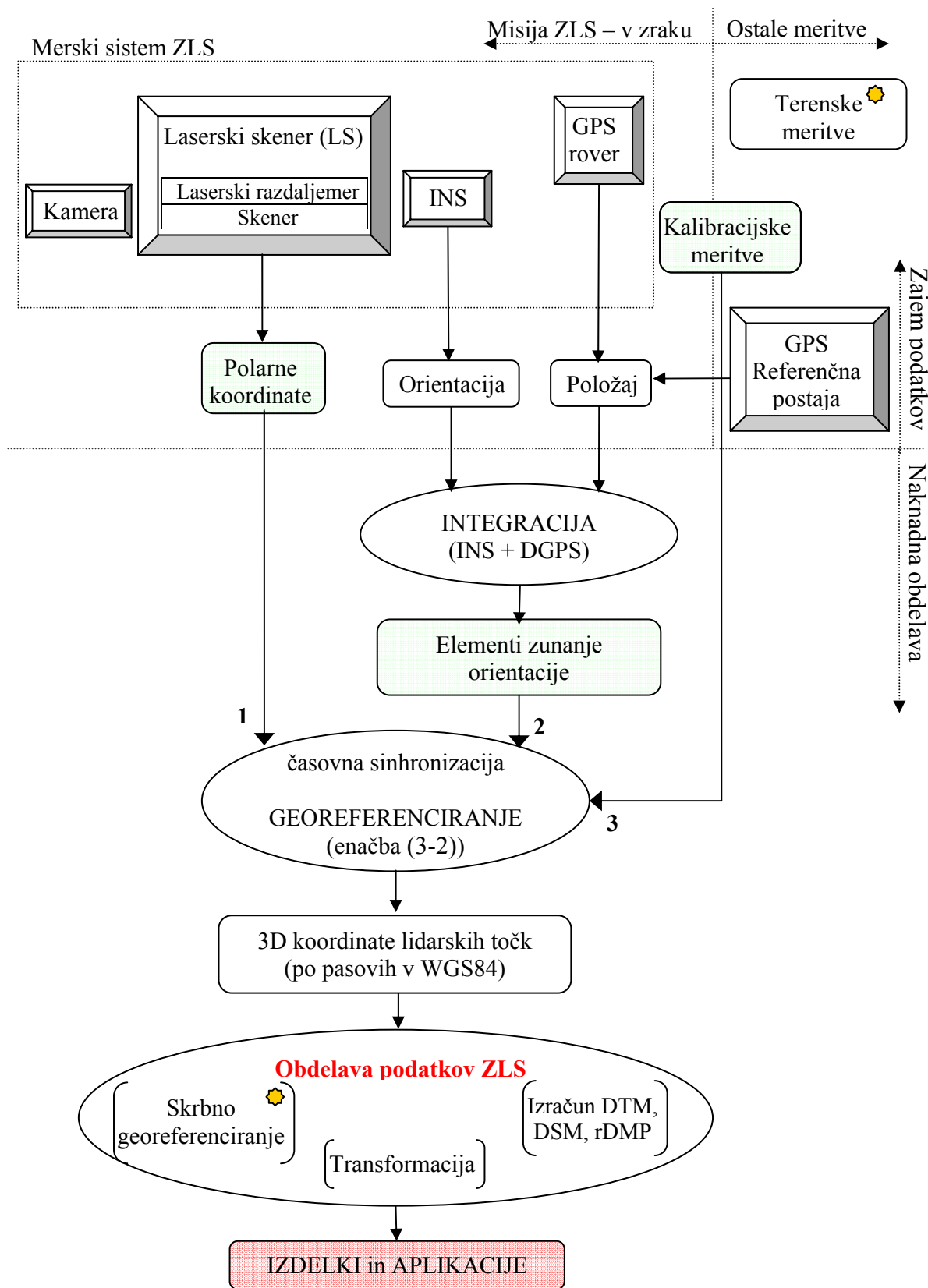
Laserski razdaljemer oddaja lasersko svetlobo proti napravi za odklon žarkov (angl. scanner), od katere se odbije in usmeri proti tlom pod nosilcem. Glede na tip skenerja se na tleh zariše značilen vzorec skeniranja prečno na smer leta. Ko se valovanje na tleh (največkrat) difuzno odbije in en del vrne 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-ja, orientacija pa z INS meritvami 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

istega časovnega trenutka oddaje pulza 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 3D lidarskih podatkov se pri izračunu koordinat upoštevajo še **kalibracijski podatki** merskega sistema ZLS. V postopku georeferenciranja se za vsak odboj laserskega žarka izračunajo tridimenzionalne koordinate ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) v referenčnem koordinatnem sistemu, ki jih nato uporabimo za **izdelavo končnih rezultatov** ZLS-ja t.j. 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 3D koordinat, DMR, itd.) izrednega pomena razvoj zmogljivih ter učinkovitih programov (angl. software). Danes je na voljo že mnogo programskih paketov (TerraSolid package, 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 področji uporabe ZLS.





Slika 2-2: Diagram osnovnih elementov in procesov pri zračnem laserskem skeniranju.

## 2.3 Zajem podatkov z merskim sistemom ZLS

Glavne komponente merskega sistema ZLS, s katerimi pridobimo želene 3D podatke zajetega območja in sem jih omenila že v opisu osnov metode ZLS (poglavju 2.2) so **kompaktni laserski razdaljemer (LIDAR)**, **naprava za odklon laserskih žarkov ali skener**, ki sta združena v enoto laserski skener (LS), **inercialni navigacijski sistem INS** z visoko natančnostjo in **sistem globalnega določanja položaja GPS**. Delujejo ločeno v treh izpolnjenih in samostojnih enotah.

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 senzorji po izbiri (digitalni CCD fotoaparati, fotogrametrični zračni fotoaparati, itd), računalnik, operacijski sistem in programi za kontroliranje zajema podatkov med letom, medij za shranjevanje laserskih meritev, podatkov skenerja, GPS-a, INS-a in alternativnih slikovnih podatkov, programi za planiranje leta in za post-procesiranje 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 (LS);
- 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 več odbojev). Poleg 3D položaja lidarskih točk se za vsak odboj registriran na detektorju zabeleži tudi svetlobna **intenziteta** odbitega laserskega žarka.

V poglavjih 2.4, 2.5 in 2.6 so podrobneje opisane glavne komponente sistema ZLS in »pripadajoče« meritve. Sposobnost laserskega skenerja, da zazna več odbojev enega

oddanega pulza, je opisana v poglavju 2.7. Pojem intenzitete, njeno merjenje in uporaba za identifikacijo pojavov na površju pa je predmet mojega raziskovanja, ki je opisano v poglavju 6. V zadnjem desetletju, ko je metoda ZLS doživela svoj razmah, se je oblikovalo veliko različnih merskih sistemov. Najpomembnejše parametre merskih sistemov, ki se jih upošteva glede na namen izvedbe misije ZLS, in razlike med njimi sem opisala v poglavju 2.8.

## 2.4 Laserski razdaljemer in 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**.

### 2.4.1 Laserski žarek

*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 (CW-laser),
- pravilna porazdelitev moči (intenzitete) po preseku žarka,
- visoka usmerjenost zaradi majhne divergence<sup>1</sup>,
- koherentnost v prostoru in času in

<sup>1</sup> Odvisna od tipa laserja: plinski, polprevodni laser ali laser v trdnem stanju.

- značilna valovna dolžina in dobro definirana frekvenca (monokromatično sevanje).

## 2.4.2 Merjenje razdalje

Razdalja (angl. range) je z laserskim razdaljemerom določena posredno in sicer obstajata dva glavna principa, ki tako določata tudi dva tipa laserskih skenerjev. Merjenje amplitude oddanega ( $A_T$ ) in sprejetega signala ( $A_R$ ) je za oba načina LS prikazano na sliki (Slika 2-3).

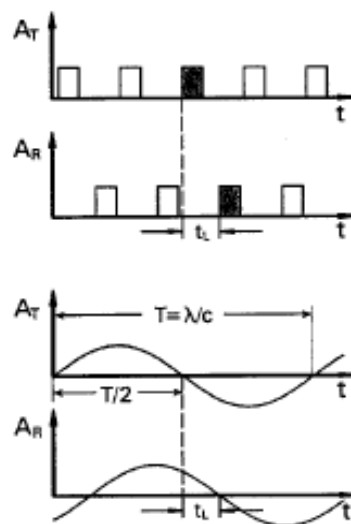
**A. Pulzni laser:** Z merjenjem časa  $t$ , ki preteče od oddaje signala do sprejema na zemeljskem površju odbitega (istega) signala (Slika 2-3, zgornja dva grafa). Senzorski sistem pulzno oddaja laserske žarke proti zemeljskem površju in ga zato imenujemo **pulzni laser**.

Glede na poznano hitrost svetlobe skozi zrak, se določi razdaljo od sensorja do zemeljskega površja in nazaj t.j. dvojno razdaljo laser - površje. Je najpogostejše uporabljen sistem. Večinoma uporablja laser v trdnem stanju (angl. solid-state laser), ki proizvaja valovanje z veliko močjo. Običajno je tip laserja Nd:YAG, ki ima dolžino pulza 10 – 15 ns, valovno dolžino 1.06  $\mu\text{m}$ , največjo moč okoli nekaj MW.

**B. Kontinuirni laser:** Z določitvijo faznih razlik  $\phi$  med oddanim in sprejetim signalom, ki se registrira v sistemu po odboju na površju (Slika 2-3, spodnja dva grafa). V tem primeru laserski sistem oddaja signal neprekinjeno, zato se imenuje **kontinuirni laser** (angl. Continuous Wave-laser, CW).

Amplituda neprekinjenega signala je sinusno modulirana, tako da lahko na sinusoidi določimo čas začetka in konca meritev. V komercialne namene ZLS-ja se uporablja le en CW-laser.

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), ki je:



Slika 2-3: Princip merjenja razdalje s pulznim in kontinuirnim laserjem [Wehr in Lohr, 1999].

$$\text{Pulzni laser: } t = \frac{2R}{v_g} \quad (2-1)$$

Kjer so:

$R$  ... razdalja senzor-tarča;

$v_g$  ... skupinska hitrost;

$t$  ... časovni interval med oddajo in sprejemom signala.

$$\text{Kontinuirni laser: } t = \frac{\phi}{2\pi} T + nT \quad (2-2)$$

$$t = \frac{\phi}{2\pi * \nu} \quad (2-3)$$

Kjer so:

$T$  ... znana perioda valovanja in je  $T = 1/\nu$ ;

$\nu$  ... frekvenca valovanja;

$\phi$  ... fazna razlika med oddanim in sprejetim signalom;

$n$  ... število celih valov, ki se zvrstijo na razdalji senzor-tarča-senzor; v nadaljevanju (enačbi (2-3) je ta člen izpuščen.

**Razdalja  $R$**  (angl. range) od sensorja do tarče, ki se običajno nanaša na oddaljenost je tako:

$$\text{Pulzni laser: } R = \frac{v_g * t}{2} \quad (2-4)$$

$$\text{Kontinuirni laser: } R = \frac{v_g * \phi}{4\pi * \nu} \quad (2-5)$$

Skupinska hitrost  $v_g$  je hitrost, s katero potuje skupina valov pri potujočem valovanju z disperzijo in jo pogosto jemljemo kot merilo za hitrost širjenja energije ali informacije pri valovanju. Splošno je hitrost svetlobe odvisna od gostote atmosfere, kar pomeni, da se spreminja s pritiskom, vlažnostjo in temperaturo. Glede na to, da se letalsko lasersko skeniranje običajno izvaja v stabilnih vremenskih pogojih, lahko zanemarimo vlažnost. Kljub temu pa moramo upoštevati pritisk, še posebno, če letimo na različnih višinah. Razlike se pojavljajo tudi, če snemamo na enaki višini, vendar na dveh različnih območjih (eno ob obali, drugo pa v visokogorju<sup>1</sup>). Za infrardeče valovanje je  $v_g$  okoli  $299710484 \text{ ms}^{-1}$ , kar velja za atmosferske pogoje: temperatura  $12^\circ\text{C}$ , pritisk  $100 \text{ mbar}$  in vlažnost  $60\%$ .

<sup>1</sup> Če poenostavimo enačimo hitrost svetlobe v visokogorju s hitrostjo ob obali, bo razdalja za  $0,12 \text{ m}$  krajša od dejanske.

### 2.4.3 Natančnost merjene razdalje

Napaka merjene razdalje (angl. range accuracy) je po enačbi (2-4) neposredno povezana z negotovostjo določitve **skupinske hitrosti**  $v_g$  [Wagner, 2005]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta v_g}{v_g} \quad (2-6)$$

Kjer leva stran predstavlja relativno napako razdalje  $R$  in desna stran relativno napako skupinske hitrosti  $v_g$ . Kljub majhnim spremembam hitrosti (npr. razlika  $v_g$  v primerjavi s hitrostjo v vakuumu  $c$  je le 0.0274 %) je pomembno uporabiti točno vrednost za  $v_g$ .

Natančnost razdalje je odvisna tudi od natančnosti določitve **časovnega intervala** med oddajo in sprejemom signala  $\Delta t$  [Wagner, 2005]:

$$\Delta R = \frac{v_g}{2} \Delta t \quad (2-7)$$

### 2.4.4 Ločljivost merjene razdalje

Ločljivost merjene razdalje  $\Delta \rho$  (angl. range resolution) pomeni najmanjšo razdaljo (najkrajši čas) med dvema tarčama (signaloma), da ju senzor še lahko zazna ločeno. Ločljivost razdalje je linearno sorazmerna z ločljivostjo merjenja časa [Wagner, 2005], [Wehr in Lohr, 1999]. Če naj se dva signala ne prekrivata med sabo in lahko ločimo dve tarči, mora biti časovna razlika  $\Delta t$  med pulznima signaloma najmanj dolžina njunega trajanja  $\Delta \tau$ , torej  $\Delta \tau < \Delta t$  oziroma je  $\Delta t$  dovolj velika, da sprejemnik še lahko izmeri najmanjšo (možno) razliko faz  $\Delta \phi_{\min}$ .

Pulzni laser: 
$$\Delta \rho = \frac{v_g * \Delta \tau}{2} \quad (2-8)$$

Kontinuirni laser: 
$$\Delta \rho = \frac{v_g * \Delta \phi_{\min}}{4\pi * \nu} \quad (2-9)$$

Časovna dolžina  $\Delta \tau$  oddanega pulza je torej ključna količina, ki določa zmožnost pulznega laserja za ločevanje sosednjih tarč. Za pulz z dolžino 10 ns, je ločljivost razdalje 1.5 m.

Pri kontinuirnem laserju velja, da je pri dani zmožnosti sistema za ločljivosti faznih razlik  $\Delta \phi_{\min}$ , ločljivost razdalje večja z večjo frekvenco laserja.

## 2.4.5 Največja izmerjena razdalja

Pri pulznih laserjih je največja razdalja, ki jo ta lahko izmeri, odvisna od:

1. Največjega možnega števila meritev časovnih intervalov.
2. Števila oddanih pulzov v časovni enoti, če sistem ne pošlje novega pulza pred prejetjem odboja prejšnjega pulza (prepreči prekrivanje oz. mešanje meritev).

V praksi največje izmerjene razdalje in s tem višine leta ne omejujeta zgoraj omenjena faktorja, pač pa drugi faktorji kot so: moč laserja, divergenca laserskega žarka, prepustnost atmosfere, odbojnost tarče, občutljivost merilca, večanje napak določitve položaja nosilca zaradi večje višine leta. Pri frekvenci oddajanja pulzov 25 kHz je največja še zanesljivo izmerjena razdalja 6 km.

Pri kontinuirnih laserjih je največja nedvoumno izmerjena razdalja  $R_{max}$  definirana z:

$$R_{max} = \frac{v_g * \phi_{max}}{4\pi * \nu} = \frac{\lambda}{2} \quad (2-10)$$

Kjer sta:

$\phi_{max}$  ... največja fazna razlika, ki se lahko meri in je enaka  $2\pi = 360^\circ$ ;

$\lambda$  ... dolga valovna dolžina, ki odgovarja frekvenci laserja  $\nu$ .

Da bi CW-laser nedvoumno meril velike razdalje z visoko ločljivostjo mora uporabiti več frekvenc. Najmanjša frekvenca ( $\lambda_{dolga}$ ) definira največjo možno nedvoumno izmerjeno razdaljo  $R_{max}$ , največja frekvenca ( $\lambda_{kratka}$ ) pa natančnost in ločljivost izmerjene razdalje.

## 2.5 Naprava za odklon laserskih žarkov in merjenje odklona

Naprava za odklon laserskih žarkov (angl. skenner) 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. Vzorec skenerja je odvisen še od smeri in hitrosti leta ter topografije terena. V nadaljevanju so opisani štiri tipi elektrooptičnih komponent, ki se najpogosteje uporabljajo pri zračnem laserskem skeniranju. Na kratko sem jih povzela po [Gajski, 2004], [Wehr in Lohr, 1999].

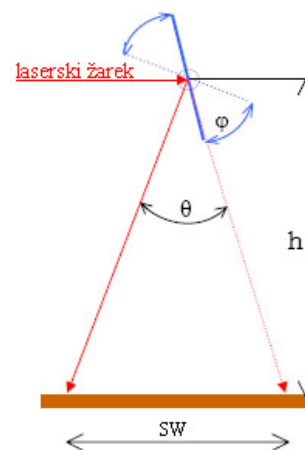
### 2.5.1 Skener z nihajočim zrcalom (angl. oscillating mirror)

Pred (največkrat pulzni) laser postavljeno zrcalo niha v obe smeri okrog rotacijske osi vzporedne s smerjo leta (Slika 2-4) med skrajnima legama, ki oklepata kot  $\varphi$ , enak<sup>1</sup> polovici maksimalnega kota skeniranja  $\theta$ . Žarki se odklanjajo pravokotno na smer leta in na terenu zarišejo cik-cak vzorec skeniranja. Kot skeniranja se registrira oz. interpolira za vsak laserski pulz. Značilnosti takega model skeniranja so:

- ozek laserski žarek;
- visoka natančnost posamezne meritve;
- velike razdalje med posameznimi meritvami;
- ni neposrednega prekrivanja, kar onemogoča nadaljnjo;
- analizo meritev;
- občutljivost na slučajne napake v meritvah.

Zaradi matematičnih zakonitosti nihanja (potrebna je relativno velika masa nihala t.j. zrcala) frekvenca skeniranja ne more biti velika [Gajski, 2004] in hitrost spreminjanje kota zrcala v času enega nihaja ni konstantna (nihanje je sinusno). Posledica je zmanjšanje položajne natančnosti, še posebej na robovih pasu skeniranja, kjer je tudi večja gostota točk. Napako se lahko odpraviti z naknadno obdelavo podatkov.

Prednost skenerja z nihajočim zrcalom pa je fleksibilnost, saj s spreminjanjem frekvence pulzov, frekvence skenerja, kota skeniranja in nenazadnje višine leta, omogoča zajem točk z



Slika 2-4: Princip skeniranja z nihajočim zrcalom [Gajski, 2004]

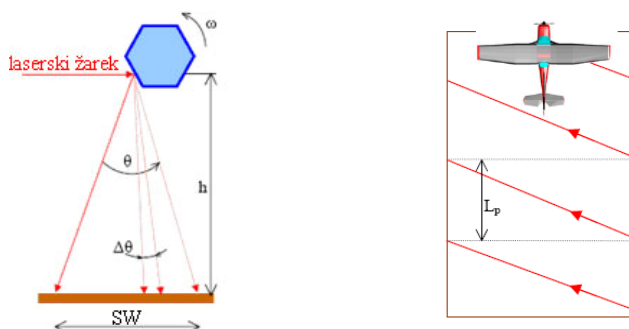
<sup>1</sup> Velja odbojni zakon - odbojni kot je enak vpadnemu.



različno gostoto in razporeditvijo. Skener z nihajočim zrcalom je uporabljen v Optech-ovih ALTM sistemih.

### 2.5.2 Skener z rotirajočo prizmo (angl. rotating polygon)

Skener z rotirajočo prizmo deluje na enak način kot zgoraj opisan skener z nihajočim zrcalom (Slika 2-5, levo), le hitrost vrtenja ( $\omega$ )  $k$ - zrcalnih ploskev je glede na odčitke oz. čas konstantna. Število zrcalnih ploskev ( $k$ ) prizme omogočajo visoko frekvenco skeniranja.

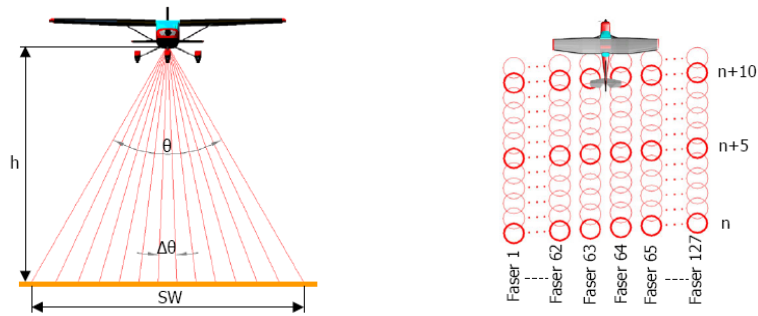


Slika 2-5: Princip skeniranja z rotirajočo prizmo [Gajski, 2004].

Ker se točke na površju zajemajo le v eno smer (Slika 2-5, desno – tvorijo vzorec skeniranja **z-linija**), je vpliv sistematičnih napak težje razpoznaven. Potrebne so kontrolne meritve na terenu. Širina pasu skeniranja SW je odvisna od naklona oz. položaja zrcalne površine prizme glede na smer laserskega žarka v trenutku oddaje laserskega pulza. Pomembno vlogo pri določitvi širine pasu skeniranja SW ima tako sinhronizacija mehanizmov.

### 2.5.3 Skener z optičnimi vlakni (angl. fiber scanner)

Laserski žarek je s pomočjo vrtečih se zrcal usmerjen v krožno razporejena optična vlakna, katerega zaporedna številka določa smer posameznega laserskega žarka. Smeri skeniranja v izhodni linijski vrsti optični vlaken (angl. pushbroom, Slika 2-6, levo) so v vsaki periodi enake in na tleh oblikujejo **vzporedne linije** točk z veliko gostoto v smeri leta nosilca (Slika 2-6, desno). Ker je sistem mehansko nepremičen (sprememba kota skeniranja  $\Delta\theta$  je vedno enaka), je edina možnost spreminjanja gostote laserskih točk sprememba višine leta nosilca. Spreminja se lahko še hitrost leta in frekvenca laserja.



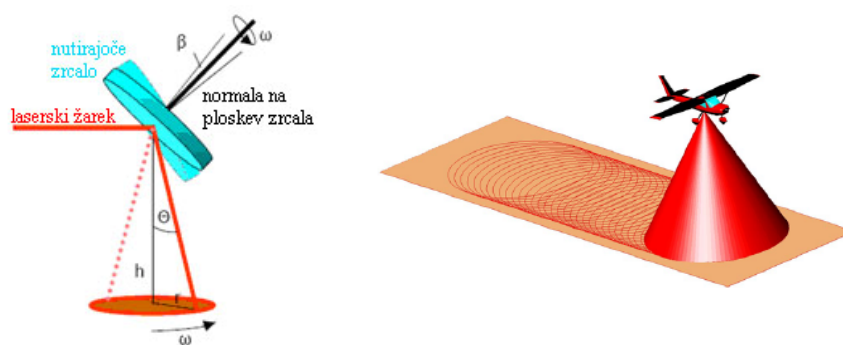
Slika 2-6: Princip skeniranja z optičnimi vlakni [Gajski, 2004].

Prednost geometrične stabilnosti pa je, da sta oddajna in sprejemna optika identični – delujeta sinhrono in zaporedno. Zaradi majhnega premera snopa krožno razvrščenih optičnih vlaken, je lahko tudi premik rotirajoči zrcali majhen, kar omogočata visoko frekvenco skeniranja. Skener z optičnimi vlakni je uporabljen le v TopoSys skenerju<sup>1</sup>.

#### 2.5.4 Palmerjev skener

Pri palmerjevem skenerju je uporabljen princip zrcala, ki nutira okrog svoje nagnjene osi (angl. nutating mirror). Mehanizem za skeniranje je pred laserski razdaljemer postavljen tako, da vpadajoči (oddani in sprejeti) laserski žarek in os skenerja oklepata kot  $45^\circ$ . Zrcalo je znotraj skenerja dodatno nagnjeno za kot  $\beta$ , kar povzroči njegovo nutacijo med rotacijo osi skenerja (Slika 2-7, levo). Tako se laserski žarki odklanjajo od nadira (ne moremo meriti točk pod nosilcem) in tvorijo v eni periodi stožec z vrhom v polu skenerja. Na površju se ustvari poseben približno **eliptičen vzorec skeniranja** (velika polos leži prečno na smer leta in mala polos v smeri leta), ki se prenaša naprej s premikanjem nosilca (Slika 2-7, desno). Zaradi prekrivajočih se elips je večina točk zajetih najmanj dvakrat - enkrat v pogledu naprej in drugič v pogledu nazaj. Nadštevilne informacije se uporabi za kalibracijo skenerja in sistema POS (kar zadeva kot nagiba) ter za povečanje natančnosti položaja točk. Palmerjev skener je uporabljen v merskem sistemu ScaLARS.

<sup>1</sup> TopoSys skener ima kot skeniranja  $\pm 7^\circ = 14^\circ$ , frekvenco skeniranja 630 HZ in 128 optičnih vlaken. Tako je najmanjša sprememba kota  $\Delta\theta_{min}$  1.9 mrad [Katzenbeisser, 1999].



Slika 2-7: Princip skeniranja s palmerjevim skenerjem [Gajski, 2004].

Kot skener z optičnimi vlakni, palmerjev skener zajema površje v več **vzporednih linijah**.

Značilnosti takega načina so:

- širok laserski žarek;
- srednja natančnost posamezne meritve;
- majhne razdalje med posameznimi meritvami;
- velik preklop meritev, kar omogoča natančno analizo le-teh;
- neobčutljivost na slučajne napačne meritve.

## 2.6 Sistem za določanje položaja in orientacije POS

Z meritvami laserskega skenerja pridobimo linijski vektor od reže senzorja do izmerjene točke na površju zemlje (tarče). Za izračun 3D položaja točke pa moramo v trenutku meritve te točke poznati položaj (angl. position) in orientacijo (angl. attitude) laserskega skenerja v izbranem koordinatnem sistemu (npr.: WGS84). S tem namenom sta laserskemu skenerju dodana sistema diferencialni GPS, s katerim je določen položaj laserskega senzorja, in inercialni navigacijski sistem INS, s katerim je določena smer merskega žarka. Za doseg čim boljše natančnosti in zanesljivosti meritev, je nujna njuna integracija v sistem za določanje položaja in orientacije (**POS**). DGPS in INS omogočata **neposredno** določitev **elementov zunanje orientacije (neposredno georeferenciranje)**, kar pomeni, da za orientacijo posameznega lidarskega pasu terenske oslonilne točke (angl GCP) niso več potrebne (obratno kot v primeru blokovne izravnave fotogrametričnih modelov).

### 2.6.1 Določanje položaja s sistemom GPS

Globalni sistem za določanje položaja (GPS) je satelitski navigacijski sistem in se uporablja za določanje natančnega položaja in časa kjerkoli na Zemlji ali v zemeljski tirnici. Pri ZLS se za izračun položaja LS v globalnem koordinatnem sistemu uporablja **kinematična GPS metoda**. GPS antena mobilnega sprejemnika t.i. roverja je pritrjena na letalo ekscentrično glede na LS; parametri ekscentricitete so določeni v postopku kalibracije s standardnimi geodetskimi meritvami. Vsaj en referenčni GPS sprejemnik pa mora biti med letom postavljen na terenu. Njegove koordinate v državnem koordinatnem sistemu so znane in služijo za kasnejšo transformacijo laserskih točk.

Za dosego večje natančnosti meritev se izvajajo **diferencialne GPS meritve**. Pri merjenju DGPS je zaželena uporaba permanentnih referenčnih postaj, ki so vključene v nacionalno GPS mrežo [Burman, 2000] in ležijo znotraj območja snemanja. Koordinate bazne oz. referenčne postaje morajo biti natančno znane. S temi meritvami, ki jih obdelamo naknadno, lahko korigiramo vpliv iono- ter troposfere. Letalo se od referenčne postaje zaradi vpliva atmosfere ne sme oddaljiti za več kot 25 km, pri izjemno stabilnih razmerah, ki sicer nastopajo zelo poredko, pa tudi do 100 km [Triglav, 2004].

Za določitev točnega položaja senzorja moramo zadostiti določenim zahtevam:

- imeti moramo dvofrekvenčni<sup>1</sup> sprejemnik in izvajati moramo kodna in fazna opazovanja;
- geometrijska razporeditev satelitov v času snemanja mora biti čim bolj enakomerna (PDOP2 < 2,5);
- vidnost vsaj 4 satelitov, ne sme biti nobenih motenj satelitskih signalov.

V stabilnih pogojih in ob upoštevanju gornjih zahtev je pričakovana natančnost določitve položaja senzorja 5 cm v vseh smereh. Delo dodatno otežujejo motnje satelitskih signalov, dviganje in spuščanje letala in s tem tudi menjavanje troposferskih pogojev. Za kratka snemanja lahko predpostavimo, da so položajne napake stabilne in jih lahko popravimo s preprostim premikom (v večini primerov le s premikov v višini) [Triglav, 2004]. Drugi viri napak so še izpad signala na sprejemni GPS anteni (anlg. cycle slips), izguba signala satelita

<sup>1</sup> Z njim lahko dosežemo v večini aplikacij zahtevano polmetrska natančnost.

<sup>2</sup> PDOP factor je Precision of Dilution of Position

(angl. loss-of-lock) in večkratni odboj signala (angl. multi-path). Možnost odkrivanja in popravljanja teh napak naraste z integracijo INS podatkov z GPS opazovanji [Burman, 2000].

## 2.6.2 Določanje orientacije s sistemom INS

Inercialni navigacijski sistem (INS) je merski sistem, ki omogoča navigacijo: določa položaj, hitrost, orientacijo in kotno hitrost nosilca laserskega sistema, na katerega je pritrjen, z merjenjem treh med seboj pravokotnih linearnih in treh kotnih pospeškov v inercialnem referenčnem sestavu. Referenčni koordinatni sestav se ne vrti, niti se ne giblje pospešeno in je tako neodvisen od gibanja nosilca (Newtonovi zakoni gibanja) [Grewal et al., 2001, cit po Kocmann, 2003].

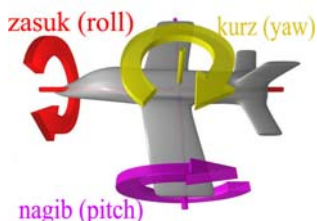
V splošnem se uporabljata dva različna tipa inercialnega navigacijskega sistema: sistem s podlago in pritrjen sistemi<sup>1</sup>. Oba pa obsega **inercialno mersko enoto** (IMU), ki je sestavljena iz treh merilnikov pospeška in treh giroskopov, ter **navigacijski računalnik**, ki računa gravitacijski pospešek ter z obdelavo IMU podatkov integrira celotni pospešek [Kocmann, 2003].

**Merilci pospeška** merijo v treh med seboj pravokotnih smereh spremembo hitrosti objekta, posredno na podlagi spremembe položaja jedra merilnika glede na ohišje na katerega deluje pospešek. Z izračunom drugega integrala merjenega pospeška pridobimo željeno informacijo o **položaju** ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ) [Burman, 2000]. Tri med seboj pravokotno nameščene **vrtavke** (žiroskopi) pa določajo **orientacijo** ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ) v prostoru, s tem da merijo stopnje zasuka in spremembo smeri nosilca LS-a v vseh treh oseh trirazsežnega prostora (Slika 2-8: zasuk okoli x-osi, nagib okoli y-osi in sprememba smeri ali kurza). Koti rotacije so določeni na podlagi relativne rotacije med vrtavkami in ogrodjem.

Ker so meritve pospeškov in kotov rotacije relativne, moramo za končno določitev orientacije nosilca laserskega sistema v času INS meritev poznati začetni položaj, hitrost in orientacijo sistema [Kocmann, 2003].

---

<sup>1</sup> Več v [Burman, 2000] in [Cramer, 1997].



Slika 2-8: Koti rotacije okrog vseh treh osi INS koordinatnega sistema [Wikipedija].

Natančnost določitve orientacije je 0.03 deg za kota zasuk ( $\omega$ ) in nagib ( $\varphi$ ) ter 0.04 deg za smer ( $\kappa$ ) [Burman, 2000, cit. po Colomina, 1999], kar je zadovoljivo za večino aplikacij. Na IMU vplivajo nekatere nemodulirane napake, ki povzročajo zanos (angl. drifts) in so [Burman, 2000]:

- nepravokotnost osi v lokalnem koordinatnem sistemu INS-a;
- napake merila pri vrtavkah ali merilcih pospeška;
- konstantni zanos vrtavke (angl. gyro drift) in še drugi zanos (npr. angl. random walk, white noise).

Z moduliranjem napak (npr. s Kalmanovim filtrom) in s pomočjo referenčnih podatkov (npr. z GPS ali s kalibracijskimi meritvami) se zmanjša vpliv napak in s tem izboljša določitev orientacije.

## 2.7 Registracija večkratnega odboja laserskega pulza

Objekti so osvetljeni z lasersko svetlobo, ki se na njih večinoma **disperzno odbije**, vrne nazaj in zazna v sprejemniku. V nekaj primerih se lahko zgodi, da laserski žarek ne pride nazaj. In sicer, če pade na gladko površino (npr. streha avtomobila) in se od nje **zrcalno odbije**. Če 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. V drugem primeru površin pride do **absorbicije** in je odbiti signal prešibak za registracijo (npr. mirne vodne površine). Absorbicija 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 [Kraus 2003, str. 451].

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 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 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; poglavje 0), 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 5 ali več. Pričakujemo lahko (Slika 2-9), da se laserski žarek najprej odbije od najvišjih objektov (npr. krošnji 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 2-9: Več odbojev enega laserskega žarka na drevesu [TopoSys].

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 predreti vegetacijo in lahko meri višino terena. Količina zajetih podatkov je večja in jih je težje interpretirati. Še zlasti zato, ker je metoda registracije odbojev večkrat nepoznana. Registracija večih odbojev

je pomembna 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.

## 2.8 Parametri merskega sistema ZLS

Od leta 1996 ko je le eno podjetje prodajalo komercialne sisteme ZLS in je bilo le nekaj ponudnikov storitev, se je do danes ponudba različnih merskih sistemov skokovito povečala. Prav tako so se razvile različne metode obdelave zajetih lidarskih podatkov in s tem možnosti uporabe.

**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, itd.. Glede na namen izvedbe ZLS za določeno uporabo podatkov in produktov ZLS-ja, je potrebno upoštevati številne **tehnične parametre**. Nekateri se lahko **spremenjajo** (npr.: poleg hitrosti in višine leta še kot skeniranja, frekvenca pulzov, skeniranja, INS sistema, divergenca žarka, itd.), nekatere pa se lahko **izbere** glede na operativne omejitve, kot so moč laserja, kapaciteta spomina, itd.

Tipične vrednosti parametrov, ki so pomembni pri ZLS-u, so zapisane v prvem stolpcu spodnje preglednice (Preglednica 2-1). V stolpcih od 2 do 4 so podane vrednosti treh (naj)novejših merskih sistemov vodilnih proizvajalcev ZLS-sistemov (Leica Geosystems, TopoSys GmbH in Optech Incorporated). Omeniti je potrebno še podjetje Riegl, ki je leta 2004 med prvimi izdelalo merski sistem LMS-Q560 za zajem in digitalizacijo celotnega valovanja in je podrobno opisan na [Riegl LMS-Q560].



Preglednica 2-1: Primerjava merskih sistemov ZLS, glede na glavne tehnične parametre.

Proizvajalec	Tipične vrednosti za komercialni ZLS sistem	Leica Geosystems	TopoSys GmbH	Optech
Laserski sistem/skener		<b>ALS50</b>	<b>Falcon III</b>	<b>ALTM Gemini</b>
Leto izdelave sistema		2004		2006 (okt.)
POS sistem	/	?	Applanix POS/AV 410	Applanix POS/AV
Teža		100 kg	65 kg?	84 kg
Max razdalja R	500 – 3000 m	500 – 3800 m	30 – 2500 m	150 – 4000 m
Nat. razdalje	0,05 - 0,15 m			
Točnost kotov:	zasuk, nagib smer	0,02 - 0,04 0,03 – 0,05	/	/
Položajna natančnost	0,3 – 1 m	0,13 - 0,61 m	< 0,20 m	0,03 - 0,73 m
Višinska natančnost	0,15 – 0,20 m	0,14 - 0,36 m	< 0,10 m	< 0,05 m < 0,25 m
Valovna dolžina laserja	1,04 ali 1,54 $\mu\text{m}$ (0,8 – 1,56 $\mu\text{m}$ )	blizu IR	1560 nm	1064 nm
Trajanje pulza	5 – 10 ns	?	?	?
Energija pulza	100 $\mu\text{J}$	?	?	?
Frekvenca pulzov*	20 – 80 kHz	83 kHz	50 - 125 kHz	33 – 100 kHz
Razpršenost laserskega žarka	0,25 – 2 mrad	0,33 mrad	0,7 mrad	0,25 mrad
Velikost odtisa	0,2 – 2 m	?	?	0,024 – 1 m
Elektrooptična komponenta	/	Nihajoče zrcalo	Nepremična optična vlakna	Nihajoče zrcalo
Frekvenca skenerja	25 – 40 Hz	?	165 – 415 Hz	sprem. do 70 Hz po izbiri 100 Hz
Kot skeniranja (FOV)	7 – 40° (max. 75°)	10° - 75°	Nesprem. 27°	0 - $\pm 25^\circ$ korak 1°
Vzorec skeniranja	cik-cak, paralelno, eliptično, sinusoidno	cik-cak linija	vzporedne linije	cik-cak linija
Št. Registriranih odbojev/pulz	2 do 4	4	do 9	do 4
Merjenje intenzitete	Da	Da, 8bitov	Da, 12 bitov	Da, 12 bitov

\*Frekvenca pulzov je manjša z večanjem razdalje.

\*\* Frekvenca skenerja je manjša z večanjem velikosti kota skeniranja.

Za **primerjavo** teh novejših sistemov s prvimi obstoječimi sistemi iz 90-tih glej [Baltsavias, 1999a]. Največji napredek je bil narejen pri povečanju **gostote** laserskih točk. In sicer s povečanjem frekvence pulzov iz 1 kHz na 100 kHz ter z možnostjo registracije večih odbojev namesto le enega, kot v primeru prvih sistemov ZLS-a.

Presenetljivo proizvajalci sistemov v s svojih standardnih tehničnih opisih sistemov ZLS-a **izpuščajo** nekatere pomembne parametri (npr.: valovna dolžina, dolžina pulza, itd), zapisane pa so natančnosti (npr. višine, razdalje), za katere se ne ve, kako so jih izračunali. Prav tako so **pomanjkljive** informacije o načinu registracije odboja v analognem detektorju komercialnih LS, čeprav lahko z različnimi metode zaznavanja odboja pridobimo različne vrednosti merjene razdalje (oz. tudi intenzitete).

Izbira **valovne dolžine** je odvisna od konstrukcije celotnega sistema LS. Najpogosteje je določena znotraj spektralnega območja od 1040 do 1060 nm, medtem ko ima nekaj sistemov valovno dolžino okoli 900 ali 1550 nm (TopoSys). Detektorji uporabljeni v LS so najbolj občutljivi na valovanje z  $\lambda$  od 800 nm do 1000 nm. Vendar je za manjše valovne dolžine, npr. 900 nm, ki so jo uporabljali v prvih LS sistemih, v povezavi z zahtevo po večji energiji pulza (omogoča merjenje večjih razdalj) zaskrbljujoča varnost oči. Pri izbiri valovne dolžine pa moramo upoštevati tudi način odboja laserskega žarka na površini objekta, ki ga želimo meriti; npr. LS z valovno dolžino 1535 nm ni primeren za skeniranje ledenikov, saj je odboj na snegu in ledu prešibak [Wehr in Lohr, 1999]. Spreminjanje odbojnosti glede na tip tarče sem skušala ugotoviti z mojo analizo lidarskih meritev t.j. intenzitete (poglavje 6).

Odbojnost tarče pri določeni valovni dolžini vpliva tudi na **največjo merjeno razdaljo R**, torej na največjo višino leta. Zato bi morali pri navedbi največje možne merjene razdalje zapisati, na kateri tip odboja (difuzen ali zrcalen) in tip tarče z določenim procentom odbojnosti se podatek nanaša.

**Minimalna višina leta** in s tem minimalna razdalja  $R$  je pri določeni valovni dolžini laserja določena z zdravstveno-varnostnimi omejitvami in sicer z razdaljo, pri kateri ne tvegamo več poškodb oči (angl. **eye safety**). Predpisane omejitve se spreminjajo med državami in tudi glede na območje skeniranja (urbano, ruralno) [Wehr in Lohr, 1999].

Višinska natančnost pri ALTM Gemini je specificirana za različne višine leta in frekvence laserja (ki jih sistem omogoča). Najmanjšo vrednost ima pri najnižji višini leta in najmanjši frekvenci ter obratno. Natančnost je v veliki meri odvisna od uporabljenega POS-sistema. In sicer v kolikšni meri so izpolnjene zahteve merjenja DGPS (npr. vidnosti 4 satelitov, bližina referenčne postaje, itd.), kako izpopolnjen je postopek integracije DGPS in INS, itd.

Preglednica 2-2. Tipična vrednost frekvence merjenja za GPS in INS [Baltsavias, 1999a].

Frekvenca GPS	1 – 2 Hz
Frekvenca INS	50, 100 Hz

V zadnjih letih je bilo z analiziranjem in primerjanjem rezultatov meritev različnih laserskih skenerjev ugotovljeno, da največji napredek in uspeh ni prineslo toliko izboljšanje merskega sistema, ampak predvsem izboljšanje **algoritmov za obdelavo podatkov** (angl. post-processing software).

### 3 OBDELAVA MERITEV IN IZDELKI ZLS

#### 3.1 Integracija sistema DGPS in INS

Z integracijo DGPS in INS meritev je omogočena natančna in neposredna<sup>1</sup> določitev zunanje orientacije senzorja. Prednosti in slabosti posamezne komponente (INS in DGPS) ter njune skupne prednosti, ko sta integrirana, so predstavljena v preglednici spodaj (Preglednica 3-1) [Kocamann, 2003].

Preglednica 3-1: Prednosti integracije sistema INS in DGPS [Skaloud, 1999].

<b>INS</b>	<b>DGPS</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visoka natančnost določitve položaja gibajočega sistema v kratkih časovnih intervalih.</li> <li>• Natančno merjenje orientacije.</li> <li>• Natančnost s časom pada.</li> <li>• Visoka frekvenca meritev.</li> <li>• Avtonomnost.</li> <li>• Ni izpada, niti izgube (angl. outages) signala.</li> <li>• Vpliv gravitacije.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visoka natančnost določitve položaja gibajočega sistema v dolgih časovnih intervalih.</li> <li>• Merjenje orientacije je moteno, prisoten je šum.</li> <li>• Enotna natančnost, neodvisna od časa.</li> <li>• Nizka frekvenca meritev.</li> <li>• Neavtonomnost.</li> <li>• Izpad signala na anteni (angl. cycle slip) in izguba signala satelita (angl. loss of lock).</li> <li>• Gravitacija ne vpliva na meritve.</li> </ul>		
<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;"><b>DGPS /INS</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Visoka natančnost določitve položaja in njegovega spreminjanja.</li> <li>• Natančna določitev orientacije.</li> <li>• Visoka frekvenca podatkov.</li> <li>• Navigacijski podatki, tudi če GPS signal za kratek čas izpade.</li> <li>• Zaznava in popravek izpada signala.</li> <li>• Določitev vektorja gravitacije.</li> </ul> </td> </tr> </tbody> </table>		<b>DGPS /INS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visoka natančnost določitve položaja in njegovega spreminjanja.</li> <li>• Natančna določitev orientacije.</li> <li>• Visoka frekvenca podatkov.</li> <li>• Navigacijski podatki, tudi če GPS signal za kratek čas izpade.</li> <li>• Zaznava in popravek izpada signala.</li> <li>• Določitev vektorja gravitacije.</li> </ul>
<b>DGPS /INS</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visoka natančnost določitve položaja in njegovega spreminjanja.</li> <li>• Natančna določitev orientacije.</li> <li>• Visoka frekvenca podatkov.</li> <li>• Navigacijski podatki, tudi če GPS signal za kratek čas izpade.</li> <li>• Zaznava in popravek izpada signala.</li> <li>• Določitev vektorja gravitacije.</li> </ul>			

Visoko/dobro stabilne meritve INS-a v kratkih časovnih intervalih zgladijo motnje (izgubo signala satelita) v GPS opazovanjih in z interpolacijo zgostijo velike razdalje med točkami registracije GPS-a. S pomočjo INS meritev položaja in njegovega spreminjanja se zazna še krajši izpad signala in večkratni odboj signala na GPS sprejemniku [Burman, 2000], [Cramer, 1997]. Na drugi strani visoka/dobra stabilnost GPS sistema v dolgih časovni intervalih

<sup>1</sup> Neposredna določitev pomeni, da kontrolne meritve na terenu niso potrebne.

zmanjša vpliva sistematičnih napak in kopičenje časovno odvisnih napak INS-a. Možnih je več načinov povezave GPS in INS podatkov. Najpreprosteje je uporabiti GPS opazovanja za določitev položaja senzorja in INS opazovanja orientacije za izračun nagiba senzorja na osnovi istega referenčnega časa [Burman, 2000]. V tem primeru ni pretoka podatkov med sistemoma z namenom izboljšanja rezultatov. Najpogosteje uporabljena metoda integracije GPS in INS opazovanje je **Kalmanov filter**, ki v realnem času zagotovi optimalno oceno sistema kot tudi napake GPS in INS meritev [Kocamann, 2003].

Končna natančnost meritev sistema POS mora biti enaka ali večja od natančnosti merjene razdalje, ki je boljša od 1 dm [Wehr in Lohr, 1999]. Odvisna je od delovanja posameznega podsistema in od zmožnosti določitve notranjih razmerji med njimi, glede na čas in prostor.

### 3.2 Neposredna orientacija laserskega skenerja

Navigacijski podatki integriranega sistema DGPS/INS, ki so podani v WGS84 koordinatnem sistemu, omogočajo **neposredno orientacijo ali georeferenciranje** laserskih meritev. V tem procesu se polarne koordinate merjenih laserskih točk (razdalja in trenutni kot skeniranja) povežejo z geodetskim referenčnim koordinatnim sistemom, neodvisno od terenskih oslonilnih točk<sup>1</sup>. Parametri zunanje orientacije so v postopku natančne časovne sinhronizacije vseh sistemov (INS, DGPS in LS) določeni neposredno - z interpolacijo POS meritev za vsak trenutek meritev laserja  $t$  (angl. exposure times). Da premagamo časoven zamik med posameznimi senzorji, moramo poznati točen čas vsake meritve (oddaja/sprejetje laserskega pulza) ali pa časovno razliko med njimi.

Rezultati so koordinate  $(X, Y, Z)$  položajnega vektorja vsake izmerjene laserske točke v koordinatnem sistemu  $(m)$ , v katerem je dan položaj referenčne postaje uporabljene za DGPS (angl. geodetic mapping frame) - največkrat WGS84. Koordinate izračunamo po [Kraus, 2004, str. 454]:

---

<sup>1</sup> Obraten koncept se uporablja v fotogrametriji, kjer so parametri zunanje orientacije določeni posredno z uporabo terenskih oslonilnih točk.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ref} = \begin{bmatrix} X_0(t) \\ Y_0(t) \\ Z_0(t) \end{bmatrix}_{ref} + R_{IMU} \begin{bmatrix} 0 \\ s(t) \sin(\pm a(t)) \\ s(t) \cos a(t) \end{bmatrix}_{LS} \quad (3-1)$$

Kjer so:

$t$  ... časovni parameter sinhronizacije;

$X, Y, Z$  ... kartezične koordinate merjene laserske točke v referenčnem koordinatnem sistemu;

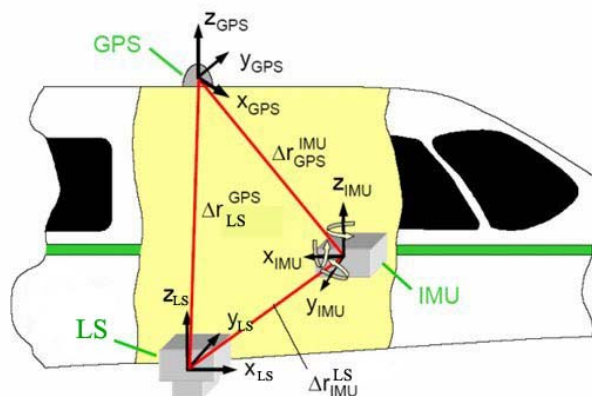
$X_0(t), Y_0(t), Z_0(t)$  ... koordinate GPS/INS centra v referenčnem koordinatnem sistemu;

$R_{IMU} = f(\omega(t), \varphi(t), \kappa(t))$  ... rotacijska matrika za rotacijo IMU-sistema v referenčni koordinatni sistem;

$\alpha(t), s(t)$  ... polarne koordinate merjene laserske točke v koordinatnem sistemu LS.

Ker sta senzorja za določanje položaja (GPS antena) in orientacije (IMU) fizično ločena od LS, moramo v enačbi direktnega orientiranja LS, poleg pravilnega časa za interpolacijo POS meritev, upoštevati še nekatere sistemske parametre (Slika 3-1). Ti opisujejo notranje razmerje med merskimi komponentami ZLS in so [Kocamann, 2003]:

- koti namestitve ohišja LS glede na lokalni koordinatni sistem nosilca, ki ima ponavadi izhodišče v enoti IMU – **parametri kalibracije** ( $\delta\omega, \delta\varphi, \delta\kappa$ );
- položaj laserskega skenerja glede na IMU in položaj IMU glede na GPS – **parametri namestitve sistema** ( $dx, dy, dz$ ).



Slika 3-1: Lega merskih komponent ZLS: laserski skener, GPS in IMU [Cramer].

Te t.i. kalibracijske parametre pridobimo s **kalibracijo sistema**, ki je nujno potrebna, saj lahko majhne napake povzročijo velika odstopanja in nenatančnost pri določitvi objektivnih točk. Postopki kalibracije se med podjetji, ki izvajajo lasersko skeniranje, razlikujejo. Običajno so parametri montiranja merjeni s standardnimi merskimi tehnikami in je tako dan

konstantni vektor zamika (angl. displacement). Kalibracijske parametre, ki opišejo zasuk med smermi koordinatnih sistemov LS in IMU (angl. misorientation, misalignment), pa pridobimo s preletom referenčnega horizontalnega površja, kot je npr. večja ravna površina – športno igrišče, stavbe, vogali stavb, v različnih smereh (angl. in-flight alignment). Kalibracijo izvedemo pred ali med lasersko izmero, saj se po izkušnjah A. Wehr-a in U. Lohr -a kalibracijski parametri med izmero ne spreminjajo (1999). Za zmanjšanje sistemskih napak je poleg kalibracije pomembno še **oblikovanje senzorskega sistema**. Ker je georeferenciranje občutljivejše na napake v orientaciji, je optimalen položaj IMU blizu LS. Za zmanjšanje vpliva zamika med sistemi pa naj bi bila GPS antena nameščena čim bližje ostalih senzorjev [Burman, 2000].

Končno zapišemo **enačbo za izračun 3D koordinat** laserskih točk v referenčnem koordinatnem sistemu  $(X, Y, Z)$ , v kateri so uporabljeni neposredno določeni parametri zunanje orientacije  $(X_o(t), Y_o(t), Z_o(t), \omega(t), \varphi(t), \kappa(t))$  in upoštevani parametri kalibracije [Cramer, 1997]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ref} = \begin{bmatrix} X_0(t) \\ Y_0(t) \\ Z_0(t) \end{bmatrix}_{ref} + R_{IMU} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix}_{IMU} + R_{IMU} * dR_{LS}^{IMU} \begin{bmatrix} 0 \\ s(t) \sin(\pm a(t)) \\ s(t) \cos a(t) \end{bmatrix}_{LS} \quad (3-2)$$

Kjer so (glej tudi opis pri enačbi (3-1):

$dx, dy, dz = dr \dots$  vektor zamika med LS in GPS anteno ter LS in IMU v IMU koordinatnem sistemu;

$dR_{LS}^{IMU} = f(\delta\omega, \delta\varphi, \delta\kappa) \dots$  rotacijska matrika zasukov  $(\delta\omega, \delta\varphi, \delta\kappa)$  med smermi koordinatnih sistemov LS in IMU.

Neposredno georeferenciranje omogoča učinkovitejšo obdelavo podatkov, saj ima vsak laserski pulz svoj niz parametrov zunanje orientacije.

### 3.3 Natančnost 3D koordinat laserskih točk

Glavni faktorji, ki vplivajo na natančnost določitve 3D koordinat so [Baltsavias, 1999b]:

1. **Natančnost merjene razdalje (angl. range accuracy).** Je najbolj zapletena glede na ostale glavne faktorje natančnosti in bom opisala le vplive, pomembne za pulzni razdaljemer. Natančnost razdalje je 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 šumov, moči odbitega signala, občutljivosti detektorja in frekvence ter dolžine pulzov. Odvisna je tudi od natančnosti, s katero so poznani časovni zamiki v sistemu in natančnosti števec časovnih intervalov, preteklih med oddajo in sprejemom pulza. Ob upoštevanju teh glavnih vplivov in še nekaj manj pomembnih, ki so opisani v, je natančnost merjenja razdalje neodvisna od dejanske razdalje senzor-tarča. Vpliv napak merjene razdalje na 3D koordinate je najmanjši med ostalimi glavnimi faktorji. Se pa povečuje z nižanjem višine leta in manjšanjem kota skeniranja.
2. **Natančnost določitve položaja laserskega žarka (angl. position accuracy).** Nanjo najbolj vplivata način in kakovost naknadne obdelave diferencialnega GPS-a. Drugi faktorji so še GPS strojna oprema, konstelacija GPS satelitov v času merjenja, razporeditev, oddaljenost in število uporabljenih referenčnih postaj, natančnost določitve zamika in zasuka med GPS, IMU in LS ter natančnost merjenega odklona laserskega žarka (natančnost skenerja). V splošnem lahko z DGPS in z naknadno obdelavo dosežemo natančnost 5-15 cm.
3. **Natančnost določitve smeri laserskega žarka (angl. attitude accuracy).** Odvisna je od kakovosti INS-a, frekvence meritev INS-a, metode naknadne obdelave in integracije z GPS podatki. Natančnost smeri (angl. heading accuracy) je odvisna od geografske širine.
4. **Natančnost transformacije** iz WGS84 v lokalni koordinatni sistem. Vključuje popravke geoidne ondulacije, ki imajo lahko velik vpliv glede na potencialno natančnost ZLS.
5. **Časovni zamik.** Za pravilno določitev 3D-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.

Napako določitve koordinat sestavljata **variabilni del**, ki se nanaša na geometrijo objekta in odbojnost in tako spreminja z višino leta, kota skeniranja, topografijo in pokritostjo terena ter **konstantni del**, ki je neodvisen od zgornjih spremenljivk in ga določajo npr.: natančnost



registriranja pulza, natančnost GPS-a, itd. Optimalna vrednost konstantnega dela napake je 5 do 10 cm.

Različni viri napak različno vplivajo na rezultate meritev in nadalje na izračunane 3D koordinate. Rečemo pa lahko, da je končna napaka koordinat laserskih točk ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ) odvisna od natančnosti posamezne komponente sistema ZLS. Če predpostavimo, da snemamo **raven teren** v vertikalni ravnini pravokotno na smer letenja (horizontalni let, ko sta  $\omega = \varphi = 0$ ; izvzet je eliptičen Palmerjev skener), lahko za variabilni del napak 3D koordinat zapišemo enačbe vpliva napak orientacije ( $\Delta\omega$ ,  $\Delta\varphi$ ,  $\Delta\kappa$ ) določene z INS, napak položaja laserskega žarka ( $\Delta X_o$ ,  $\Delta Y_o$ ,  $\Delta Z_o$ ) določenega z DGPS in napak LS pri določitvi razdalje ( $\Delta R$ ) ter kota skeniranja ( $\Delta\beta$ ). Spreminjajo se vrednosti višine leta ( $h$ ), kota skeniranja ( $\beta$ ) in rotacijski kot  $\kappa$  (rotacija okrog vertikalne osi) [Baltsavias, 1999b].

Celotna napaka koordinat ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ) je nato dana kot kvadratni koren vsote kvadratov napak posameznih vplivov. Če korelacije med napakami zanemarimo lahko zapišemo enačbi za višinsko in položajno natančnost.

$$\text{Višinska natančnost: } \Delta Z = \sqrt{\Delta Z_{\Delta\omega} + \Delta Z_{\Delta\varphi} + \Delta Z_{\Delta\beta} + \Delta Z_{\Delta R} + \Delta Z_{\Delta Z_o}} \quad (3-3)$$

Pod predpostavko ravnega terena je višinska natančnost  $\Delta Z$  neodvisna od  $\Delta\kappa$ ,  $\Delta X_o$  in  $\Delta Y_o$ . Prav tako ni neposredno odvisna od višine leta. Z večjo višino leta pa se podaljša pot laserskega žarka skozi atmosfero in poveča odtis laserskega žarka (angl. footprint) na površju. Slednje povzroči slabše ujemanje registriranih polarnih koordinat s točko na objektu od katere se je žarek odbil in posledično večjo  $\Delta Z$  [Kraus, 2004].

$$\text{Položajna natančnost: } \Delta X = \sqrt{\Delta X_{\Delta\varphi} + \Delta X_{\Delta\kappa} + \Delta X_{\Delta X_o}} \quad (3-4)$$

$$\text{(za } \kappa = 0^\circ) \quad \Delta Y = \sqrt{\Delta Y_{\Delta\omega} + \Delta Y_{\Delta\beta} + \Delta Y_{\Delta R} + \Delta Y_{\Delta Y_o}} \quad (3-5)$$

Če je rotacijski kot  $\kappa$  različen od nič, je le vpliv  $\Delta Z_o$  enak nič. V tem primeru je položajna natančnost  $\Delta XY$  odvisna od natančnosti GPS določitve položaja, IMU orientiranja in registracije polarnih koordinat. Vpliv napak orientiranja in napake merjenja kota odklona laserskega žarka na  $\Delta XY$  se povečuje z večanjem višine leta in kota snemanja [Kraus, 2004].

V nasprotju s fotogrametrijo je tu višinska natančnost v splošnem večja od položajne<sup>1</sup>. V realnem primeru **razgibanega terena** pa se napaka določitve višine poveča in približa ali celo preseže položajno napako. Višinska in položajna napaka sta tako medsebojno odvisni (korelirani) in velja  $\Delta Z = \Delta XY * \tan(i)$ . Dodatno, strm teren z lokalnim nagibom terena  $i$  povzroči večjo napako zaradi povečanega »rise time«  $\Delta t_{\text{rise}}$  in s tem povečane napake merjenja razdalje  $\Delta R$  [Baltasavias, 1999b].

### 3.4 Simultana povezava pasov ZLS

Natančnost danes dosegljivih POS sistemov je boljša od 1 dm v položaju in  $0,02^\circ$  v orientaciji, kar omogoča izračun visoko natančnih laserskih točk v referenčnem koordinatnem sistemu [Wehr in Lohr, 1999]. Še vedno pa je manjša od natančnosti točk določenih s fotogrametrično blokovno izravnavo, ki uporablja oslonilne točke [Burman, 2000]. Razlog je nezadovoljiva kakovost kalibracije sistema ZLS. Posledica so sistematične in slučajne napake integriranega sistema DGPS/INS, ki pri neposredni določitvi parametrov zunanje orientacije, neposredno vplivajo na izračun koordinat laserskih točk in povzročajo naslednje pojave:

- neujemanje prekrivajočih se sosednjih ali križajočih se pasov v položaju in/ali višini (relativna napaka);
- sistematično neujemanje na oslonilnih točkah (absolutna napaka);
- luknje med sosednjimi prekrivajočimi se pasovi.

Za učinkovito **kontrolno lidarskih podatkov**, s katero zaznamo opisane deformacije in povečamo natančnosti, je tudi pri metodi ZLS pomembno preiti iz neposredne orientacije na integrirano orientacijo senzorja (LS) z izravnavo. Ta vključuje vezne in terenske točke, parametri zunanje orientacije pa nastopajo kot dodatne neznanke [Kraus, 2004]. V procesu izravnave lidarskih pasov t.i. **skrbnega georeferenciranja** lahko zaznamo in odstranimo morebitne sistematične napake DGPS/INS sistema (npr. neujemanje koordinatnega sistema IMU-ja in LS-ja). V poglavju 3.4.1 in 3.4.2 je podrobneje predstavljen postopek preverjanja

---

<sup>1</sup> Primer za ALTM2050: višinska natančnost je 15 cm in položajna natančnost 60cm, za višino leta 1200m.

kakovosti in skrbnega georeferenciranja lidarskih pasov po [Kager, 2003], [Kager, 2004] in [Kager, 2005].

### 3.4.1 Preverjanje kakovosti lidarskih podatkov

Najpreprostejša metoda preverjanja je **vizualizacija barvno kodiranih višinskih razlik digitalnih modelov površine** (rDMP, angl. dDSM) na območju prekrivanja sosednih vzdolžnih pasov ali vzdolžnih in prečnih pasov. Za vsak pas se najprej izračuna DMP z velikostjo mrežne celice, ki je približno enaka gostoti točk v pasu. Med pari prekrivajočih se DMP-jev se izračuna njihova višinska razlika (rDMP), ki jo prikažemo z barvno prilagojeno lestvico in vizualno pregledamo z naključnim vzorčenjem ali bolje - sistematično. Tako lahko zaznamo sistemske anomalije, ki dajo informacijo le o relativnem ujemanju pasov. Za preverjanje absolutnega ujemanja in v primeru prevelikih odstopanj v rDMP se izvede naslednji korak – skrbno georeferenciranje z vključitvijo terenskih oslonilnih točk.

### 3.4.2 Skrbno georeferenciranje lidarskih podatkov

S postopkom skrbnega georeferenciranja želimo **izboljšati geometrično natančnost** podatkov lidarja kot tudi končnih izdelkov na nekaj cm ter tako kar najbolje izkoristiti zmogljivosti merske tehnike ZLS. Zato so, namesto minimalnih zahtev pri georeferenciranju lidarskih podatkov z uporabo DGPS in INS (ena terenska referenčna postaja in znana oblika geoida), možni še naslednji alternativni predlogi:

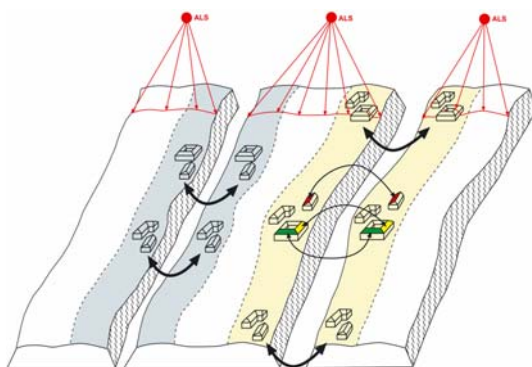
1. Uporaba **več kot ene terenske referenčne GPS postaje** na območju snemanja, kar lahko dosežemo z virtualnimi referenčnimi postajami. Ker je znan njihov položaj v terenskem koordinatnem sistemu, lahko eliminiramo (nepoznan) linearen del geoidne ondulacije.
2. Zamenjava terenskih referenčnih GPS postaj s **terenskimi referenčnimi točkami**, ki jih lahko identificiramo v oblaku lidarskih točk. Za planimetrično ujemanje so uporabne strehe stavb in/ali izrazite linije sprememb terena, za samo višinsko ujemanje pa horizontalne površine brez vegetacije. V fotogrametrični terminologiji se te točke imenujejo **oslonilne točke**.
3. Preverjanje planimetričnega in višinskega neujemanja lidarskih pasov na območju njihovega prekrivanja in izboljšanje podatkov GPS položaja in INS orientacije. Postopek

matematično zapišemo s korekcijskim polinomom (po en polinom za vsak lidarski pas), katerih koeficiente simultano določimo v izravnavi. V enačbah izravnave lahko kot opazovanja nastopajo 3D podatki točk, dani v nacionalnem koordinatnem sistemu, ki so dostopni končnemu uporabniku. S to **približno metodo**, ki je podrobneje predstavljena v [Kager in Kraus, 2001], premaknemo in zasukamo 3D oblak točk posameznega pasu (t.i. model) kot celoto in tako ne odpravimo pravega problema (t.j. napak poti leta (GPS) in podatkov orientacije (IMU)). V drugem, matematično natančnejšem in statistično boljšem pristopu v t.i. **eksaktni metodi** se uporabijo izvorna opazovanja kot funkcija časa, ki pa uporabniku večinoma niso dostopna. Prednost te metode je, da lahko izboljšamo orientacijske parametre (DGPS/IMU) in določimo velikost zasuka med komponentami (angl. misalignment) ter spremembo zamika linearno s časom (angl. drift).

V nadaljevanju je opisan potek izvedbe eksaktne metode. Po zgledu fotogrametrične izravnave neodvisnih modelov z dodatnimi parametri je oblak točk v posameznem lidarskem pasu obravnavan kot neodvisen model v svojem lokalnem koordinatnem sistemu. Med seboj jih združimo s pomočjo **veznih točk**, ki morajo biti dane na območju prekrivanja pasov (relativna orientacija). Za doseg visoke natančnosti pa so v izravnavo vključena še terenska opazovanja oz. **oslonilne točke** (absolutna orientacija).

#### 3.4.2.1 Določitev veznih ploskev

V fotogrametričnem smislu morajo biti za povezavo vseh lidarskih pasov v enoten model v (najmanj) dveh prekrivajočih se pasovih dane točke z identično lego in v idealnem primeru tudi z identično višino (Slika 3-2). Ker zaradi značilne razporeditve lidarskih podatkov v t.i. oblak točk, direktna in nedvoumna identifikacija identičnih točk ni možna, se v zameno uporabljajo druge preproste geometrične oblike (angl. features) – npr. ravnine, ki jih lahko izpeljemo iz množice laserskih točk. Če so orientacijski parametri lidarskih pasov določeni dovolj dobro, lahko pričakujemo, da se bodo identične ploskve prekrivale oziroma sovpadale – dobimo homologne ploskve (angl. homologous features).

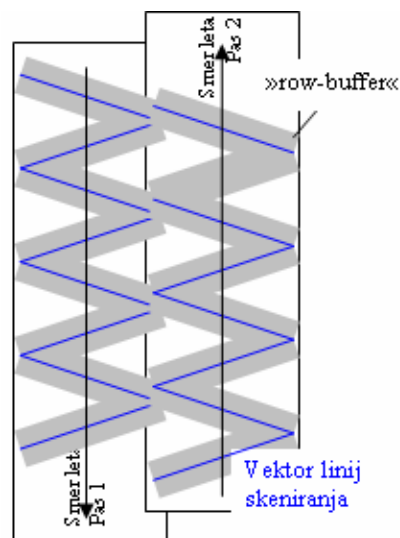


Slika 3-2: Princip veznih ploskev v sosednjih lidarskih pasovih [Kager, 2004].

Ker ima ravnina v prostoru dve prostostni stopnji, točka določena s tremi koordinatami pa nič prostostnih stopenj, **eni fotogrametrični homologi točki** analogno ustrezajo **tri homologne ravnine** (Slika 3-4). Za optimalno povezovanje dveh sosednjih pasov, naj bi se ravnine sekale pod dovolj ostrimi koti; najbolje je, če so ravnine med seboj ortogonalne. Holmologne ravnine nastopajo v blokovni izravnavi pasov kot vezni pojav (angl. strip tying features).

Določitev veznih ploskev (angl. tying patches) poteka **avtomatsko** z uporabo kronoloških podatkov snemanja pasov, saj ta podatkovna struktura ohranja topologijo. Topologija v tem kontekstu pomeni sosedske odnose točk, ki smiselno opišejo površje. Dana je z vektorjem linij skeniranja (angl. vector of rows) in, med časovno sosednjimi linijami, z monotonostjo nadirnega kota (Slika 3-3). Kandidate za vezne ploskve<sup>1</sup> tako iščemo v pasu okoli vektorizirane linije skeniranja, (angl. row-buffer), da so izpolnjeni pogoji:

- je nad okolico (če iščemo streho);
- je ravna - z dovoljenim odstopanjem (standardna deviacija 0.04 m);
- je dovolj strma (če iščemo streho);
- ne sme imeti zunanjih struktur (strešno okno, dimnik);
- ni premajhna (je podprta z minimalnim številom točk).



Slika 3-3: Skica vektorja linij in pasu iskanja veznih pojavov v lidarskem pasu.

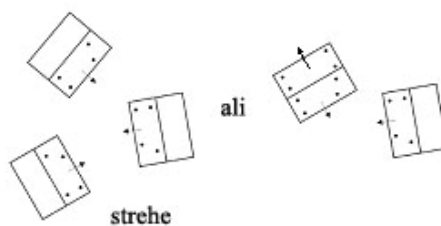
<sup>1</sup> Tako imenujemo manjše vezne ravnine podprte z območjem lidarskih točk.

Za določitev kandidat-ploskev se uporablja izravnava splošne ravnine z metodo »data-snooping«. Ploskve se išče znotraj pasu okoli vektorizirane linije skeniranja po kronološkem zaporedju linij od prve do zadnje vzdolž trajektorije. Za vsak pas laserskega skeniranja dobimo tako kandidatke-ploskve in natančnost meritev. V nadaljevanju procesa poiščemo na območju prekrivanja dveh pasov (ročno ali avtomatsko) homologne kandidatke-ploskve, ki služijo kot vezne ploskve v izravnavi.

### 3.4.2.2 Določitev terenskih oslonilnih ploskev

Terenske oslonilne ploskve se uporabijo za izboljšanje absolutne orientacije vseh lidarskih pasov v bloku snemanja. Služijo za odpravo napak, ki nastanejo z uporabo DGPS pri georeferenciranju lidarskih podatkov in so posledica pomanjkljivosti kinematične GPS metode. Kažejo se kot premik položaja pri obratih nosilca LS-a.

Kot velja za določanje veznih točk, je tudi določanje oslonilnih točk v lidarskih podatkih v točkovnem smislu nemogoče; potrebne so tri ravnine, ki se sekajo v eni 3D točki (Slika 3-4). Na obodu vsake od treh oslonilne ravnin, so s terenskimi meritvami določene najmanj štiri točke. Pri izboru primernih ravnin (največkrat strehe) mora biti, poleg pogojev zapisanih v poglavju 3.4.2.1, zadoščeno še pogojema:



Slika 3-4: Skica usmerjenosti treh veznih ploskev, ki so enakovredne eni vezni točki [Kager, 2004].

1. Da so ravnine dovolj strme, saj horizontalne ravnine ne zadostijo matematičnim pogojem.
2. Da imajo normale različno smer, kar zagotavlja določitev vseh treh prostostnih stopenj v prostoru.

Idealna razporeditev oslonilnih ploskev v lidarskem bloku še ni znana. Po zgledu fotogrametrične aero-triangulacije podprte z GPS, so oslonilne točke v bloku lidarskih pasov razporejene v vogalih in na robovih bloka [Kraus, 1997]. Dodatno naj bi bila na obeh koncih bloka (na koncu vzporednih pasov) posneta prečna pasova, ki ju lahko nadomestimo z zaporedjem višinskih oslonilnih točk. Priporočljivo je, da so oslonilne ploskve izbrane na območju prekrivanja pasov, kar pomeni, da se njihov položaj določa hkrati s planiranjem leta.

### 3.4.2.3 Simultana 3D blokovna izravnava pasov po MNK

Namen postopka izravnave je popraviti parametre **zunanje orientacije** pridobljene iz meritev DGPS/IMU, kot tudi parametre **notranje orientacije** vezane na sistem LS-DGPS-IMU in kalibracijske **parametre iz postopka kalibracije**. Parametri so v izravnavo vključeni kot neznanke. Kot opazovanja pri eksaktni metodi preverjanja kakovosti lidarskih podatkov uporabimo originalna opazovanja laserskega skenerja (polarne koordinate: kot skeniranja in razdalja), DGPS-a ( $X_o, Y_o, Z_o$ ) in INS-a ( $\omega, \varphi, \kappa$ ).

Najprej po enačbi (3-6) zapišemo **korekcijski polinom** za merjene parametre orientacije kot funkcije časa (enačba); za vsak lidarski pas po en polinom. Sedaj lahko določimo koeficiente korekcijskih polinomov posameznega pasu hkrati (simultano) za vse pasove v bloku snemanja s t.i. **blokovno izravnavo neodvisnih pasov z dodatnimi parametri** (angl. block adjustment by independent strips and additional parameters).

$$x(t) - x_o(t) = \lambda * R^T(t) * (X(t) - X_o(t)) \quad (3-6)$$

Kjer so:

$x(t) = x_{t,s} = cart(v_t, \chi_t, r_t)$  ... vektor kartezičnih koordinat točk, ki predstavljajo vezne in oslonilne ploskve (angl. patch feature) in so izračunane iz polarnih koordinat;

$x_o(t) = x_o(a, t)$  ... referenčna točka GPS antene v LS koordinatnem sistemu;

$a$  ... vektor dodatnih parametrov: zamik (ekscentričnost) GPS antene glede na LS;

$\lambda = 1$  ... merilo laserskega skenerja (atmosfera);

$R(t) = R_{LS}^{IMU}(b, t) * R_{IMU}(t)$  ... rotacijska matrika za rotacijo IMU-sistema v referenčni koordinatni sistem;

$b$  ... vektor dodatnih parametrov za IMU zamik in zanos (angl. offset & drift);

$X(t)$  ... vektor koordinat terenskih točk;

$X_o(t) = X_{o,GPS}(t) + X_o(c, t)$  ... center GPS antene na trajektoriji (angl. flight path);

$c$  ... vektor dodatnih parametrov za GPS zamik in zanos.

Rezultat izravnave so izravnani parametri in popravljene koordinate lidarskih točk, ki jih znova uporabimo za izračun DMP. S ponovnim vizualnim pregledom rDMP ugotovimo, če so

razlike izravnanih višin dovolj majhne in lahko lidarske točke uporabimo za nadaljnjo obdelavo – za izračun digitalnih modelov.

### 3.5 Izdelava digitalnega modela reliefa

Digitalni model reliefa je najpomembnejši izdelek tehnike zračnega laserskega skeniranja. DMR lahko pridobimo še na druge načine (z drugimi merskimi tehnikami) kot npr. iz digitaliziranih plastnic topografskih kart, iz letalskih posnetkov na osnovi avtomatske metode slikovnega ujemanja, iz InSAR podob. Vendar ima DMR iz lidarskih podatkov mnoge prednosti pred ostalimi tehnologijami. Te so predvsem v hitrem in avtomatiziranem zajemu podatkov, v visoki gostoti podatkov, ki omogočajo izdelavo visoko resolucijskega in natančnega DMR, vse hitrejši obdelavi lidarskih podatkov z visoko avtomatiziranimi algoritmi, ki se razvijajo hkrati s tehnologijo ZLS (upoštevajo njene zmožnosti, npr. število registriranih odbojev) in sledijo dejanskim potrebam na različnih področjih uporabe ZLS (Poglavje 3.6). Zaradi pomembnosti in široke uporabe DMR-ja se je tekom časa razvilo več algoritmov za njegovo izdelavo. Cilj algoritmov je zagotoviti čim natančnejši model ob upoštevanju parametrov merskega sistema ZLS.

Za določitev DMR-ja, ki je po definiciji interpoliran le iz lidarskih točk odbitih od tal, je potrebno podatke klasificirati v **terenske točke**, ki ležijo na terenu, in druge točke (**neterske točke**), ki so se registrirale z odbojem laserskega žarka od objektov nad terenom in tako ležijo previsoko glede na teren. Če za vsak XY-položaj<sup>1</sup> lidarske točke izračunamo razliko njene Z-vrednosti in višine »pravega« terena, dobimo **asimetrično porazdelitev napak** točk laserskega skeniranja, kjer »napaka« pomeni razliko med »pravo« višino terena ( $t$ ) in opazovano višino točke ( $Z$ ). Algoritem metode ovrednotenja napak, ki upošteva to posebno porazdelitev napak, je bil prvič predstavljen v Nemčiji [Kraus, 1997] in se imenuje **hierarhična robustna interpolacija**. Teoretičen opis s sintetičnim primerom je podan v [Kraus in Pfeifer, 1997]. Sprva je bila metoda uporabljena le za izdelavo DMR-ja na gozdnih območjih [Kraus in Pfeifer, 1998], kasneje pa so jo nadgradili za obdelavo katerihkoli

<sup>1</sup> Uporaba je omejena na 2.5D primere, kar pomeni da je površje graf funkcije dveh spremenljivk in so napake merjene le v z-smeri.



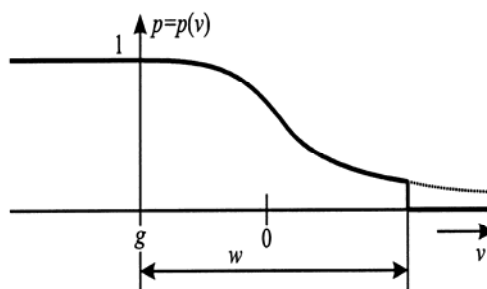
podatkov<sup>1</sup>, ki vsebujejo grobe pogreške, in za interpolacijo različnih površin (ne le DMR-ja) [Briese et.al., 2002]. V poglavjih 3.5.1 in 3.5.2 je podana teoretična osnova te metode.

### 3.5.1 Iterativna robustna interpolacija

**Robustna metoda** deluje na originalnih, nestrukturiranih podatkih t.j. na oblaku točk in izpelje hkrati (v enem procesu) postopek eliminacije ne-terenskih točk (**filtriranje**) ter modeliranje površja terena (**interpoliranje**). Namen robustne interpolacije površja je izračunati uteži, individualno za vsako točko neenakomerno razporejenih lidarskih podatkov, tako da bo modelirano površje kar najbolje predstavljajo teren.

Algoritem robustne interpolacije sestavljata dve bistveni stvari. Prvo predstavlja **stohastičen model**, ki ga določa utežna funkcija in ki nadzoruje odstranitev grobih pogreškov, drugo pa **funkcionalni model**, ki opisuje način interpolacije površja.

Za stohastični model se uporablja **standardna** utežna funkcija, ki je zaradi asimetrične razporeditve napak (višine lidarskih točk glede na »pravi« teren) po Krausovi teoriji [1997] **asimetrična** in dodatno še **zamaknjena** za vrednost  $g$  (angl. shift value) v levo - v negativno smer (Slika 3-5). Vrednost  $g$  se izračuna samodejno iz histograma razlik (Slika 3-7), za vsako iteracijo posebej [Pfeifer et al., 1998].



Slika 3-5: Asimetrična utežna funkcija  $p$  [Kraus in Pfeifer, 1998].

$$p_i = \begin{cases} 1 & v_i \leq g \\ \frac{1}{1 + (a * |v_i - g|)^b} & g < v_i \leq g + w \\ 0 & g + w < v_i \end{cases} \quad (3-7)$$

<sup>1</sup> Podatki pridobljeni z različnimi senzorji oz. tehnikami: terestično, zračno, satelitsko lasersko skeniranje, tahimetrija in fotogrametrija.

Kjer so:

$v_i$  ... vrednost filtra – parameter utežne funkcije;

$g$  ... vrednost zamika, izračunana avtomatično iz vrednosti filtra;

$(a, b)$  ... parametra, ki določata strmino utežne funkcije.

Po enačbi (3-7) se za vsako točko izračuna utež  $p_i$ , ki je funkcija vrednosti filtra t.j. orientirane razdalje med merjeno točko in površjem. S tem je zadoščeno namenu algoritma, da mora utežna funkcija pripisati večjo vrednost (blizu 1 oz. 1) terenskim točkam, ki so pod ali na povprečnem površju (imajo negativne razlike oz. razlike manjše od  $g$ ) in obratno nižjo vrednost (blizu 0 oz. 0) ne-terenskim točkam, ki so nad ali na povprečnem površju (imajo pozitivne razlike oz. večje od  $g + w$ ) [Kraus in Pfeifer, 1998]. Povprečno površje je ravna črta – trend (Slika 3-6).

Za interpolacijo DMR (funkcionalni model) je uporabljena metoda **linearne predikcije**, ki opisuje površje kot vsoto osnovnih funkcij centriranih na posamezni podatkovni točki. V tem primeru je osnovna funkcija **kovariančna funkcija**, ki je glede na podatke določena avtomatsko za vsako lidarsko točko. Bolj detajlen izračun kovariance in opis linearne predikcije je v [Kraus, 2000, poglavje H.3].

Iterativna robustna interpolacija poteka v naslednjih korakih:

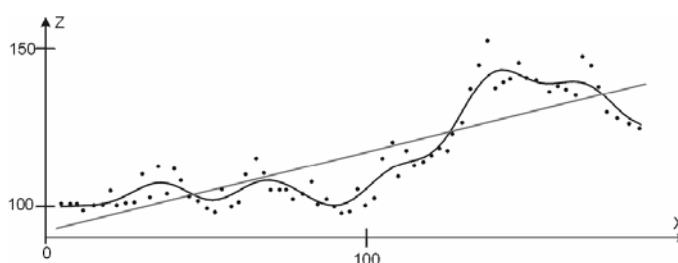
1. Interpolacija površja z upoštevanjem individualnih uteži za vsako točko (funkcionalni model). V prvi iteraciji so uteži enake za vse točke oziroma bolj natančno, za njihove z-meritve. Izračunano površje teče po sredini med terenskimi in ne-terenskimi točkami (trend, Slika 3-6).
2. Izračun vrednosti filtra za vsako točko. Določi se razliko<sup>1</sup>  $v_i$  med višino površja (interpoliranega v prejšnjem koraku) in višino merjene točke  $z_i$ . Terenske točke imajo najverjetneje veliko negativno razliko  $v_i$ . Nasprotno pa lahko za ostale točke pričakujemo majhno negativno ali pozitivno razliko. Tipična razporeditev razlik oz. vrednosti filtra je prikazana na histogramu (Slika 3-7).

---

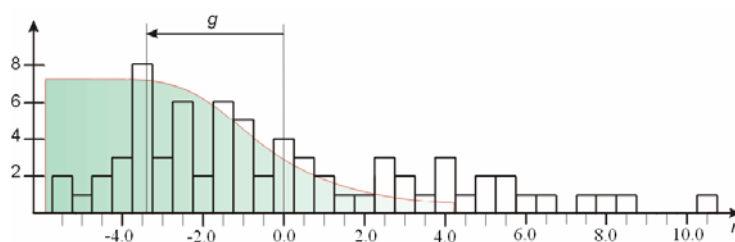
<sup>1</sup> Za razliko (angl. residual) oz vrednost filtra (angl. filter value) se uporablja še termin orientirana razdalja.

3. Ocena nove uteži  $p_i$  za vsako točko glede na vrednost filtra (stohastični model) oz. razlike  $v_i$  (Slika 3-8) po enačbi (3-7). Točke z večjo utežjo bodo bolj pritegnile površje (kar logično izhaja iz manjše orientirane razdalje v tej točki), medtem ko bodo imele točke z majhno utežjo malo vpliva na potek površja.

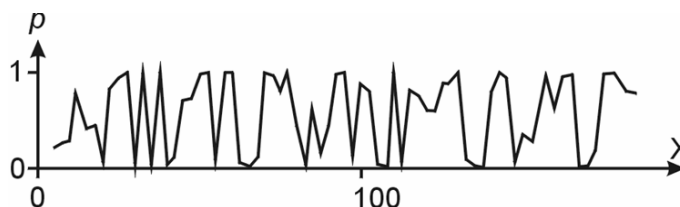
Koraki se ponavljajo, dokler ni dosežena stabilna situacija (so odstranjene vse grobe napake) ali dokler ni doseženo maksimalno število iteracij, ki je predhodno določeno. Rezultat končne interpolacije z utežno funkcijo je na sliki (Slika 3-9) prikazan s temno črto in primerjan z rezultatom linearne predikcije (siva črta). Utežene terenske točke so površje pritegnile navzdol.



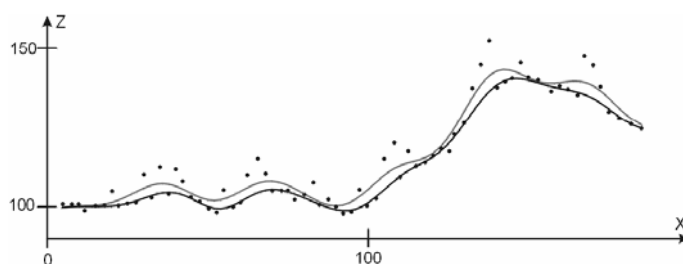
Slika 3-6: Originalne lidarske točke, trend in rezultat linearne predikcije s simetrično utežno funkcijo [Kraus, 2000].



Slika 3-7: Histogram izračunanih vrednosti filtra  $r$  in asimetrična utežna funkcija z zamikom  $g$  [Pfeifer, 2001 et. al].



Slika 3-8: Uteži izračunane za vsako originalno točko po enačbi (3-7) [Kraus, 2000].



Slika 3-9: Rezultat interpolacije z asimetrično utežno funkcijo [Kraus, 2000].

Med iterativnim procesom določanja uteži se izvede še klasifikacija. Če je orientirana razdalja večja ali manjša od določene vrednosti filtra, se točka klasificira kot ne-terenska točka in se je v naslednjih interpolacijah površja ne upošteva več (eliminirana točka). Rezultati iterativne linearne predikcije z upoštevanjem individualnih uteži so **model površja** in točke, ki so klasificirane na **terenske in ne-terenske točke**.

### 3.5.2 Hierarhična robustna interpolacija

V poglavju 3.5.1 opisana avtomatska metoda filtriranja in interpoliranja lidarskih podatkov je uspešna, če je zagotovljena »dobra mešanica« (angl. good mixture) podatkov, kar pomeni zadostno frekvenco pojavljanja terenskih in ne-terenskih točk na območju računanja DMR-ja [Kraus in Pfeifer, 1998]. S tem je omogočena zanesljiva določitev vrednosti zamika  $g$  izhodišča utežne funkcije. V primeru gozdnega območja zadostuje že 25% penetracija, težje pa je določiti DMR na območju zgradb (večje ploskve brez terenskih točk). V eni izmed rešitev problema je predlagana preureditev vhodnih lidarskih podatkov v primerno obliko, ki bi omogoča eliminacijo vseh grobih napak. Princip se imenuje »od grobega k finemu« (angl. coarse-to-fine approach).

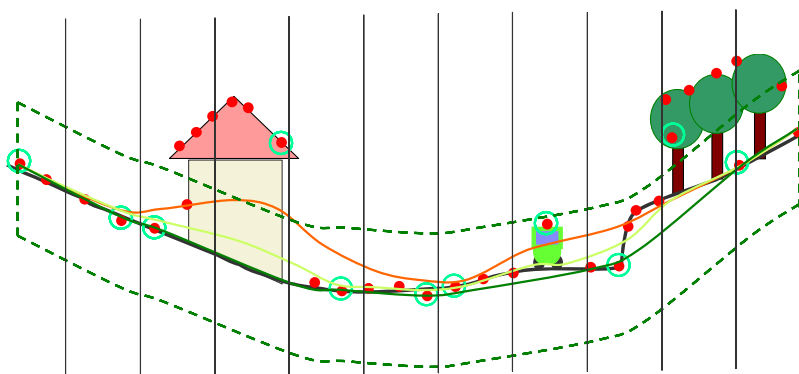
S funkcijo za redukcijo podatkov, ki deluje neposredno na lidarske točke, se oblikujejo podatkovne piramide. In sicer je čez lidarske točkovne podatke položena kvadratna mreža. Glede na tip podatkov (odstotek penetracije, gozdna ali mestna površina, ...) je izbrana najprimernejša metoda za filtracijo lidarskih podatkov, ki jo nato uporabimo za določitev ene točke znotraj vsake celice mreže in tako tvorimo pravilno piramido. Metode za izračun te točke so:

- najnižja točka v vsaki celici;
- $n$ -ta najnižja točka v vsaki celici;
- točka najbližje centru vsake celice.

Postopek filtracije ponovimo na različnih nivojih – za različne velikosti celične mreže (od grobega k finemu npr. 5 m, 3 m in 1 m) in dobimo podatkovno piramido, ki ima največkrat pravilno strukturo in je sestavljena iz dveh ali treh nivojev.

Potek metode robustne interpolacije, ki je vstavljena v hierarhični sistem (Slika 3-10):

1. Izdelava podatkovne piramide z nivoji, v katerih so podatkovni nizi različne resolucije (višji nivo pomeni nižjo resolucijo).
2. Uporaba robustne interpolacije za filtracijo podatkov in izdelavo DMR iz točk nižje resolucije, začenši z najvišjim nivojem (angl. coarsest level).
3. Primerjava DMR-ja iz drugega koraka, s točkami večje resolucije (kar pomeni nižji nivo; nivo 0 vsebuje originalne lidarske točke). Sprejete so točke znotraj določenega intervala oz. pasu (angl. tolerance band) okrog grobega DMR-ja.



Slika 3-10: Strategija hierarhične robustne interpolacije – najvišji nivo z izbiro najnižje točke [Mandlbürger, 2005].

Koraka 2 in 3 se ponavljata za vsak naslednji »finejši« nivo (t.j. nižji nivo s podatki večje resolucije). Prednost metode se pokaže predvsem pri veliki gostoti podatkov (0.5 točk/m<sup>2</sup> ali več). Metoda pospeši proces klasifikacije in filtracije, ker se obdeluje manjša količina podatkov, učinkoviteje eliminira ne-terenske točke v primeru goste vegetacije in prisotnosti večjih zgradb ter naredi proces robustnejši.

### 3.6 Uporaba ZLS v praksi

Zaradi sposobnosti laserskega žarka, da prodre skozi 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 območji z nezadostno teksturo in majhnimi kontrasti. Tekom časa se je uporabnost metode ZLS razširila precej bolj, kot je bila prvotno zasnovana [TopScan] in lahko za določeno uporabo predstavlja dopolnjujočo ali konkurenčno metodo ostalim obstoječim tehnikam zajema. Današnji razvoj ZLS tehnike je usmerjen v združevanje z drugimi bolj tradicionalnimi senzorji kot so standardni stereo fotoaparati, digitalni fotoaparati, multispektralni skener ali termalni fotoaparati. 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], sem na kratko povzela v poglavjih od 3.6.1 do 3.6.9.

### 3.6.1 Izdelava DMR-ja za različne izdelke, ki se jih uporablja v GIS-ih in kartografiji

ZLS omogoča neposreden, hiter, cenovno ugoden zajem topografskih podatkov (tudi) na velikih površinah in za številne kartografske uporabe. Prednost pred ostalimi tradicionalnimi metodami predstavljajo podatki višin skeniranega površja, ki imajo visoko natančnost in veliko gostoto (tudi na pogozdenem terenu). Višine terena so dane v 2.5D<sup>1</sup> digitalnem modelu reliefa (DMR), ki nastane z eliminacijo ne-terenskih točk in interpolacijo preostalih (le na terenu ležečih) točk. DMR tako prikazuje stanje golega terena, ki ga prikazujemo na topografskih kartah [Triglav, 2004].

### 3.6.2 Gozdarstvo

Uporaba ZLS v gozdarstvu je bila ena izmed prvih komercialno raziskanih področjih, saj glede na fizikalne lastnosti laserja omogoča prodor<sup>2</sup> žarka skozi vegetacijo in tako odboj od tal. V procesu naknadne obdelave se z analizo individualnega registriranega odboja podatke klasificira v terenske točke, ki omogočajo izdelavo DMR - golega terena (Slika 3-11, desno). S preprosto interpolacijo vseh registriranih lidarskih točk se izračuna digitalni model površine (DMP - Slika 3-11, levo) [Kraus in Pfeifer, 1998].

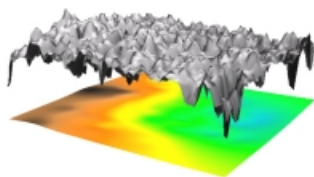
<sup>1</sup> Za vsako točko površja (X,Y) je dana le ena višina (Z) in je  $Z = f(X,Y)$ .

<sup>2</sup> Od 15% do 70% [Kraus, 2000; str 289]. Stopnja prodora je odvisna predvsem od vrste dreves in letnega časa. Večjaje v listnatem gozdu, še posebej pozimi, in manjša v iglastem gozdu zaradi gostejših krošenj.



Slika 3-11: Primer DMP (levo) in DMR (desno) [TopScan].

Reprezentativna višina gozda je tako dana kot razlika višin (DMP – DMR). ZLS priskrbi tudi horizontalne in vertikalne informacije o vegetaciji. Natančne informacije o terenu in topografiji pod drevesnimi krošnjami so izredno pomembne za gozdarsko industrijo in za upravljanje z naravnimi viri. Prav tako so pomembne informacije o višini in gostoti dreves, ki jih težko oz. ne moremo pridobiti z običajnimi tehnikami kot so fotogrametrija, radarsko ali satelitsko snemanje, ali obširne terenske meritve.



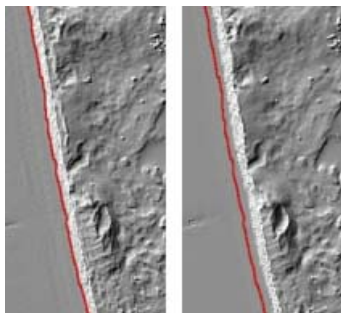
Slika 3-12: 3D model površine krošenj in barvno kodiran teren pod njo [TopScan].

Aktiven razvoj programske opreme na področju gozdarstva je poleg že zgoraj omenjenih uveljavljenih aplikacij usmerjen v ekstrakcijo višin vrhov in 3D koordinat debel ter vrhov posameznih dreves, klasifikacijo vrst gozda oz. dreves ter seveda v čim večjo avtomatizacijo teh procesov.

### 3.6.3 Obalno inženirstvo

Obalno inženirstvo je drugo najpomembnejše področje uporabe ZLS, ki ima pomembne prednosti pred ostalimi merskimi tehnikami. ZLS omogoča zajem slabo kontrastnih obalnih območji 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, kot bi ji imeli v primeru

uporabe drugih tehnik. ZLS se uporablja še za kartiranje in nadzorovanje pasu plimovanja<sup>1</sup> (erozije), peščin, nasipov in obalnega gozda.



Slika 3-13: Slika terena dela obale na Nizozemskem leta 2000 (levo) in 2002 (desno) [TopoSys]

#### 3.6.4 Kartiranje koridorjev

ZLS se cenovno učinkovito uporablja za hitro in natančno kartiranje linearnih koridorjev nadzemne infrastrukture, kot so energetske vode, plinovodne cevi, avtoceste itd. Največ povpraševanja je po kartiranju energetskih vodov, saj omogoča natančno dokumentiranje (izdelava baze podatkov nadzemnih vodov) obstoječega stanja in preprosto neprekinjeno nadzorovanje večjega območja koridorjev (izdelava vzdrževalnega sistema). Karakteristike, ki so pomembne pri tej uporabi so 2D in 3D lokacije daljnovodnih stebrov, 3D položaj daljnovodnih žic in njihova povešenost, vegetacija znotraj koridorja (problematična območja zaraščenosti, vidne so meje med vegetacijo in daljnovodi), morebitna prisotnost drugih objektov in raba tal. V ta namen se prelete izvaja s helikopterjem, ki lahko leti nižje (na višini npr. 400 m nad tlemi). Pri nekaterih aplikacijah, kot npr. ugotavljanje možnosti povečanja napetosti na daljnovodu, se podatki ZLS uporabljajo skupaj s simultano zajetimi infrardečimi ali RGB posnetki.



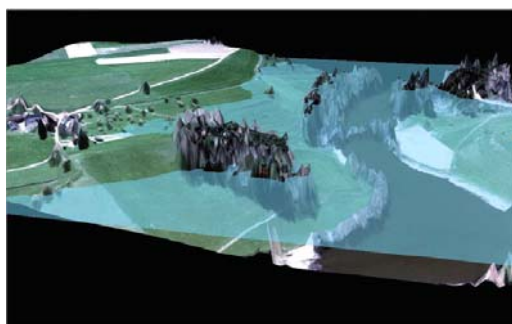
Slika 3-14: 3D pogled na oblak točk v linijskem koridorju [TopoSys].

<sup>1</sup> Pas plimovanja je pas kopnega med najvišjim nivojem plime in najnižjim nivojem oseke.



### 3.6.5 Kartiranje poplavnih območij

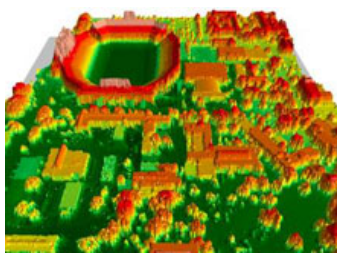
Pri kartiranju poplavnih območij je pomembna visoka natančnost določitve višin terena in objektov na tem območju (tudi ob prisotnosti vegetacije), kar ZLS omogoča. Na osnovi lidarskega DMR-ja in DMV-ja se glede na pričakovan porast naravne vode zaradi dežja ali topljenja snega izvajajo simulacije poplav. Upoštevajo se velikost, višina in položaj elementov kot so kotlina, ki delujejo kot zadrževalniki vode, jez in jarek (DMR) ter stavbe in drugi objekti, ki delujejo kot pregrade (DMV). Kontroliranje dviga in razširjanja poplavne vode (poplavne ravnine) je posebej pomembno za območja intenzivnega ekonomskega izkoriščanja in naselja ob rekah ali jezerih. Natančni in ažurni modeli poplavnih ravnin so potrebni iz vidika preventivnih varnostnih ukrepov kot tudi za napovedovanje možnih naravnih nesreč in planiranja reševanja iz njih.



Slika 17: Simulacija poplavnega območja [TopoSys].

### 3.6.6 Modeliranje mest

ZLS omogoča natančne meritve višin urbanih objektov in določitve položaja oboda stavb na površju. **Kartiranje** urbanih območji ni obremenjeno s svetlobnimi sencami (zaradi uporabe aktivnega senzorja) kot pri fotogrametriji. S klasifikacijo točkovnih lidarskih podatkov in **modeliranjem** (vektORIZACIJO) stavb ter ostalih objektov v mestu pridobimo natančen 3D digitalen model mesta. Karte in modeli mest so osnova za presojanje različnih zahtev in vidikov urbanega planiranja: planiranje telekomunikacijskega omrežja, simulacijo novih gradenj in odtekanja odpadnih vod, primerjavo s katastrskimi podatki in njihovo posodabljanje, planiranje zaščite pred hrupom. Z razvojem in dostopnostjo osebnih računalnikov se lidarski modeli skupaj z digitalno sliko uporabljajo za fotorealistične predstavitve in prikaza mest (virtualen sprehod skozi mesto), za potrebe turizma.



Slika 3-15: Barvno kodirane lidarske točke zajete na urbanen območju [ALTM].

### 3.6.7 Odziv na naravno nesrečo in ocenitev škode

Večina naravnih nesreč kot npr. v primeru hurikanov ali potresov zahteva takojšen odziv in dobro organizacijo nujne pomoči. 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. Večja je tudi zmožnost zagotavljanja varnosti in nudenja pomoči. Metoda ZLS je še posebej uporabna v primeru naravne nesreče na območju, ki je nagnjeno k večjim spremembam terena npr. peščene plaže, široki rečni izlivi, poplavne ravnine, zemeljski plazovi.

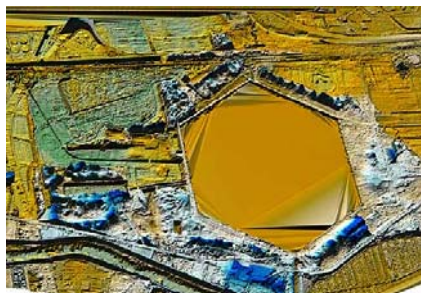
### 3.6.8 Zaščita naravne dediščine – mokrišča in druga težko dostopna območja

Za zaščito in ohranitev naravne dediščine je potrebno pregledati obstoječe stanje in dobiti vpogled v spreminjanje pokrajine. Poleg zaščite poplavnih območji je v zadnjem času (tudi na mednarodni ravni) pridobila na pomenu renaturalizacija starih rečnih rokavov, močvirij, vresišč in barij, ki so bila v preteklosti denaturalizirana z drenažami, pogozdovanjem in ekstenzivnim poljedelstvom, izkopavanjem šote. Primer obnove mokrišč (barje, močvirje) je npr. ponovno poplavljanje območja. Ker so območja na terenu težko dostopna in zaradi pokritosti z (gosto) vegetacijo neprimerna za uporaba tradicionalne fotogrametrije, je ZLS najprimernejša metoda za merjenje teh površin in terena.

### 3.6.9 Arheologija

Prednost ZLS je sposobnost hitrega pregleda 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 obdelavo podatkov in impresivno

vizualizacijo nahajališč (3D predstavitev, karte terena) se oblikuje detajlno dokumentirana baza izkopanin, ki omogoča nadaljnje in-situ arheološke raziskave.



Slika 3-16: DMV Trajanovega šestkotnega pristanišča (Rim), bližnjih cest in železnice [Helica].

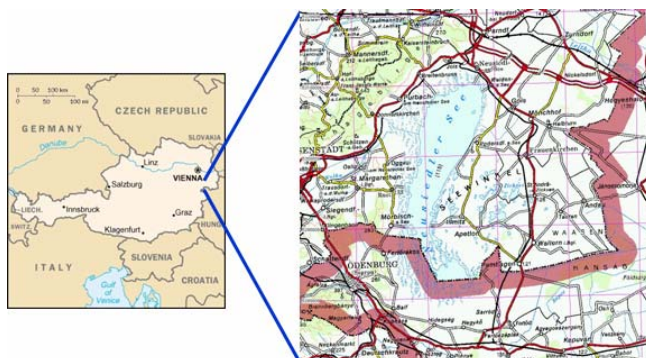
Z razvojem tehnologije ZLS in praktičnim obdelovanjem lidarskih podatkov s strani končnih uporabnikov se njena uporaba nenehno spreminja in širi na nova področja. Naj omenim le še merjenje odlagališč industrijskih in strupenih odpadkov (težje dostopna), kamnolomov, dnevnih kopov in drugih območjih v gradnji (potrebna visoka natančnost), območji 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 PROJEKT ZLS NACIONALNEGA PARKA NEUSIEDLER SEE-SEEWINKEL V AVSTRIJI

### 4.1 Motivacija in okvir izvedbe projekta Neusiedler See-Seewinkel

Čezmejni nacionalni park Neusiedler See-Seewinkel leži na vzhodu Avstrije v zvezni deželi Burgenland. Zajema 320 km<sup>2</sup> veliko jezero Neusiedler See, ki leži na najnižji točki Male Madžarske planote v kotlini brez odtoka, ter vzhodno od njega Seewinkel planoto s površino 450 km<sup>2</sup>. Manjši del parka leži na Madžarskem.



Slika 4-1: Lega nacionalnega parka Neusiedler See na karti Avstrije [Attwenger, 2005].

Za nacionalni park so posebej pomembni travniki, ki jih uporabljajo za tradicionalno sušenje sena, pašniki in edinstvene hitro izginjajoče kotanje slane vode. Ti biotopi so mednarodno znani in pomembni po mnogih vrstah ptic, orhidej, rastlin, ki rastejo na slani podlagi, po kačjih pastirjih, metuljih in pajkih. Tekom 20. stoletja je zaradi napačnega ravnanja z vodo (umetno izsuševanje zemlje, prekomerno izkoriščanje podzemne vode) prišlo do velikega upada števila mokrišč (do 75%). Poleg izsuševanja se je povečalo izkoriščanje površin v poljedelske namene – nasadi vinogradov segajo prav do meja vodnih objektov. Zavedanje edinstvenosti območja in na drugi strani pereči problemi so privedli do odločitve za saniranje območja in povrnitev v prvotno stanje - za renaturalizacijo.

Spremembe v pokritosti površja so vidne s primerjanjem zgodovinskih podatkov, ki so zapisani na topografskih kartah, in aktualnega stanja pokritosti površja. Metoda opazovanja trenutnega stanja je bila izbrana glede na najpomembnejši naravni pojav v nacionalnem parku

Neusiedler See-Seewinkel/Fertö-Hanság, to je mokrišče, ki zahteva natančne podatke o višini površja. Zaradi velike gostote podatkov in možnosti izdelave visoko natančnega digitalnega modela terena, so uporabili tehnologijo zračnega laserskega skeniranja. Na ta način je bilo omogočeno iskanje ključnih naravnih globeli in izvajanje natančnih hidroloških analiz [Attwenger in Chlaupek, 2006].

Zračno lasersko skeniranje čezmejnega nacionalnega parka Neusiedler See-Seewinkel/Fertö-Hanság je bilo izvedeno v okviru projekta SISTEMaPARC<sup>1</sup>. V projekt SISTEMaPARC, ki deluje znotraj transnacionalnega evropskega programa INTERREG IIIB CADSES, je skupno vključenih 20 institucij iz sedmih držav, med katerimi je tudi Slovenija. Regije izvajanja projekta ležijo znotraj prostora CADSES<sup>2</sup> in obsegajo naslednje **štiri čezmejne nacionalne parke** (Slika 4-2):

1. »Saxon-Bohemian Switzerland« (Nemčija / Češka);
2. »Giant Mountains« (Poljska / Češka);
3. »Lake Neusiedler / Fertö-Hanság« (Avstrija / Madžarska);
4. »Triglav National Park / Parco naturale delle Prealpi Giulie« (Slovenija / Italija).



Slika 4-2: Prikaz prostora CADSES in regij projekta [SISTEMaPARC2].

Najpomembnejše rezultate, ki jih sodelujoče države skušajo doseči pri projektu SISTEMaPARC, lahko stremo v naslednje točke [SISTEMaPARC1]:

- Vzpostavitev digitalne baze podatkov za zaščitena območja na čezmejni in mednarodni ravni. Podatki se nanašajo na topografijo, rastlinje, živalstvo, rabo in pokritost zemljišč, digitalni model terena, ortofoto, itd.

<sup>1</sup> SISTEMaPARC je kratica za Spatial Information Systems for Transnational Environmental Management of Protected Areas and Regions in CADSES.

<sup>2</sup> CADSES je kratica za Central, Adriatic, Danubian and South-East European Space.

- Implementacija orodij v prostorski informacijski sistem, s katerimi se zagotovi mednarodno homogenizacijo prostorskih podatkov za vrednotenje potencialov pokrajine.
- Vzpostavitev mednarodne komunikacijske mreže »GeoPortal« lokalnih in regionalnih oblasti in inštitutov, ki so vpleteni v procese upravljanja, razvoja in gospodarjenja z zaščitenimi območji v CADSES-u.
- Povečanje zavedanja o vrednosti ohranjanja in razvoja naravne dediščine in sicer z zagotavljanjem informacij, ki so ljudem razumljive in omogočajo ter olajšajo udeležbo v procesih.

Najpomembnejši cilj projekta SISTEMaPARC je podpora upravam nacionalnih parkov na regionalni in transnacionalni ravni in razvoj čezmejnih nacionalnih parkov z vzpostavitvijo oz. izboljšanjem čezmejnih in mednarodnih prostorskih informacijskih sistemov (SIS). Le-ti naj bi služili kot podlaga za zajemanje, upravljanje, analiziranje in predstavitev podatkov, ki se nanašajo na prostor.

Zračno lasersko skeniranje se je izvedlo ločeno (v različnih časih in z različnimi sistemi) za Avstrijski in Madžarski del parka. Na inštitutu I.P.F. Dunaj, ki je imel nalogo izračunati digitalni model reliefa, so mi omogočili dostop do avstrijskih meritev in podatkov. Zajem lidarskih meritev in njihova začetna (groba) obdelava, kar je izvedlo podjetje TopScan, je opisano v poglavju 4.2. V poglavju 4.3 so opisane terenske meritve, ki so bile izmerjene (poleg zračnih meritev) zaradi potrebe projekta (hidrološke analize) po visoko natančnem DMR. V poglavju 4.4 so nato opisani postopki obdelave lidarskih podatkov za izračun natančnega DMR-ja in njegovo uporabo v projektu Neusiedler See, kar so izvedli na I.P.F. Dunaj. Končen rezultat obdelave Avstrijskih in Madžarskih lidarskih podatkov je v skladu z cilji projekta SISTEMaPARC enoten visoko resolucijski digitalni model reliefa (DMR) dan v evropskem koordinatnem sistemu ETRS89<sup>1</sup> (projekcija UTM cona 33).

---

<sup>1</sup> European Terrestrial Reference System 1989.

## 4.2 Izvedba misije zračnega laserskega skeniranja Neusiedler See

Misijo zračnega laserskega skeniranja nacionalnega parka Neusiedler See v okviru projekta SISTEMaPARC je izvedlo podjetje **TopScan** 24. in 25. novembra 2004. V preletu projektiranega območja so zajeli lidarske podatke potrebne za izdelavo DMR-ja in posneli teren z integrirano digitalno mersko kamero za izdelavo digitalnih ortofotov. Istočasno so na terenu izvedli še simultana GPS opazovanja s frekvenco 1 Hz na 4 merskih točkah KT602-79, KT460-79, KT441-78A2 in KT135-109.

### 4.2.1 Merski sistem in planiranje misije ZLS

Merski sistem ALTM<sup>1</sup> 2050 uporabljen v obravnavanem projektu je bil vgrajen v letalo. Njegove glavne komponente oz. senzorji so naštetih spodaj (Preglednica 4-1).

Preglednica 4-1: Strojna oprema merskega sistema podjetja TopScan.

Laserski skener	ALTM 2050, Optech
INS	LTN-90 fibre optic ring gyro, Applanix
GPS sprejemnik	Novatel Millennium
Digitalna kamera	Emerge DSS, 22mpixels

Za načrtovanje leta so pomembne nekatere lastnosti in parametri laserskega skenerja ALTM 2050, ki sem jih povzela po Optech-ovem dokumentu [ALTM 2050 ..., 2002], in karakteristike digitalne merske kamere (Preglednica 4-2).

Preglednica 4-2: Parametri laserskega skenerja ALTM 2050 in digitalne merske kamere – Emerge DSS [Optech], [Laserscannermessung ..., 2005].

Laserski skener ALTM 2050	
Leto izdelave sistema	2002
Teža	103 kg
Največja razdalja R	210 – 2000 m nominalna
Ločljivost razdalje	1 cm
Položajna natančnost	10,5 – 100 cm



Slika 4-3: Merski sistem ALTM 2050 [Optech].

<sup>1</sup> ALTM je kratica za Airborne Laser Terrain Mapper.

Višinska natančnost	15 cm pri višini leta 1200 m 25 cm pri višini leta 2000 m
Tip laserskega razdaljemera	Pulzni laser
Valovna dolžina laserja	1,047 nm
Frekvenca pulzov	50 kHz
Razpršenost laserskega žarka	0,2 mrad
Elektrooptična komponenta	Nihajoče zrcalo
Frekvenca skenerja	25 Hz (sicer 0 – 70 Hz, odvisno od kota skeniranja)
Kot skeniranja (FOV)	0 - ± 20°
Vzorec skeniranja	Cik-cak linija
Št. Registriranih odbojev/pulz	Prvi in zadnji
Merjenje intenzitete	da
<b>Digitalna merska kamera – Emerge DSS</b>	
Velikost digitalne slike	4.092 x 4.077 piksel
Velikost piksla	0,009 mm
Vrsta filtra	»True colors«
Leče	Zeiss Distagon 55,0 mm, 36° FOV
Načrtovana razdalja med dvema dispozicijama	325 m
Kvantizator	16 bit 8 bit
Ločljivost na tleh	0,17 m x 0,17 m 0,16 m x 0,16 m

Pri planiranju misije ZLS se ob upoštevanju lastnosti merskega sistema vnaprej določi še nekatere parametre, kot so parametri leta letala in drugi (Preglednica 4-3). Le-te se med zajemom kontrolira na prenosnem računalniku s pomočjo programa ALTM-NAV Flight Managagement in na zaslonu, ki izrisuje pot leta, ter se jih skuša čim bolj upoštevati.

Preglednica 4-3: Parametri planiranja leta, uporabljenega merskega sistema in ostali parametri [Laserscannermessung ..., 2005].

<b>Parametri leta</b>	
Načrtovana hitrost leta	65 m/s ~ 126 Kn
Načrtovana višina leta	1000 m
Načrtovana razdalja med pasovi	450 m
<b>Ostali načrtovani parametri</b>	
Načrtovana širina pasu	725 m
Načrtovan preklop pasov	275 m (30%)
Srednja gostota laserskih točk	1 točka / m <sup>2</sup>
Ločljivost digitalnih slik na tleh	0,25 m x 0,25 m

ALTM 2050 je pulzni razdaljemer z nihajočim zrcalom, ki omogoča spreminjanje frekvence



laserja, kota skeniranja in frekvence skeniranja. Dodatno se lahko spreminjajo še parametri leta, kot so višina leta nad tlemi, hitrost leta, razdalja med linijami leta in njihova dolžina. Vsi skupaj vplivajo na vzorec skeniranja, ki ima določeno **porazdelitev** lidarskih točk na površju in **gostoto**, in ga lahko računsko opišemo z naslednjimi parametri.

Glede na zgoraj zapisane podatke (Preglednica 4-3), kjer je višina leta  $h = 1000$  m in največji kot skenerja  $\Theta = 40^\circ$ , lahko izračunam **širino skeniranega pasu  $SW$** :

$$SW = 2 * h * \tan\left(\frac{\Theta}{2}\right) \quad (4-1)$$

$SW \approx 728$  m.

Ker je razdalja med sosednjima vzporednima linijama leta 450 m, je dosežen preklop med pasovi približno 38 % (načrtovan preklop je 30 %).

Glede na dano višino leta letala  $h$ , je **premer  $A_L$  odtisa laserskega** žarka (angl. laser footprint) na površju odvisen predvsem od divergence laserskega žarka  $\beta = 0,2$  mrad in trenutnega kota skenerja  $\Theta_{inst}$ , ki se spreminja v intervalu  $[0, \pm 20^\circ]$ . Za raven teren in spremenljiv kot skeniranja velja enačba [Baltsavias, 1999b]:

$$A_{L\_inst} = \frac{h}{\cos^2(\Theta_{inst})} * \beta \quad (4-2)$$

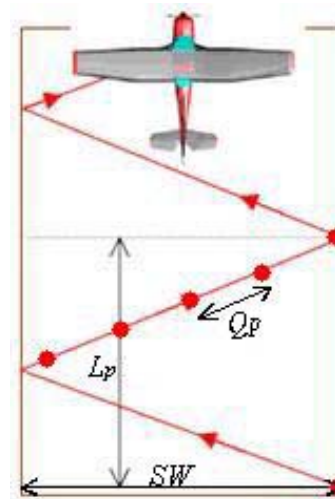
je vrednosti premera odtisa  $A_{L\_inst} \in [20 \text{ cm}, 23 \text{ cm}]$ , kjer je  $\Theta_{inst} \in [0, \pm 20^\circ]$ .

**Število točk  $N$  v eni periodi skeniranja** je enako razmerju frekvenc laserja  $F$  in skenerja  $f_{sc}$ :

$$N = \frac{F}{f_{sc}} \quad (4-3)$$

$$N = \frac{50.000 \text{ [Hz]}}{25 \text{ [Hz]}} = 2.000 \text{ točk.}$$

**Razdalja med točkama v smeri leta** (angl. across-track spacing), ki imata enako fazo skeniranja, je odvisna od hitrosti leta  $v$  in frekvence skenerja  $f_{sc}$ :



Slika 4-4: Geometrija vzorca laserskega skeniranja z nihajočim zrcalom [Gajski, 2004]

$$L_p = \frac{v}{f_{sc}} \quad (4-4)$$

$$L_p = \frac{65 \text{ m/s}}{25 \text{ Hz}} = 2,6 \text{ m.}$$

**Razdalja med sosednjima točkama zajetima prečno na smer leta (angl. along-track spacing) je:**

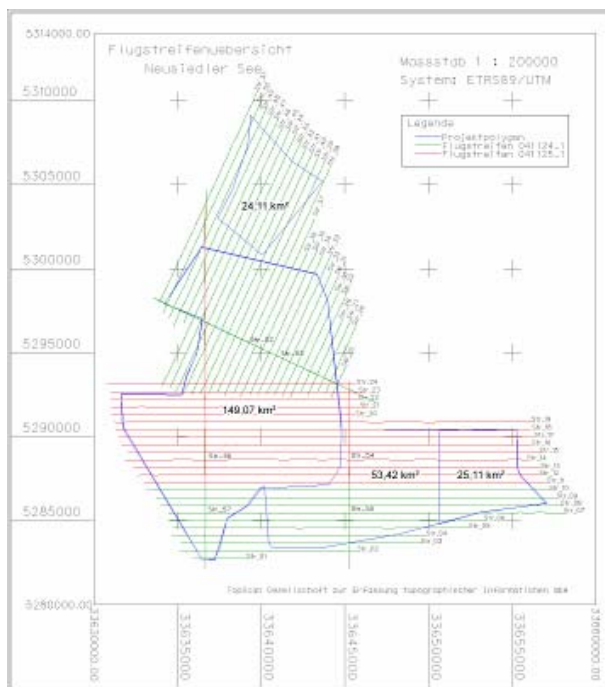
$$Q_p = 2 * \frac{SW}{N} \quad (4-5)$$

$$Q_p = 2 * \frac{727,9 \text{ m}}{2.000 \text{ točt}} = 0,72 \text{ m.}$$

#### 4.2.2 Zajeti podatki

Število vseh zajetih točk je 1.050.664.795: od tega je 51% točk registriranih kot zadnji odboj (angl. last echo) in 49% točk kot prvi odboj (angl. first echo). Dosežena je gostota **1,5 točk na m<sup>2</sup>**, ki pomembno vpliva na natančnosti izdelkov ZLS, v tem primeru digitalnega modela terena.

Skupno je bilo posnetih **57 pasov** (od tega 6 prečnih), ki pokrivajo območje 340 km<sup>2</sup> in so na sliki (Slika 4-5) prikazani kot rdeče črte (zajeti prvega dne 24.11) in zelene črte (zajeti drugega dne 25.11). Zaradi kontrole snemanja in za natančnejše povezovanja lidarskih pasov v enoten model, je določena zahteva po snemanju prečnih pasov na obeh koncih bloka vzporednih pasov. Vendar zaradi tehničnih omejitev pri letenju letala na severnem in vzhodnem delu območja projekta (oz. bloka) manjkata dva prečna pasova.



Slika 4-5: Pregled snemalnih pasov in mej projekta Neusiedler See [Attwenger, 2005].

#### 4.2.3 Obdelava zajetih podatkov v podjetju TopScan

Obdelavo podatkov zajetih v misiji ZLS je podjetje TopScan izvedlo v naslednjih korakih:

1. Priprava podatkov.
2. Analiza GPS signala (DGPS) sprejetega na roverju (GPS antena na letalu) in terenski referenčni postaji ter njuna obdelava po kinematični GPS metodi za rekonstrukcijo poti leta (trajektorije).
3. Preverjanje kalibracije sistema. Izvedena je bila z empirično analizo natančnosti, v kateri so uporabili podatke prečnih pasov in oslonilnih ploskev. Relativna (notranja) natančnost je bila ocenjena s primerjavo prečnih in vzdolžnih pasov, absolutna pa s primerjavo lidarskih točk in danih (oz. merjenih) oslonilnih ploskev.
4. Izračun kartezičnih koordinat lidarskih točk. V t.i. postopku grobega georeferenciranja (direktnega orientiranja), se združijo podatki laserskega skenerja in integriranega sistema DGPS/INS ter izračunajo 3D koordinate lidarskih točk v referenčnem koordinatnem sistemu, pritrjenem na zemljo. Pri izračunu se upoštevajo še podatki kalibracije (enačba (3-2)). Položaj laserskih točk je bil izračunan v WGS84 koordinatnem sistemu in izrisan v UTM projekciji. Višine se nanašajo na elipsoid.
5. Preračun rezultatov v zeleni koordinatni sistem. Končne koordinate so dane v ETRS89 in Gauss-Krüger M34 koordinatnem sistemu.

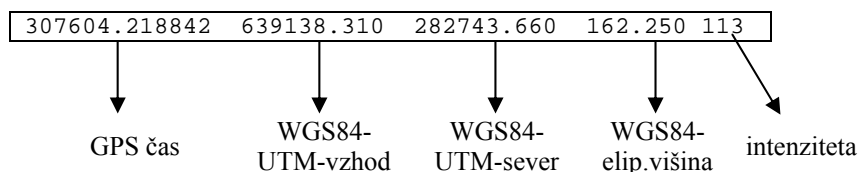
Postopek korakov obdelave je podrobneje zapisan v tehničnem poročilu projekta [Laserscannermessung ..., 2005]

#### 4.2.4 Rezultati obdelave podjetja TopScan

Rezultati, ki jih je pridobilo podjetje TopScan in aprila 2005 predalo Inštitutu za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje na Tehnični Univerzi Dunaj (I.P.F.) za nadaljnjo obdelavo, obsegajo:

- Laserske točke registrirane v obliki zadnjega odboja t.j. "Last-Pulse-Mode"; shranjene v XYZ-ACSII datotekah ločeno po pasovih.
- Laserske točke registrirane v obliki prvega odboja t.j. "First-Pulse-Mode"; shranjene v XYZ-ACSII datotekah ločeno po pasovih.

307604.218802	639138.660	282744.890	162.310	86
307604.218822	639138.490	282744.280	162.270	104



- Pot leta letala in IMU-meritve shranjene v XYZ-ACSII datotekah za vsak dan;

295542.009300	584537.64	306471.70	1116.56	2.566872	3.014899	105.197244	0.458217
295542.014300	584538.07	306471.56	1116.55	2.557656	3.016127	105.180011	0.458211
295542.034300	584539.77	306471.00	1116.54	2.516501	3.030960	105.108669	0.458188

↓                      ↓                      ↓                      ↓                      ↓                      ↓                      ↓                      ↓  
 GPS čas                      WGS84-UTM-vzhod                      WGS84-UTM-sever                      WGS84-elip.višina                      zasuk                      nagib                      smer                      »wander angle«

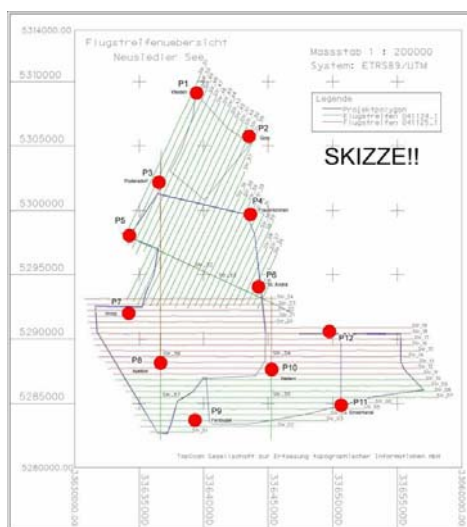
- Grafični pregled ALS pasov (Slika 4-5).
- Digitalne slike v tiff-formatu in tekstovni datoteki (za oba dneva snemanja), v katerih je za vsako digitalno sliko zapisan odgovarjajoč čas dispozicije (t.i. angl. GPS-Second of week).
- Tehnično poročilo projekta [Laserscannermessung ..., 2005]

Ti rezultati obdelave meritev ZLS so dani v **WGS84** (ETRS89) koordinatnem sistemu (projekcija **UTM cona 33**) z elipsoidnimi višinami.

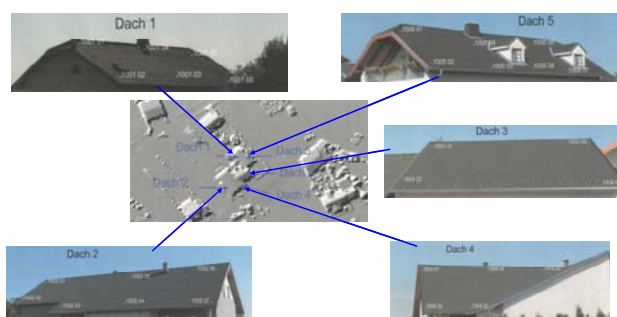
### 4.3 Terenske meritve

Terensko izmero je opravil gradbeni inženir Horvath avgusta 2005. Osnova za izmero je GPS mreža, opazovanja pa pridobljena s tahimetrično metodo, katere pričakovana natančnost je  $\pm 3$  cm. Teoretična razlaga namena terenskih meritev in zahteve za njihovo izvedbo so opisane v poglavju 3.4.2.2.

Tako je bilo na robovih območja obravnavanega projekta določenih 12 mest primernih (glede na pogoje za določitev oslonilnih ploskev) za terenske meritve (Slika 4-6). Znotraj posameznega mesta meritev so na poševnih ravninah (strehah hiš) izmerili tahimetrične točke (Slika 4-7), ki služijo za izračun oslonilnih ploskev. Le-te so potrebne za združitev lidarskih pasov v enoten model in za absolutno orientiranje lidarskih podatkov. Problem je nastopil v jugovzhodnem delu bloka pasov zaradi pomanjkanja zgradb oz. nagnjenih površin. Tako so nagnjene površine nadomestili z dvema horizontalnima ploskvama in dodatno merili višine.



Slika 4-6: Skica s položaji mest oslonilnih meritev (rdeče točke) na območju projekta [Attwenger, 2005].



Slika 4-7: Primer terenskih meritev znotraj oslonilne ploskve 10: tahimetrične točke na strehah hiš in položaj streh hiš na terenu [Attwenger, 2005].

#### 4.4 Obdelava 3D podatkov za izračun digitalnega modela

Na Inštitutu za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje Dunaj (I.P.F.) so TopScan-ove podatke (poglavje 4.2.4) vključili v obdelavo za izračun digitalnih modelov (reliefa in površine). Postopek obdelave, ki je podrobneje opisan v [Attwenger in Chlaupek, 2006] in [Attwenger et.al. 2006], je potekal v naslednjih korakih:

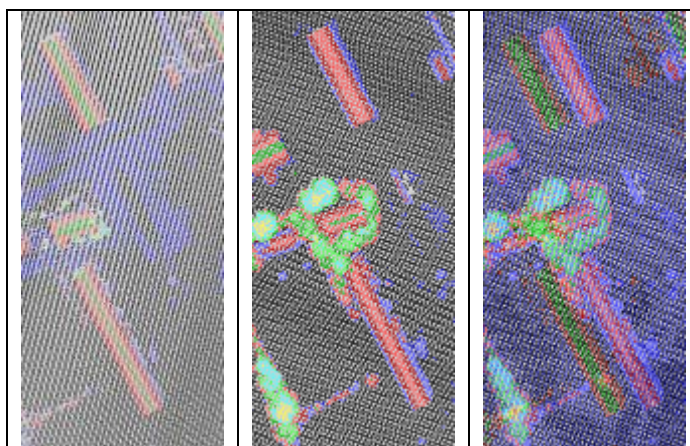
1. Preverjanje kakovosti.
2. Povezava lidarskih pasov v enoten model (nem. Streifenanpassung) s postopkom skrbnega georeferenciranja.

3. Upoštevanje geoidne ondulacije (nem. Anbringen der Geoidundulation).
4. Izračun digitalnega modela površine (DMP).
5. Izračun digitalnega modela reliefa (DMR).
6. Združitev avstrijskega DMR z madžarskim.
7. Transformacija ETRS89 (UTM cona 33) v MGI (BMN).
8. Združitev z DMR-jem iz leta 1999.

Obdelava je potekala v programskem paketu SCOP, ki ga je razvil inštitut I.P.F. na Dunaju skupaj s podjetjem INPHO, v programu ORIENT in ostalih pomožnih programih, prav tako razvitih na inštitutu I.P.F. Dunaj.

#### 4.4.1 Preverjanje kakovosti

S pomočjo (že) razpoložljivih madžarskih lidarskih podatkov, ki se prekrivajo z avstrijskim interesnim območjem, se je izvedla kontrola **absolutne orientacije** lidarskih podatkov podjetja TopScan. Med obema setoma podatkov se je pokazala 17 metrska položajna razlika (Slika 4-8, desno).



Slika 4-8: Barvni prikaz izreza avstrijskih podatkov ZLS (levo), madžarskih podatkov ZLS (sredina) in prekrivanja obeh setov podatkov (desno) [Attwenger, 2005].

V sodelovanju z upravo »Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV)« in univerze »Universität von Westungarn« je bila ugotovljena napaka pri georeferenciranju avstrijskih podatkov (v t.i. »Pseudo-WGS84« koordinatni sistem). Uprava BEV je dobila nalogo izračunati transformacijske parametre (Preglednica 4-4) za transformacijo lidarskih podatkov iz »Pseudo-WGS84« v ETRS89.

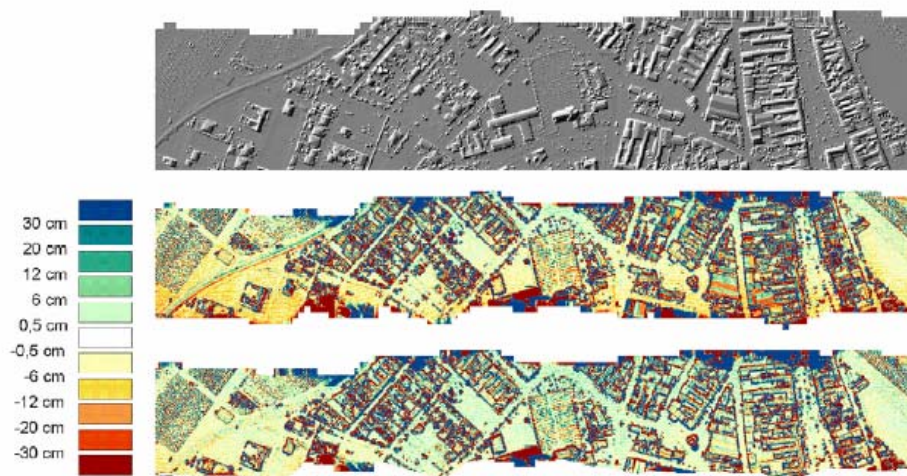
Preglednica 4-4: Transformacijski parametri [Attwenger in Chlaupek, 2006]

Premik dX	-10.51 m
Premik dY	-8.36 m
Premik dZ	4.40 m
Zasuk X	0.00024807°
Zasuk Y	-0.00001158°
Zasuk Z	-0.00004370°
Faktor merila	1.92 ppm

Po transformaciji podatkov v programu TopDM so se le-ti z madžarskimi razlikovali le za nekaj decimetrov. Po finem georeferenciranju avstrijskih podatkov pa je primerjava z madžarskimi podatki (na območju njihovega prekrivanja) pokazala odstopanje 10 cm po višini in 30 cm po položaju.

Z namenom preverjanja notranje natančnosti in medsebojnega ujemanja lidarskih pasov posredovanih iz podjetja TopScan (teorija v poglavju 3.4.1), so se na preklopu sosednjih vzdolžnih pasov, kot tudi na območju prekrivanja vzdolžnih in prečnih pasov, v programu SCOP++ izračunale razlike digitalnih modelov površine (rDMP). Njihova vizualizacija kot GeoTIFF slike omogoča hiter pregled in enostavno preverjanje večjega območja ter tako določitev problematičnih delov.

Na sliki (Slika 4-9, srednja in spodnja slika) je predstavljen izrez iz takšne vizualizacije, kjer močnejše barve (rdeča ali modra) pomenijo večjo višinsko razliko med prekrivajočima se pasovoma 5 in 6. Modro-zeleni odtenki pomenijo pozitivno razliko in rdeče-rumeni odtenki negativno razliko.



Slika 4-9: Izrez senčnega DMP-ja in barvno kodiranih rDMP-jev - iz originalnih in skrbno georeferenciranih podatkov [Attwenger, 2005].

Glede na izrezan senčeni prikaz istega območja iz DMP-ja 5 pasu (Slika 4-9, zgoraj), kjer se vidijo objekti nad terenom, lahko določimo posebno velike položajne razlike pri brežini ceste na zahodu in strehah hiš na vzhodu (Slika 4-9, sredina). Ponekod je položajni zamik dosegel velikost 30 cm, kar ne zadostuje zahtevam po visoki natančnosti digitalnega modela (t.j. za hidrološke analize). Zaradi teh razlik je bilo potrebno izvesti proces skrbnega georeferenciranja (nem. Fine-Georeferenzierung). Rezultat je povečana absolutna in relativna natančnost lidarskih podatkov., kar je vizualno predstavljeno na sliki (Slika 4-9, spodaj).

#### 4.4.2 Skrbno georeferenciranje

Teoretičen opis postopka skrbnega georeferenciranja je zapisan v poglavju 3.4.2 . Za projekt Neusiedler See je bil izračun izveden v koordinatnem sistemu ETRS89/UTM z ortometričnimi višinami s pomočjo programa ORIENT in sicer v naslednjih treh korakih:

1. **Faza SEM:** avtomatsko iskanje možnih veznih ploskev (v posameznem lidarskem pasu). Iskanje ploskev je bilo, zaradi skrajšanja časa procesiranja podatkov, omejeno na določena območja projekta. In sicer najprej na območje prečnih pasov, ki imajo pomembno povezovalno vlogo v bloku podatkov ZLS, in na robna območja okrog in okrog bloka, kjer prečni pasovi manjkajo. Znotraj teh območji se je avtomatsko poiskalo zadostno število nagnjenih ravnin, ki odgovarjajo pogojem: ploskev mora zajemati najmanj 12 originalnih laserskih točk (je dovolj velika) in dovoljena standardna deviacija točk je  $\pm 4$ cm (glej tudi pogoje v poglavju 3.4.2.1). Malenkost večja odstopanja so tolerirana (v primeru dimnika ali mansardnega okna), vendar so točke izključena iz postopka izravnave. Rezultati tega prvega pregleda podatkov so sezname »**normaliziranih**« **kandidatk ploskev** (angl. »normalized« patch-candidate), ki so zapisani neodvisno za vsak lidarski pas.

2. **Faza SPT:** določitev homolognih veznih ploskev (s primerjavo prekrivajočih se pasov). Na podlagi podatkov iz seznama, pridobljenega v prvi fazi (orginalni kandidati za vezne ploskve), se na območju medsebojnega prekrivanja lidarskih pasov določijo kandidati homolognih ploskev (angl. homologous patch-candidate). Originalen kandidat ploskve lahko dobi enega ali več partnerjev (omogočajo povezavo večih pasov na istem položaju) oziroma nobenega.



Rezultat drugega preleta podatkov je nov seznam **homolognih »normaliziranih« kandidatov ploskev** (angl. homologous »normalized« patch-candidates) za vsak pas posebej, ki ima enako strukturo kot seznam prve faze.

3. **Faza CNP**: ročna določitev homolognih oslonilnih ali veznih ploskev.

Zadnja faza služi za **ekstrakcijo oslonilnih ploskev** pridobljenih s terenskimi meritvami, ki omogočajo izboljšanje absolutnega ujemanja pasov. Druga uporaba te faze je **ročna določitev veznih ploskev**, kar je (večkrat) potrebno v primeru zračnega laserskega skeniranja goratih in kmetijskih območij. Za obdelavo lidarskih podatkov projekta Neusiedler See so bile dodatno ročno določene vezne točke (nem. Saatpunkte) na robovih vodnih površin: na jezerski obali (268 točk) nekaterih jezer (Lange Lacke: 78 točk in Zicksee: 147 točk) ter vzdolž vodnih kanalov (105 točk). Le-te določajo horizontalno ravnino z neznano, vendar konstantno višino. Z iskanjem homolognih veznih točk (t.j. homolognih horizontalnih ravnin) lahko izboljšamo horizontalno lego podatkov.

Trije pridobljeni spiski (ali le dva, če združimo SPT in CNP fazo) normaliziranih ploskev na območju prekrivanja pasov služijo kot **vhodni podatek v izravnavo**. Ploskve, ki nimajo partnerjev, so izbrisane oz. se ne upoštevajo. Tri ploskve z različno usmerjenostjo so ekvivalentne eni »fotogrametrični« 3D vezni točki.

Rezultati blokovne izravnave individualnih lidarskih pasov z dodatnimi parametri so izravnani parametri kalibracije, notranje in zunanje orientacije s katerimi ponovno izračunamo 3D koordinate lidarskih točk. Njihova natančnost je sedaj:

- $\pm 0,070\text{m}$  za koordinato X ;
- $\pm 0,073\text{m}$  za koordinato Y ;
- $\pm 0,025\text{m}$  za koordinato Z .

Po izravnavi lidarskih točk je sledilo ponovno preverjanje kakovosti s pomočjo rDMP-ja. Napake oz. premiki med dvema prekrivajočima se pasovoma so bili sedaj precej manjši (Slika 4-9, spodaj). Postopek skrbnega georeferenciranja lahko ponavljamo v več iteracijah, dokler deformacije lidarskih pasov niso odpravljene oz. dokler kontrola kakovosti ni zadovoljiva.

#### 4.4.3 Upoštevanje geoidne ondulacije

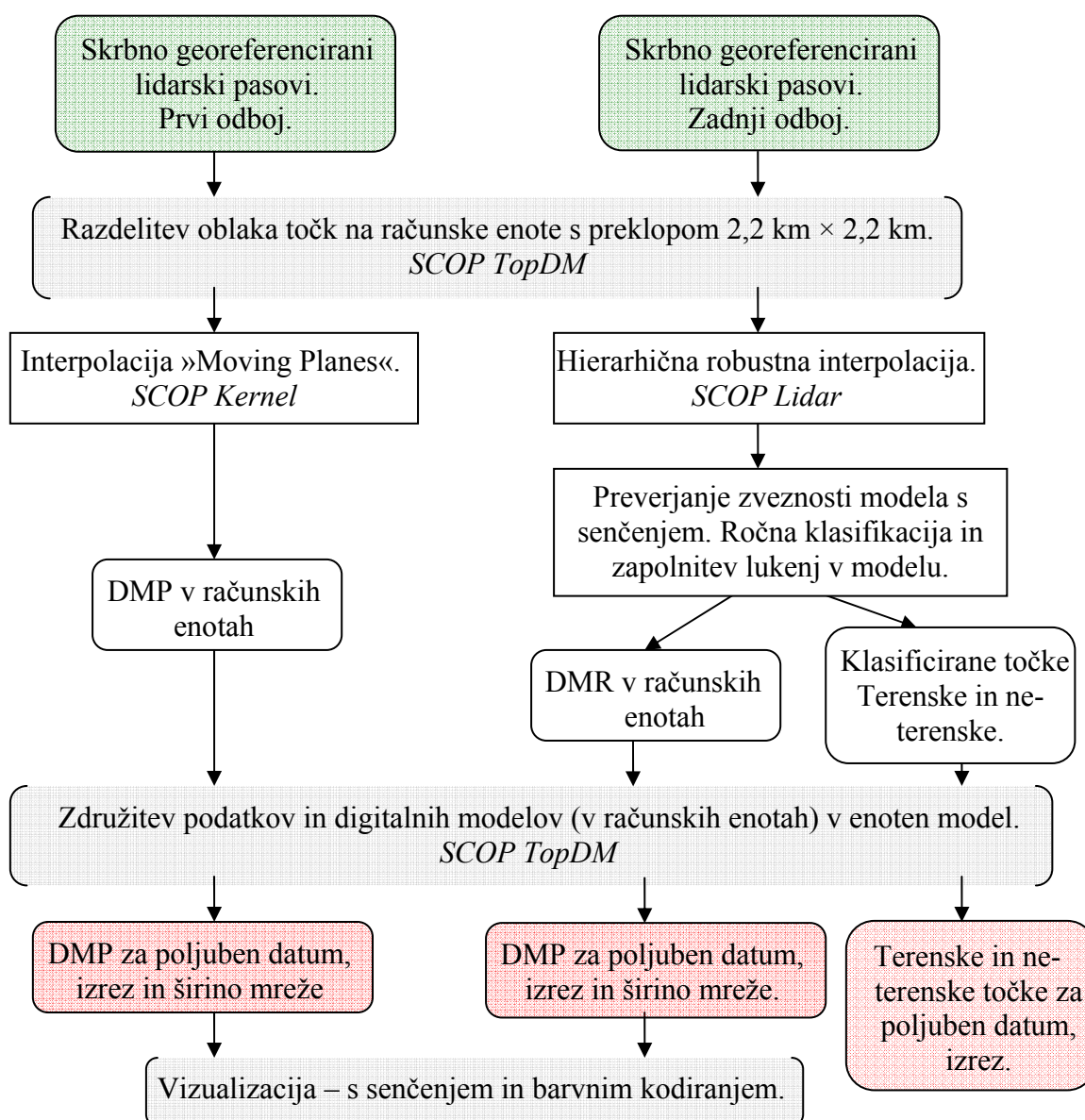
Podatki višin pridobljeni s tehniko ZLS se nanašajo na rotacijski elipsoid ETRS89, kar pa ni uporabno za hidrološke analize, saj se vsi ostali podatki (npr. za trigonometrične točke) nanašajo na ortometrični sistem višin. Pretvorbo višin so izvedli s pomočjo rastrskih podatkov lokalne geoidne ondulacije<sup>1</sup>, ki jih je posredovala uprava »Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen« v obliki ločenih tabel za koordinatni sistem ETRS89 in MGI. V programu SCOP TopDM so tabeli pretvorili v format „SCOP RDH“, ki omogoča nadalje izvedbo transformacije višin v programu „UndulationCorr“ za posamezen skrbno georeferenciran lidarski pas. Naključno vzet vzorec preračunanih ortometričnih višin so preverili s pomočjo dveh točk preciznega nivelmana.

#### 4.4.4 Izračun digitalnih modelov reliefa in površine v SCOP++

Postopek izračuna digitalnih modelov terena in površine je potekal po korakih prikazanih na spodnjem diagramu (Slika 4-10).

---

<sup>1</sup> Višinska razlika med ploskvijo geoida in elipsoida.



Slika 4-10: Diagram korakov obdelave skrbno georeferenciranih podatkov do končnih rezultatov DMR in DMP.

Zaradi velikosti območja projekta in posledično velike količine podatkov, so lidarske podatke podane po pasovih za lažje ter hitrejšo računanje digitalnih modelov razdelili na manjše računske enote velikosti 4 km<sup>2</sup>. Uporabljen je bil program za upravljanje z lidarskimi podatki in izdelki <sup>1</sup> SCOP TopDM (Topografic Data Management), ki so ga razvili na I.P.F.-ju. Dejanska velikost kvadratov je 2,2 km x 2,2 km, saj je na vsaki strani kvadrata dodan pas 100 m za prekrivanje. Le-ta omogoča zvezen potek enotnega digitalnega modela po združitvi posameznih modelov v TopDM-ju.

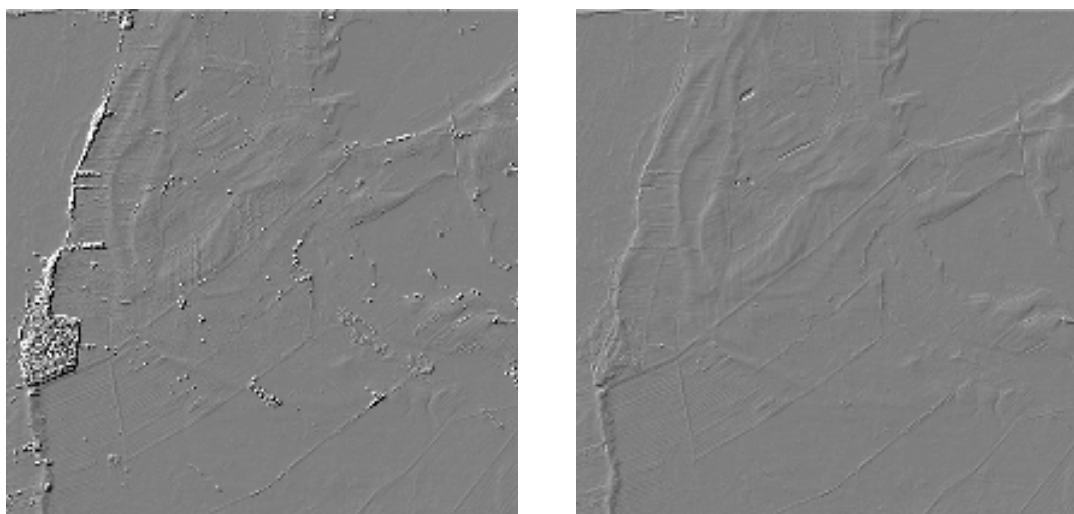
<sup>1</sup> Kot so DMR, DMP in plastnice.

Izračun digitalnega modela reliefa in površine s širino mreže 1 m poteka v I.P.F.-jevem programu SCOP++, ki je modularni programski paket za izdelavo, prikaz in uporabo digitalnih modelov. Več informacij o programu SCOP++ in njegovi uporabi za izdelavo digitalnih modelov je zapisanih v literaturi [Software Manual ..., 2006], [Pfeifer et al., 2001] in [Filtering and Classification ..., 2004]. Teoretično osnovo procesa izdelave DMR pa je opisana v poglavju 3.5.

Za izračun **digitalnega modela površine (DMP)** so bili uporabljeni skrbno-georeferencirani lidarski podatki prvega odboja. Interpolacijska metoda v modulu SCOP Kernel je »Moving Planes«. Tako interpoliran model dobro prikazuje hrapavost površine zaradi vegetacije (Slika 4-11, levo).

**Digitalni model reliefa (DMR)** je bil izračunan s skrbno georeferenciranimi podatki zadnjega odboja, ki jih je bilo potrebno klasificirati v terenske in ne-terenske točke. Klasifikacija in interpolacija DMR-ja sta bili izvedeni večinoma avtomatsko z metodo hierarhične robustne interpolacije (opisane v poglavju 3.5.1 in 3.5.2) implementirane v modul SCOP Lidar (Slika 4-11, desno). In sicer v treh podatkovnih nivojih (angl. data pyramid levels) po načelu »od grobega k finemu« - od grobe interpolacije z izbranimi točkami do fine interpolacije z originalnimi podatki. Za avtomatsko filtracijo in interpolacijo lidarskih podatkov so bili določeni nekateri parametri npr.: za utežno funkcijo, število iteracij, širina pasu okrog DMR-ja za sprejem točk (korak »SortOut«) itd.

Ročna klasifikacija podatkov je bila potrebna na številnih območjih na obrežju jezer, ki so gosto zaraščena s trsjem, saj je tu procent preboja laserskega žarka do tal (penetracije vegetacije) (pre)majhen za avtomatsko klasifikacijo terenskih točk. Na teh območjih in na mestih, kjer stojijo velike zgradbe, so po klasifikaciji nastale podatkovne luknje (nič oz. majhno število terenskih točk), ki onemogočajo interpolacijo detajlnega DMR-ja. Podatkovne luknje so bile v programu SCOP naknadno zapolnjene s pomočjo grobega DMR-ja (večja širina mreže, ki pomeni manjšo ločljivost).



Slika 4-11: Primer digitalnih modelov za eno računsko enoto: DMP in DMR.

#### 4.4.5 Združitev avstrijskega DMR z madžarskim

Ker je cilj projekta SISTEMaPARC ustvariti čezmejno podatkovno bazo, sta bila na koncu avstrijski in madžarski DMR s pomočjo programa TopDM združena v en model. Pogoj je, da sta podana v isti projekciji (UTM, ki se nanaša na ETRS89) in z isto ločljivostjo. Tako je mogoče izvesti mednarodne analize za upravljanje nacionalnega parka in tudi analize tega območja za druga interesna področja. Izdelava homolognega DMP pa zaradi zajema podatkov v različnih letnih časih (avgust in november), kar se odraža v različnem stanju vegetacije, ni bila mogoča [Attwenger in Chlaupek, 2006].

#### 4.4.6 Transformacija ETRS89 (UTM cona 33) v MGI (BMN)

Za uporabo lidarskih podatkov in izračunanega DMR-ja v hidroloških analizah ter za združitev DMR-ja s katastrskimi podatki, se je izvedla transformacija v avstrijski lokalni koordinatni sistem. Transformacijski parametri so bili izračunani v programu »Simtrafo« s pomočjo 227 triangulacijskih točk z danimi koordinatami v ETRS89 in MGI koordinatnem sistemu (sedem parametrična transformacija), ki jih je posredovala BEV. Ker predstavlja geoidna ondulacija na obravnavanem območju (Seewinkel) poševno ravnino, je mogoč direkten prehod iz ortometričnih ETRS89 v ortometrilne MGI koordinate.

#### **4.4.7 Združitev z DMR-jem iz leta 1999**

Že leta 1999 je bilo na tem področju prav tako z metodo laserskega skeniranja posneto manjše območje in leta 2001 izdelan digitalni model reliefa [Horvath, 2001], [Herzig et. al, 2002]. Sedaj so iz takrat klasificiranih terenskih točk ponovno izračunali DMR, zapolnili podatkovne luknje in ga v SCOP TopDM združili z novejšim DMR-jem. Majhne višinske razlike, ki so nastale pri združitvi obeh DMR-jev, so posledica različnega stanja vegetacije zaradi različnih časov zajema (1999: avgust, 2004: november) in različne gostote točk.

## 5 KONTROLA KAKOVOSTI DIGITALNEGA MODELA RELIEFA

Digitalni model reliefa (DMR) je najpomembnejši in najuporabnejši rezultat obdelave podatkov zračnega laserskega skeniranja (ZLS). Za pravilno in učinkovito uporabo DMR-ja pa je potrebno poznati njegovo kakovost, ki je sestavljena iz nekaterih komponent, kot so **preciznost, natančnost in zanesljivost**.

Zunanjo kakovost (angl. exterior quality) t.j. **natančnost** (tudi absolutna natančnost) lahko določimo le z uporabo zunanjih, dodatnih podatkov, ki niso bili in ne smejo biti vključeni v proces izdelave DMR-ja. Njihova natančnost naj bi bila bistveno večja kot natančnost vhodnih lidarskih podatkov za izračun modela. Absolutna natančnost hkrati opisuje vhodne podatke in proces modeliranja, kar omogoča odkrivanje sistematičnih napak v modelu. Izračun absolutne kakovosti DMR-ja v projektu Neusiedler See je izvedla Maria Attwenger (inštitut I.P.F. Dunaj) in sicer na osnovi 82 triangulacijskih točk (podrobnosti so v prilogi Priloga A). O notranji kakovosti (angl. interior quality) ali **preciznosti** govorimo pri izračunu standardne deviacije DMR-ja, ki je ocenjena s pomočjo metode prenosa varianc in kovarianc (angl. error propagation) vhodnih podatkov. Z nadštevilnimi podatki kontroliramo opazovanja in pridobimo podatek o **zanesljivosti** DMR-ja.

Visoka stopnja avtomatizacije procesov obdelave lidarskih podatkov in modeliranja DMR-ja ima poleg mnogih prednosti (npr. doseganje visoke natančnosti, hitrejše procesiranje podatkov) tudi slabost, da dopusti interpolacijo DMR-ja na območju z manj ali nič podatki. Ta območja se pri ZLS pojavijo v primeru majhnega odstotka penetracije laserskega žarka do tal (npr. zaradi goste vegetacije). Ker se DMR uporablja v številnih aplikacijah<sup>1</sup> in pri sprejemanju pomembnih odločitev (npr. določevanju meje poplavnih območji), je potrebno za pravilno in uspešno odločanje poznati kakovost DMR-ja. Uporabnik mora imeti tako na razpolago informacije o njegovi natančnosti in zanesljivosti. Morebitna območja s podatki nizke kakovosti morajo biti jasno določena. Najboljši način informiranja uporabnika o kakovosti DMR-ja so **mere natančnosti** oz. po novejši terminologiji **parametri natančnosti**.

---

<sup>1</sup>Pri izdelavi ortofota, za hidrološke analize, tvorijo bazo GIS etc.

**Gobalni parametri natančnosti** so izračunani z uporabo kontrolnih točk. Slabost je, da veljajo le za določeno mersko tehniko (npr. ZLS, digitalno stereo fotogrametrijo) in zagotavljajo le en parameter za celotno obravnavano področje, kar največkrat ni zadovoljivo. Empirična enačba za izračun globalnega parametra natančnosti pri ZLS je na kratko predstavljena v poglavju 5.1. Za izpeljavo različnih rezultatov iz DMR-ja (npr. izračun volumna, določitev mejne linije pri preučevanju poplavnega območja) potrebujemo prostorski prikaz spreminjanja njegove kakovosti. Zato so bili razviti **lokalni parametri**, ki kakovost opisujejo bolj detajlno (se nanašajo na manjše/lokalne dele DMR-ja). V poglavju 5.2 je podrobneje opisana empirično stohastična metoda izračunavanja in prikazovanja kakovosti DMR-ja za vsako interpolirano točko mreže (angl. **grid point related quality parameters of DTMs**), ki so jo razvili na inštitutu I.P.F. Dunaj. Bolj detajlni prikaz oblikovitosti površja lahko dosežemo, če mreži, ki je rezultat izračuna DMR-ja, dodamo še informacije o geomorfoloških značilnostih površja (npr. lomne linije, padnice). S tem dobimo t.i. hibridni DMR.

Za analizo kakovosti DMR-ja v projektu Neusiedler See sem uporabila slednjo metodo, torej metodo **ocenjevanja parametrov kakovosti DMR za vsako točko mreže**. Rezultati so predstavljeni v poglavju 5.3.

## 5.1 Globalni parametri kakovosti DMR-ja

Globalni parameter, ki empirično ocenjuje natančnost višin DMR-ja izračunanega iz lidarskih podatkov, lahko zapišemo kot [Karel in Kraus, 2006]:

$$\sigma_z [cm] = \pm \left( \frac{6}{\sqrt{n}} + 30 \tan \alpha \right) \quad (5-1)$$

Kjer sta:

$n$  ... gostota točk na kvadratni meter [točke/m<sup>2</sup>];

$\tan(\alpha)$  ... nagib terena;

Konstanti 6 in 30 sta bili določeni empirično z uporabo 22.000 kontrolnih točk v goratem in deloma nagnjenem terenu. Analizirane so bile višinske razlike med temi točkami in DMR-jem.



Z večkratnim ponavljanjem izračuna konstant, sta se njuni vrednosti spreminjali in sta sedaj že zelo stabilni. Kljub temu se jih vsakokrat, ko so na razpolago novi podatki, še izboljšuje [Kraus, 2005]. Višina leta letala ni vključena v enačbo (5-1), kar pomeni, da nima vpliva na natančnost višin lidarskih točk. Vpliva pa na gostoto točk, ki je odvisna še od koraka spreminjanja kota skeniranja in je v ZLS kritičen vplivni faktor. Glede na *a-priori* natančnost modela, ki je določena kot zelena oz. načrtovana natančnost končnega DMR-ja, lahko z enačbo (5-1) vnaprej določimo oz. načrtujemo parametre pomembne pri sami izvedbi misije ZLS. Ti parametri so optimalna višina leta, merski sistem (model skenerja) in največji še sprejemljiv nagib terena.

## 5.2 Lokalni parametri kakovosti DMR-ja

Ena od možnosti za izračun lokalnih mer natančnosti je uporaba zakona o **prenosu varianc in kovarianc**. Pri filtriranju lidarskih podatkov in interpolaciji v mrežo DMR-ja z metodo vsote najmanjših kvadratov se tej natančnosti reče **točnost** (angl. precision) in temelji na vrednostih varianc in kovarianc. Za uporabnika ti algoritmi predstavljajo »črno skrinjico«, saj ne podajajo informacij o vmesnih korakih in vplivih posameznih parametrov na kakovost. Prav tako metoda ni uporabna za že obstoječe DMR-je, saj se mere lahko izračunajo le med samim procesom izdelave DMR-ja.

Kot alternativa in hkrati izboljšava metode, ki temelji na zakonu o prenosu napak, se je razvila **empirično stohastična metoda ocenjevanja parametrov kakovosti DMR za vsako točko mreže**, ki upošteva t.i. pristop »korak za korakom« (angl. step-by-step approach). Namen metode je približati pojem in razumevanje kakovosti DMR-ja uporabniku in ima naslednje lastnosti:

- uporaben je za post-procesiranje kateregakoli že obstoječega DMR-ja,
- je neodvisen od metode interpolacije DMR-ja,
- za izračun mer kakovosti se uporabljajo originalni podatki (pri ZLS so brez že izločenih ne-terenskih točk na npr. drevesih, stavbah),
- parametri kakovosti imajo ločljivost mrežne celice (se nanašajo na točke mreže DMR),

- omogoča izdelavo atraktivnih vizualizacij.

Metoda upošteva vse vplivne faktorje in omogoča detajlno oceno natančnosti. Vhodni podatki v izračunu kakovosti po tej metodi so **originalni lidarski podatki** in iz njih **interpolirani DMR**. Mere kakovosti imajo nazoren pomen (se jih lahko prikaže) in predstavljajo naslednje faktorje, ki se nanašajo na obravnavano mrežno točko:

1. Število in razporeditev sosednjih originalnih točk (poglavje 5.2.1).
2. Razdaljo originalnih točk do točke mreže (poglavje 5.2.1).
3. Ukrivljenost terena v bližini točke mreže (poglavje 5.2.2).
4. Natančnost višin originalnih točk (poglavje 5.2.3).

Ti faktorji služijo kot **vhodni podatek** v preprosto interpolacijsko metodo, s katero (končno) določimo **natančnosti posamezne mrežne točke** torej DMR-ja. Pojem »natančnost« se v tem primeru nanaša na **relativno** (notranjo) natančnost.

### 5.2.1 Razporeditev originalnih točk

Ker je interpolacija DMR-ja izvedena na osnovi originalnih lidarskih točk, je natančnost mreže odvisna od:

- natančnosti in **gostote** originalnih točk,
- **razdalje** med individualno točko mreže in bližnjimi originalnimi točkami.

Obe količini služita kot meri za zanesljivost DMR.

Iz razporeditve originalnih točk se izpelje model gostote. Preko obravnavanega območja se položi kvadratno mrežo z velikostjo celice  $A$ , ki je ponavadi večja od celice mreže DMR. Če je  $n_i$  število točk znotraj ploskve  $A$ , je gostota točk  $\bar{n}_i = n_i / A$

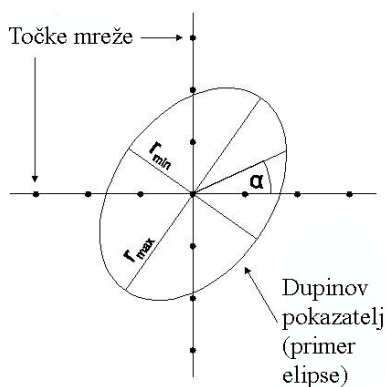
Težje je modelirati razporeditev originalnih točk. Za izračun razdalje med originalnimi in mrežno točko ter za izračun vpliva originalnih točk na višino mrežne točke se uporablja funkcija Chamfer [Borgefors, 1986, cit. po Karel in Kraus, 2006]. Funkcija učinkovito pospeši izmero najmanjše razdalje  $s_m$  med vsako mrežno točko in njej najbližjo originalno točko, ki naj bi bila čim krajša. V nasprotnem primeru (velika  $s_m$ ) odraža prisotnost lukenj v originalnih podatkih. Le-te lahko nastanjen v pasu manjkajočega preklopa lidarskih pasov ali

na območju goste vegetacije in velikih stavb, kjer so bile točke v procesu robustne filtracije izločene. Ne glede na večje vrzeli v podatkih lahko zmogljivi računalniški programi izračunajo DMR brez lukenj. In čeprav številne aplikacije, npr. modeliranje mejnih linij poplavnih območji, zahtevajo zaprt DMR (brez lukenj), je rezultat neuporaben, če mejna linija leži na območju brez podatkov. V tem primeru se ta del linije uporabniku ne sme posredovati. Tako z določitvijo mejne vrednosti za najmanjšo razdaljo  $s_m$  identificiramo območja DMR brez originalnih podatkov in jih (torej točke mreže) klasificiramo kot neuporabna, kar je zelo pomemben podatek za uporabnike DMR-ja.

### 5.2.2 Ukrivljenost terena

Parameter ukrivljenosti DMR  $1/r_{ai}$  dobro predstavlja geomorfologijo terena. Njegova velikost na točkah mreže se spreminja glede na poljubno smer v XY-ravnini in ima velik vpliv na izračun kakovosti DMR. Glede na ukrivljenost terena na posamezni točki mreže se okoliškim originalnim točkam dodeli utež (enačba (5-6)). S pomočjo obstoječega DMR lahko ukrivljenost izračunamo na dva načina. Podrobneje je teorija na to temo zapisana v literaturi [Briese, 2004] in [Gajski, 2004].

- a) Iz točke mreže v smeri na sosednjo originalno točko. Najprej se na vsaki točki mreže izračuna ukrivljenost vzdolž linij mreže, kjer v primeru hibridnega DMR upoštevamo še preseke z lomnimi linijami. Iz teh vrednosti se izpelje minimalno in maksimalno ukrivljenost terena v vsaki točki mreže DMR (mala in velika polos elipse, Slika 5-1). Nazadnje z uporabo Dupin-ovega pokazatelja izračunamo ukrivljenost oziroma radij ukrivljenosti  $r_{ai}$  v poljubni smeri  $\alpha_i$ .



Kjer so:

$$\text{Minimalna ukrivljenost} = \frac{1}{r_{\max}}$$

$$\text{Maksimalna ukrivljenost} = \frac{1}{r_{\min}}$$

$$\text{Srednja ukrivljenost} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_{\min}} + \frac{1}{r_{\max}} \right)$$

Slika 5-1: Minimalna, maksimalna ukrivljenosti ter ukrivljenosti v poljubni smeri na točki mreže [Kraus, 2005].

b) Iz sosednje originalne točke v smeri na točko mreže. Radij ukrivljenosti na določeni originalni točki v smeri oddaljene mrežne točke se izračuna z interpolacijo vrednosti iz štirih okoliških točk mreže odgovarjajoče mrežne celice.

### 5.2.3 Natančnost višin originalnih terenskih točk (RMSE)

Za izpeljavo natančnosti višin točk mreže je vsekakor potrebno poznati **natančnost višin originalnih točk**, s katerimi je bil DMR izračunan. Ne glede na kompleksnost funkcionalnega modela uporabljenega za izdelavo DMR, se lahko za oceno natančnosti meritev (t.j. originalnih točk) uporabi preprosto in lahko razumljivo interpolacijsko metodo. Če izberemo metodo premikajočih najmanjših kvadratov (angl. moving least squares) s stopnjo polinoma 1, potem za višino ( $Z_G$ ) na točki mreže  $G$  zapišemo enačbo nagnjene ravnine kot:

$$Z_G = a_0 + a_1X + a_2Y \quad (5-2)$$

Enačbo (5-2) poenostavimo z izbiro izhodišča koordinatnega sistema v točki mreže  $G$ :

$$Z_G = a_0 \quad (5-3)$$

Sedaj koeficiente  $a_0$ ,  $a_1$ , in  $a_2$  izračunamo v izravnavi po MNK z uporabo originalnih točk v bližini točke mreže  $G$  in enačbe opazovanj zapišemo kot:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & Y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_n & Y_n \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

$$v = A * x - 1 \quad (5-5)$$

**a-priori uteži opazovanj** (uteži za originalne točke) v zgornjih enačbah izravnave so:

$$p_i = \frac{1}{1 + s_i^2 / r_{ai}^2} \quad (5-6)$$

Kjer sta:

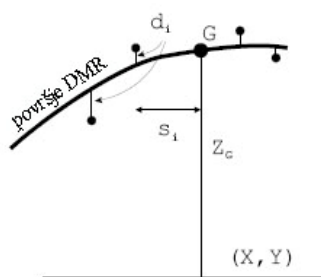
$s_i$  ... razdalja točka mreže – originalna točka (Slika 5-2) [Karel in Kraus, 2006];

$r_{ai}$  ... radij ukrivljenosti DMR na originalni točki v smeri  $\alpha_i$  proti točki mreže  $G$ .

Iz enačbe (5-6) je razvidno, da imajo originalne točke, ki ležijo bližje interpolirani točki mreže (manjša razdalja  $s_i$ ) in/ali imajo večji radij ukrivljenosti (večji radij  $r_{ai}$ ), večji vpliv na rezultat (večjo utež  $p_i$ ). Glede na velikost izračunane uteži  $p_i$  in z določitvijo njene mejne vrednosti (angl. threshold) lahko omejimo izbor originalnih točk vključenih v interpolacijo. Dodatno lahko pri izboru originalnih točk upoštevamo še morebitne lomne linije (angl. break lines), ki služijo kot pregrada – omejujejo območje originalnih točk za izračun višine točke mreže. Na ta način sta upoštevani gostota in razporeditev originalnih točk v okolici individualne točke mreže, opisani v poglavju 5.2.1. Za te izbrane in v izravnavo vključene originalne točke izračunamo uteži, ki jih zapišemo v diagonalno matriko  $P_{ii}$ . Po teoriji izravnave vsote najmanjših kvadratov je **ocena variance opazovanj**  $\hat{\sigma}_o^2$  dana z:

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{v^T P_{ii} v}{n - u} \quad (5-7)$$

Vektor ostankov ( $v$ ) (enačba (5-7)), ki ga izračunamo v izravnavi vsote najmanjših kvadratov za nagnjeno ravnino, zamenjamo z vektorjem **razlik višin**  $d_i$  (Slika 5-2) med originalnimi točkami in površino DMR, ki ga ocenjujemo. Ker so razlike  $d_i$  so odvisne od izbranega načina interpolacije DMR in uporabljene metode filtracije točk, bolje opišejo višinske napake originalnih točk glede na DMR kot ostanki  $v_i$ . Razlike so izračunane le za točke vključene v interpolacijo DMR, torej brez že izločenih ne-terenskih točk na stavbah, drevesih, grmovju, itd.



Slika 5-2: Razlike višin  $d_i$  med površjem DMR in originalnimi točkami [Kraus, 2005].

Referenčna standardna deviacija izpeljana iz razlik  $d_i$  se izračuna kot (primerjaj z enačbo (5-8)):

$$\hat{\sigma}_{0,d} = \sqrt{\frac{d^T P_{ii} d}{n - u}} \quad (5-8)$$

Kjer so:

$d$  ... vektor razlik (Slika 5-2);

$P_{ll}$  ... diagonalna matrika uteži (enačba (5-6));

$n$  ... število originalnih točk, uporabljenih v izravnavi;

$u$  ... število neznank, v tem primeru je  $u = 0$ .

Enačbo (5-8) zapišemo tudi kot:

$$RMSE = \pm \sqrt{\frac{\Sigma ddp}{\Sigma p}} \quad (5-9)$$

Referenčna standardna deviacija opazovanj  $\hat{\sigma}_{0,d}$  oz.  $RMSE$  (angl. Root Mean Square Error), ki je izračunana in tako različna za vsako točko mreže, mora biti večja od odločene mejne vrednosti. Le-ta je dana s *sigma a-priori* mejno natančnostjo originalnih točk, ki je ocenjena glede na specifikacije merskega sistema uporabljenega pri zajemu lidarskih podatkov in metode izračuna 3D koordinat. Z visoko cenjenim (izpopolnjenim) sistemom in z naprednim georeferenciranjem [Kager, 2004] lahko dosežemo natančnost  $\pm 5$  cm.

#### 5.2.4 Kakovost modela DMR

Po ocenitvijo referenčne standardne deviacije  $\hat{\sigma}_{0,d}$  lahko nadaljujemo izračun za določitev natančnosti višine točke mreže  $G$ , ki jo označimo z  $\hat{\sigma}_{DMR}$  in sledi iz:

$$A^T P_{ll} A = \begin{bmatrix} \Sigma p & \Sigma pX & \Sigma pY \\ \Sigma pX & \Sigma pX^2 & \Sigma pXY \\ \Sigma pY & \Sigma pXY & \Sigma pY^2 \end{bmatrix} = N \quad (5-10)$$

a-posteriori utežni koeficient za neznanke  $a_0$  in z utežmi  $p$  (enačba (5-6)) je:

$$q_{a0} = \frac{\begin{vmatrix} \Sigma pX^2 & \Sigma pXY \\ \Sigma pXY & \Sigma pY^2 \end{vmatrix}}{|N|} \quad (5-11)$$

Končno je **natančnost višine terena  $\hat{\sigma}_{DMR}$  na točki mreže  $G$**  izračunana kot:

$$\hat{\sigma}_{DMR} = \sigma_{0,d} \sqrt{q_{a0}} \quad (5-12)$$

Vrednost utežnega koeficienta  $q_{a0}$  se v prostoru spreminjanja v odvisnosti od naslednjih faktorjev:

- Ukrivljenosti DMR  $r_{ai}$  preko uteži  $p_i$ .
- Razporeditve originalnih točk in razdalje  $s_i$  med njimi in odgovarjajočo točko mreže preko uteži  $p_i$  in njihovih koordinat  $X, Y$  v enačbi (5-10) in (5-11).
- Števila originalnih točk, ki so izbrane glede na velikost uteži, preko vsot v enačbah (5-10) in (5-11).

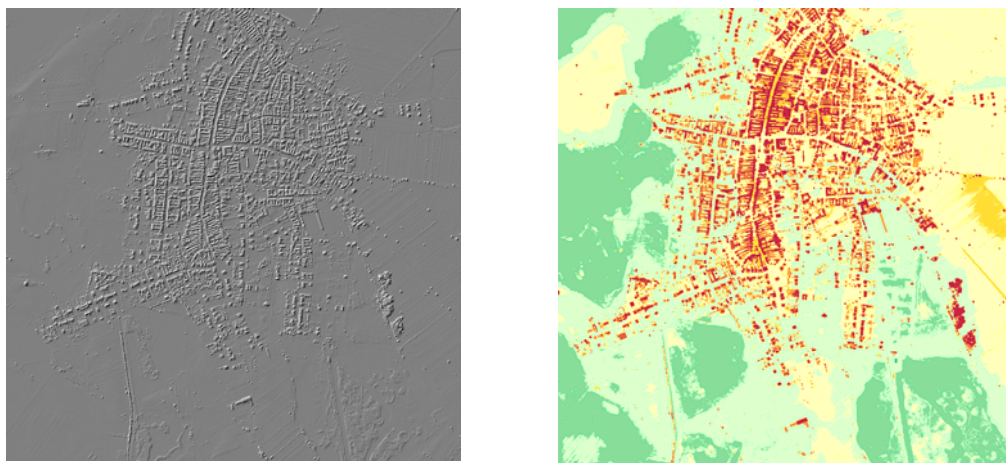
Če je njegova vrednost

1.  $q_{a0} = 1$ , je natančnost višin točk mreže DMR enaka natančnosti originalnih točk v okolici, ki je izražena z referenčno standardno deviacijo  $\hat{\sigma}_{0,d}$ .
2.  $q_{a0} > 1$ , je  $\hat{\sigma}_{DMR}$  slabša kot višinska natančnost originalnih točk.
3.  $q_{a0} < 1$ , je  $\hat{\sigma}_{DMR}$  **boljša** kot višinska natančnost originalnih točk, kar je naš cilj.

### 5.3 Lokalni parametri kakovosti DMR-ja v projektu Neusiedler See

DMR na območju nacionalnega parka Neusiedler See je bil izračunan iz skrbno georeferenciranih lidarskih podatkov z metodo hierarhične robustne interpolacije (poglavje 3.5); najprej za posamezne manjše računske enote  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ , ki so jih kasneje združili v enoten DMR. Izmed računskih enot sem za analizo kakovosti DMR izbrala pet računskih enot, ki vsebujejo različne pojave na terenu. Le-ti so vidni na senčenem prikazu DMP (Slika 5-3, levo). Glede na prevladujoči tip pojava znotraj kvadratnega območja sem jih poimenovala: *Trsje, Naselje, Vinograd, Polje* in *Gozd*.

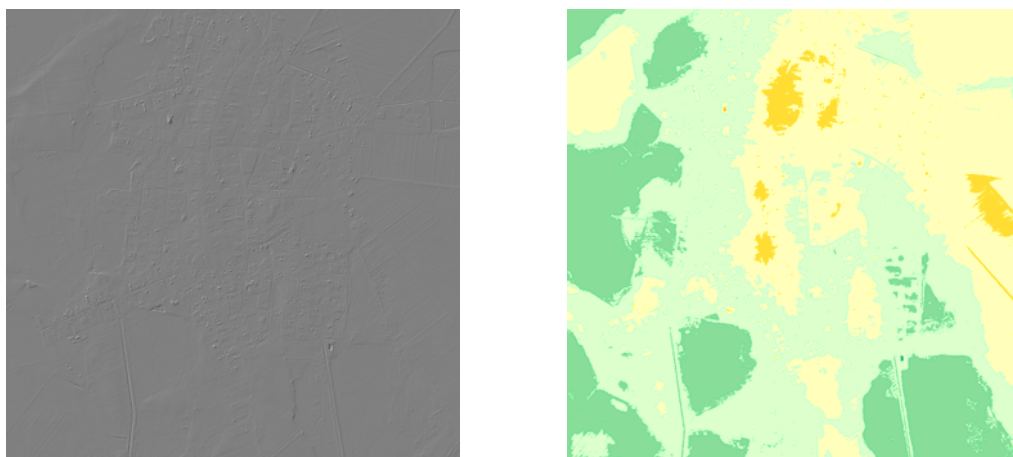
S primerjavo teh območji sem želela preučiti kakovosti izračunanega DMR, glede na različne pojave na terenu. Teren na vseh območjih je relativno raven.



Slika 5-3: Primer senčenega prikaza DMP in barvno kodiranih višin DMP istega območja – *Naselje*.

Podatki, ki jih potrebujem za analizo DMR-ja, zajemajo originalne točk (Slika 5-5, desno) in že izračunane DMR (Slika 5-4) z velikostjo mrežne celice 1 m in so dani v projekciji UTM15. Višine se nanašajo na lokalni geoid.





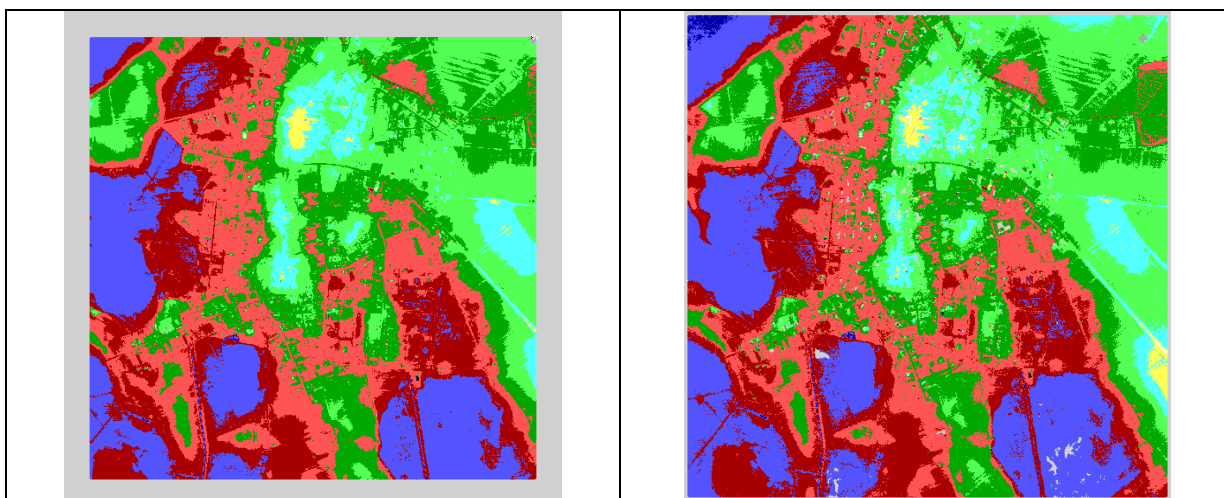
Slika 5-4: Primer senčenega prikaza DMR in barvno kodiranih višin DMR istega območja – *Naselje*.

Kakovost DMR na izbranih območja sem ocenjevanja po metodi opisani v poglavju 5.2. Najprej sem izračunala vrednosti lokalnih parametrov (program sigmaDTM.exe), jih vizualizirala s prilagojeno barvno lestvico (program SCOP++) in jih nazadnje (v programskem paketu Matlab) primerjala med sabo glede na različna območja oz. pojave (trsje, naselje, vinograd, polje in gozd). Uporabo modularnega programa SCOP++ doma so mi omogočili na I.P.F (Priloga G).

### 5.3.1 Izračun vrednosti lokalnih parametrov v programu sigmaDTM.exe

Program sigmaDTM.exe so razvili na inštitutu I.P.F. Dunaj na podlagi teorije, ki sem jo povzela v poglavju 5.2 in je podrobneje opisna v literaturi [Karel in Kraus, 2006]. Ob zagonu programa se izpiše uvodno besedilo z opisom parametrov, ki jih je potrebno nastaviti ali se jih lahko izbere, in s kratkimi navodili za uporabo programa (Priloga B)

Vhodni podatek v programu sta datoteki \*.dtm s točkami mreže DMR in ascii datoteka \*.xyz z originalnimi terenskimi točkami. Območje terenskih točk ima na vseh straneh 100 metrski pas za preklap med računskimi enotami, ki pri izračunu enotnega modela omogoča zvezen prehod površine DMR. Na sliki barvno kodiranih višin terenskih točk (Slika 5-5, desno) so vidne vrzeli podatkov na mestih večjih stavb in goste vegetacije, medtem ko so pri DMR (Slika 5-5, levo) te vrzeli zapolnjene z interpoliranimi točkami mreže.



Slika 5-5: Primer v programu GVE barvno kodiranih višin vhodnih podatkov: točke mreže in originalne terenske točke.

Glede na oblikovitost terena, ki je podobna na vseh petih obravnavanih območjih, sem parametre v programu nastavila kot sledijo (Priloga C). V okolici vsake točke mreže se v kvadrantih poišče po 3 originalne točke (skupaj 12 originalnih točk na eno točko mreže), kar zagotavlja dobro prostorsko razporeditev originalnih točk okrog točke mreže. Največja glavna ukrivljenost terena (angl. maximum main curvature) se računa na originalni točki v smeri proti točki mreže. Sigma a-priori za 3D koordinate lidarskih točk je 5 cm (relativna natančnost), saj je bil uporabljen visoko natančen merski sistem ALTM2050 in so bile lidarske točke izračunane s postopkom skrbnega georeferenciranja. Ker na terenu ni večjih stavb ali sklenjene površine goste vegetacije, je mejna vrednosti maksimalne razdalje  $s_m$  med originalno točko in točko mreže  $5^1$  m ( $5 \cdot$  širina DMR celice). Širina mreže izhodnih modelov je 1 m (kot pri vhodnem DMR). Podatkov o lomnih linijah ni.

Za vsako izbrano območje se je izračunalo pet modelov, ki vsebujejo vrednosti lokalnih parametrov kakovosti za vsako točko mreže obravnavanega DMR:

1. Model minimalnih razdalj  $s_{mi}$  med točko mreže in najbližjo originalno terensko točko.
2. Model največje glavne ukrivljenosti.
3. Model natančnosti višin originalnih točk  $\sigma_{0,d}$ .
4. Model kofaktorjev višin nagnjenih ravnin (ali utežnih koeficientov).
5. **Model natančnosti višin točk mreže  $\hat{\sigma}_{DTM}$ .**

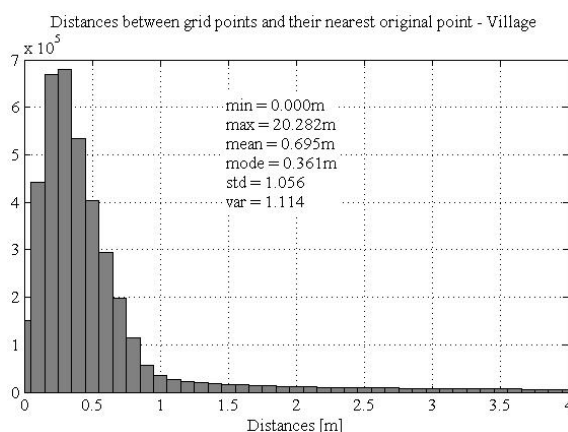
<sup>1</sup> Sicer je izhodiščna vrednost nastavljena na 7 m.

### 5.3.2 Vizualizacija rezultatov

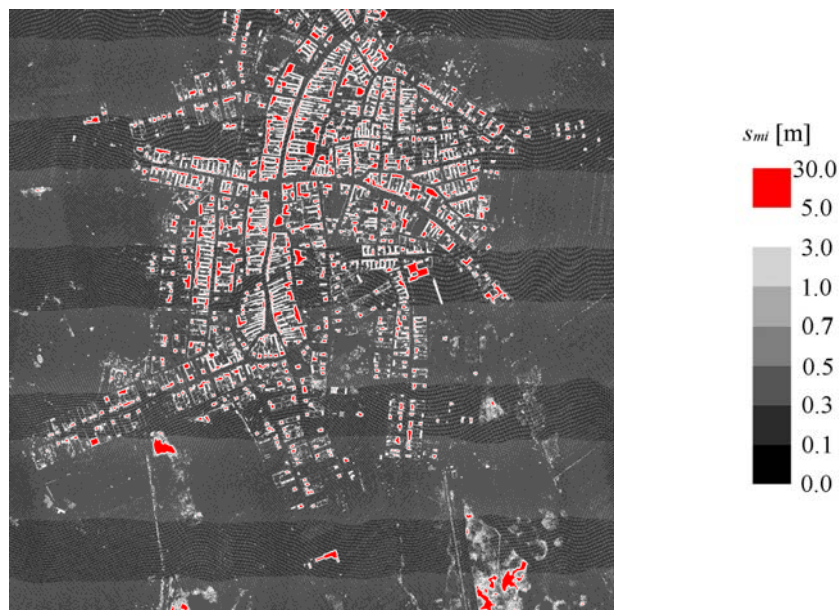
Kot že zapisano, morajo imeti informacije o kakovosti DMR preprosto in nazorno predstavitev, da je razumljiva vsakemu uporabniku. V nadaljevanju so v skladu s teorijo (poglavje 5.2) predstavljeni rezultati empirično stohastičnega pristopa. Format modelov \*.dtm omogoča njihov vnos in barvni prikaz v programu SCOP. Barvna lestvica posameznega modela je enaka za vsa obravnavana območja in sem jo določila glede na histogram vrednosti posameznega parametra. Histograme in statistične vrednosti parametrov (minimum, maksimum, povprečje, najpogostejša vrednost, standardna deviacija in varianca) sem prikazala oz. izračunala s pomočjo programskega paketa Matlab.

Za primer so tu s slikami in histogrami predstavljeni le rezultati, ki se nanašajo na območje Naselje, ostali rezultati pa se nahajajo v prilogi (Priloga D).

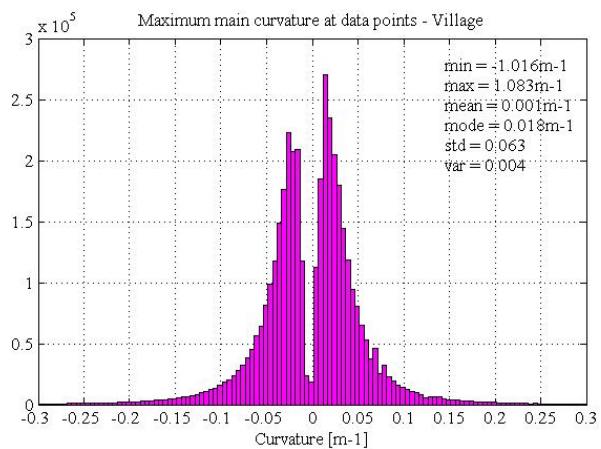
Z uporabo funkcije Chamfer je bila izračunana **najmanjša razdalja** med vsako točko mreže do njej najbližje originalne točke. Za točke mreže, ki so na slikah modela označena rdeče, je ta razdalja večja od petkratne velikosti mrežne celice DTM, torej večja od 5 m. Tako so vidna območja brez podatkov, ki so neuporabna in na katera moramo opozoriti uporabnika. V mojem primeru se pojavljajo na mestih zgradb (*Naselje*, Slika 5-7) in goste vegetacije (*Trsje*, *Gozd*) zaradi eliminacije točk v procesu računanja DMR.



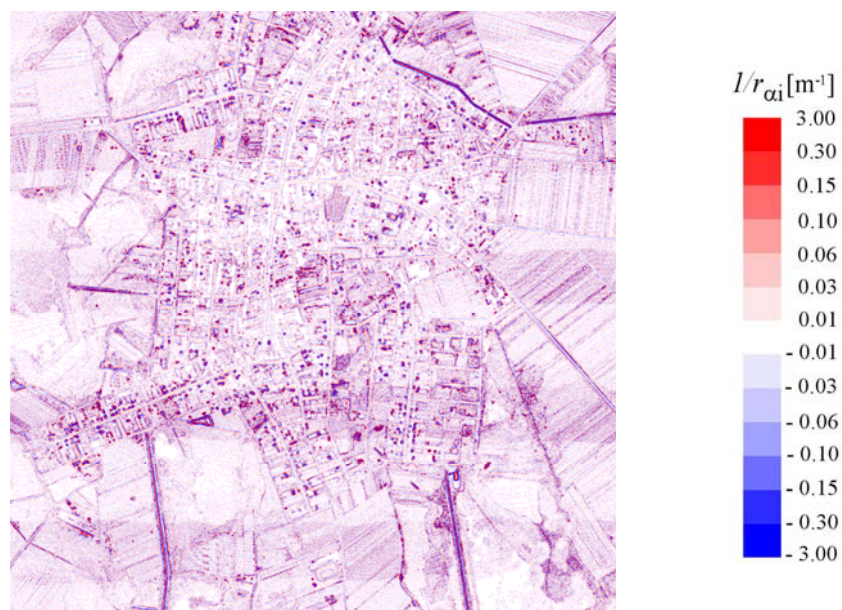
Slika 5-6: Primer histograma za parameter najmanjša razdalja.

Slika 5-7: Primer barvno kodiranega modela najmanjših razdalj  $S_{mi}$ .

Vrednosti modela **največje glavne ukrivljenosti** za vsako točko mreže (angl. the maximum main curvature at each grid point) so bile izračunane iz originalne točke v smeri na točko mreže. Vidne so drobne karakteristike reliefa, kot na primer bankine cest, nizka vegetacija, jarki, smer oranja na poljih, položaj brajd, obodi stavb, itd. Negativne vrednosti (rdeči odtenki) pomenijo relativno višje objekte (DMR gre navzgor) in obratno pomenijo pozitivne vrednosti (modri odtenki) relativno nižje objekte (DMR gre navzdol).



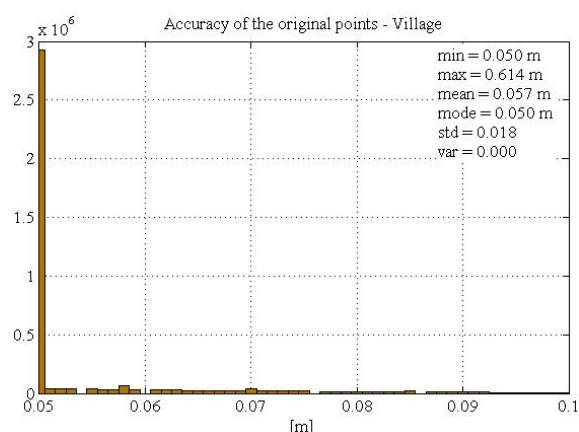
Slika 5-8: Primer histograma za parameter največja glavna ukrivljenost.



Slika 5-9: Primer barvno kodiranega modela največje glavne ukrivljenosti.

Model **utežene napake srednjega kvadratnega odklona  $RMSE$**  (oz.  $\sigma_{0,d}$ , enačba (5-8))

predstavlja lokalno natančnost višin lidarskih (originalnih) točk. Spodnja meja vrednosti, ki je določena a-priori (glede na merski sistem ALTM2050 in skrbno georeferenciranje podatkov), je 5 cm. Nizke vrednosti (bela in svetlorjavi odtenki) ima  $RMSE$  na območjih brez vegetacije in na ravnem terenu (območje *Polje*). Točke mreže brez bližnjih originalnih točk (mejna vrednost razdalje je 5m) so določene kot neuporabne in so na slikah modela označene rdeče.

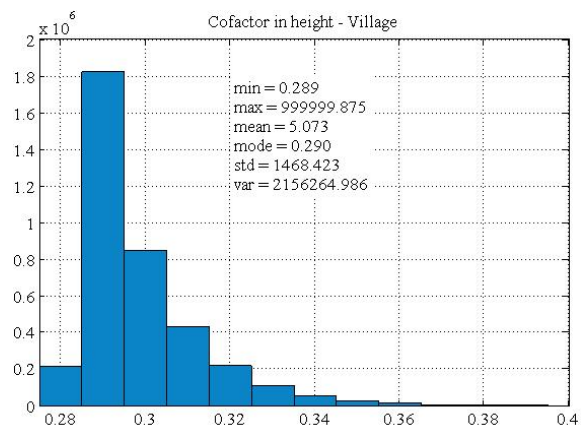


Slika 5-10: Primer histograma za parameter  $RMSE$ .

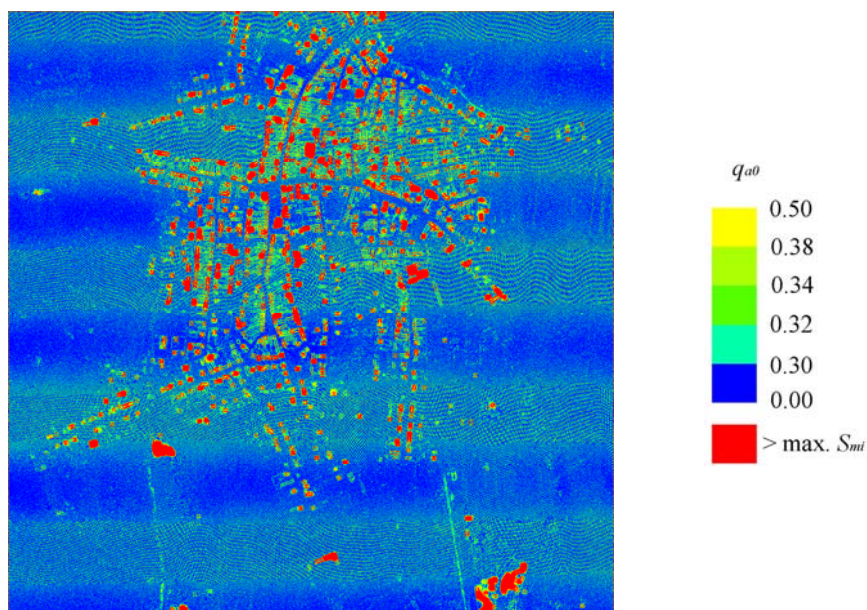
Slika 5-11: Primer barvno kodiranega modela natančnosti višin  $\sigma_{0,d}$  originalnih točk.

**Utežni koeficient  $q_{d0}$**  zavzema v glavnem vrednosti okrog 0,29 in se spreminja v intervalu od 0,28 do 0,4 (Slika 5-12). Ker je tako vrednost utežnega koeficienta vedno manjša od 1, bo natančnost višin DMR-ja večja od natančnosti višin originalnih točk, kar je naš cilj.

Tudi tu so neuporabna območja brez originalnih točk v bližini točk mreže označena rdeče in so glede na mejno vrednost razdalje 5 m izključena iz izračuna.

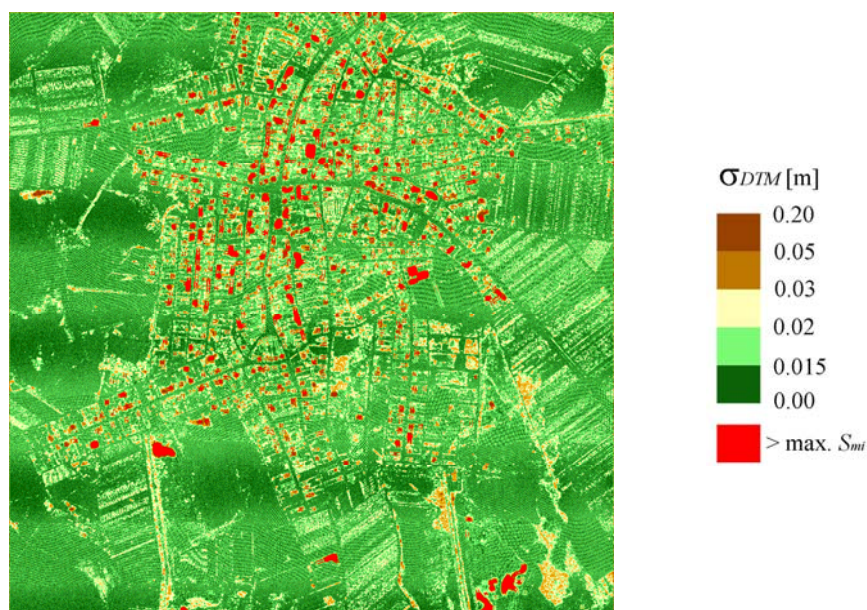


Slika 5-12: Primer histograma za parameter utežni koeficient.



Slika 5-13: Primer slike barvno kodiranega modela kofaktorja višin nagnjenih ravnin.

Zadnja slika prikazuje najpomembnejši rezultat - prostorsko spreminjajočo se natančnost višin DMR  $\hat{\sigma}_{DTM}$ . Vrednosti so izračunane po enačbi (5-12) in vključujejo standardno deviacijo originalnih točk  $\sigma_{0,d}$  (Slika 5-11) in utežni koeficient  $q_{a0}$  (Slika 5-13). Histogrami izračunanih standardnih deviacij  $\hat{\sigma}_{DTM}$  za vsa izbrana območja so na sliki (Slika 5-15). Območja, ki so bila izključena glede na mejno vrednost minimalne razdalje  $s_m$  (5 m), so na slikah modela označena rdeče.



Slika 5-14: Primer barvno kodiranega modela natančnosti višin DMR  $\hat{\sigma}_{DTM}$ .

### 5.3.3 Primerjava lokalnih parametrov kakovosti za različne pojave

V programskem paketu Matlab sem za podrobnejšo analizo vrednosti lokalnih parametrov kakovosti izračunala **histograme** za vsako izbrano območje. S primerjavo histogramov istega parametra za različna območja, sem ugotovila, da ni večjih razlik v razporeditvi vrednosti oz. v obliki histogramov. Histogrami območji za parameter natančnosti višin DMR so prikazani za sliki (Slika 5-15). Izračunala sem še nekatere **statistične spremenljivke** (minimum, maksimum, povprečje, najpogostejšo vrednost, standardna deviacija in varianco) za vrednosti posameznega parametra in jih primerjala glede na obravnavana območja. Nekaj reprezentativnih spremenljivk je zapisanih v preglednici (Preglednica 5-1).

Preglednica 5-1: Reprezentativne vrednosti lokalnih parametrov kakovosti na izbranih območjih.

Parameter Območje	Geoidna višina**	Najmanjša razdalja*	Ukrivljenost terena **	RMSE*
Trsje, ločje	[114,39 120,90] m	/	[-2.64, 2.35] m <sup>-1</sup>	5,4 ± 2,4 cm
Naselje (Ilmitz)	[114,67 121,84] m	0,69 ± 1,06 m	[-1.02, 1.08] m <sup>-1</sup>	5,7 ± 1,8 cm
Vinograd	[114,44 126,00] m	0,41 ± 0,36 m	[-1.00, 1.93] m <sup>-1</sup>	5,5 ± 1,2 cm
Polje	[115,56 123,18] m	0,38 ± 0,12 m	[-0.96, 0.92] m <sup>-1</sup>	5,1 ± 0,7 cm
Gozd	[111,75 116,61] m	/	[-1.96, 3.83] m <sup>-1</sup>	6,7 ± 2,4 cm

\*Zapisani sta povprečna vrednost in (±) standardna deviacija parametra.

\*\*V intervalu sta zapisani najmanjša in največja vrednost parametra.

Ker originalne točke območji *Trsje* in *Gozd* ne pokrivajo cele površine računske enote, so izračunane vrednosti parametra **najmanjše razdalje** nekoliko popačene in jih ne morem primerjati z ostalimi območji. Primerjam pa lahko najbolj pogosto vrednost, ki je 0.361 za *Trsje*, *Naselje* in *Gozd* in 0.184 m za *Vinograd* in *Polje*. Med vrednostmi parametra najmanjše razdalje najbolj izstopa območje *Naselje*, kar je posledica eliminacije točk na zgradbah.

**Ukrivljenost terena** ima največje vrednosti na območju *Trsje* in *Gozd*. Razlog so ne-terenske točke, ki ležijo na nizki vegetaciji in se jih v procesu avtomatskega izračuna DMR težko odstrani. Tako so vključene v DMR in povzročajo hitre vendar majhne spremembe poteka površine modela. Ukrivljenost terena je kot pričakovano najmanjša na poljih.

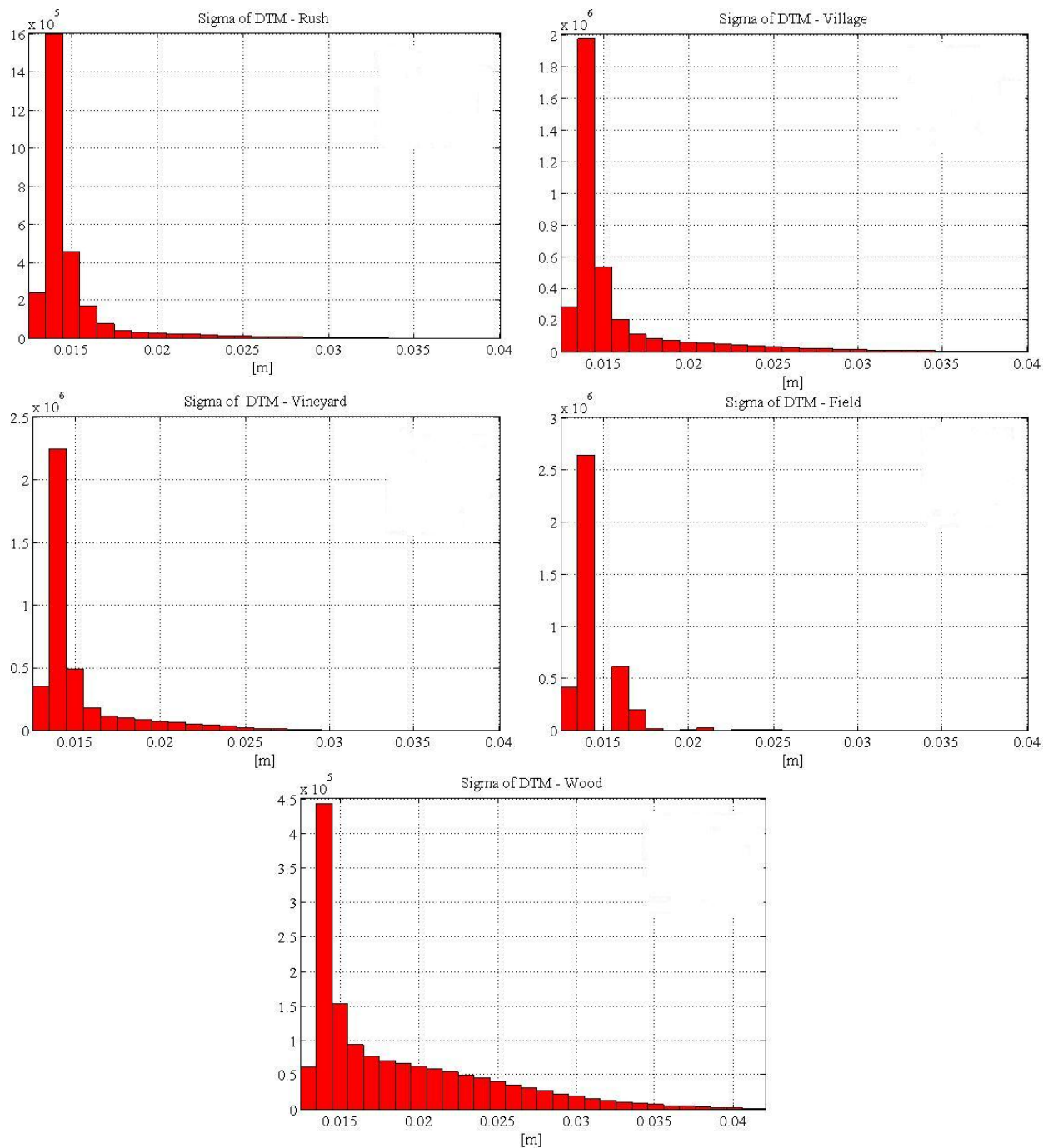
S primerjavo statistično izračunanih povprečnih vrednosti za **RMSE** na obravnavanih območjih lahko ugotovim, da je višinska natančnost originalnih točk najslabša na območju



gozda. Razlog je slabša penetracija laserskega žarka (manj terenskih točk) in zato slabša določitev DMR-ja: razlike  $d_i$  (direktno vplivajo na natančnost) so večje kot tudi ukrivljenosti terena (vplivajo preko uteži). Njun vpliv je opisan v enačbi (5-8). Pozornost velja posvetiti še območjem z gosto nizko vegetacijo - ločje in trsje ob obrežju jezer. Standardna deviacija parametra RMSE je 2,4 cm, kar pomeni, da ima več originalnih točk slabšo natančnost (glede na ostala obravnavana območja). Najboljšo višinsko natančnost imajo originalne točke, ki ležijo na polju.

Histogrami vrednosti **kofaktorja višine** so si v vseh petih primerih podobni in kažejo na najpogostejšo vrednost, ki je 0.29.

Ker so sistematične napake odstranjene iz meritev (s postopkom skrbnega georeferenciranja) in tudi ni prisotnosti drugih napak (kot je npr. manjkajoči pas podatkov med sosednjima lidarskima pasovoma) imajo izračunani DMR-ji visoko natančnost (Slika 5-15) – najpogostejša vrednost **natančnosti višin DMR**  $\hat{\sigma}_{DTM}$  je 1,5 cm. Najslabša natančnost DMR-ja je na območju gozda, kar sledi iz vrednosti že zgoraj opisanih lokalnih parametrov kakovosti (ukrivljenost terena, RMSE).



Slika 5-15: Histogrami vrednosti sigme DMR za posamezno obravnavano območje: *Trsje* (zgoraj levo), *Naselje* (zgoraj desno), *Vinograd* (sredina levo), *Polje* (sredina desno) in *Gozd* (spodaj).

## 6 MERITVE INTENZITETE ODBOJA LASERSKEGA ŽARKA

Glavna pozornost pri preučevanju meritev zračnega laserskega skeniranja je namenjena podatkom položaja in višine skeniranega površja. Poleg teh 3D informacij (koordinat) pa novejši laserski sprejemniki simultano beležijo še informacijo o intenziteti odbitega laserskega žarka za vsak odboj<sup>1</sup> valovanja. Z meritvami intenzitete dobimo poleg natančne morfologije, ki jo poda 3D 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 diplomski nalogi govorim o **intenziteti odbitega laserskega žarka** (krajše: intenziteti).

Intenziteta nosi potencialno pomembne informacije o odbojnosti objektov, ki bi jih lahko, združene s 3D geometrijski podatki, koristno uporabili pri npr. avtomatskem zaznavanju in identifikaciji med seboj različnih objektov. Vendar pa so vrednosti merjene intenzitete zaradi **mnogih motečih faktorjev** (v LS, atmosferi in na tarči) popačene (angl. too noisy) in njena **neposredna uporaba** za natančno rekonstrukcijo jakosti odboja od tal ni mogoča. Zato različni 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]. Z normalizacijo (odpravo različnih vplivov in napak) meritev bi lahko intenziteto standardizirali in omogočili njeno neposredno uporabo. S tem bi v veliki meri **povečali zmožnosti** lidarskega sistema (pridobimo dodatne podatke).

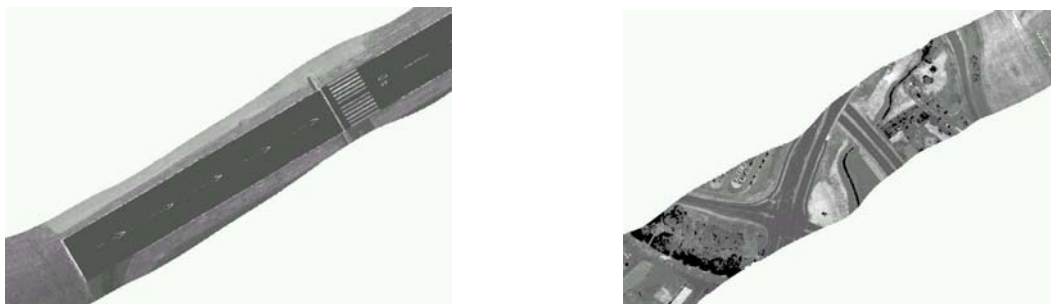
### 6.1 Različne uporabe meritev intenzitete odboja

Preko informacij o odbojnosti zajetih objektov (merjena intenziteta) lahko **sklepamo na vrsto materiala objekta** od katerega se je laserska svetloba odbila. Na sliki intenzitete (Slika 6-1, levo), ki prikazuje letalsko stezo, se jasno razloči asfaltirana letalska steza, sredinska črta in

---

<sup>1</sup> Za prvi in zadnji odboj ali več odbojev – odvisno od uporabljenega merskega sistema.

ostale oznake na njej, okoli pa vegetacija. Desna (Slika 6-1) slika intenzitete prikazuje bolj zapleteno območje, kjer se brez ostrih mej pojavlja več različnih materialov (pojavov). Le-ti glede na merjeno intenziteto niso tako kontrastni kot pojavi na levi sliki (jih je težje ločiti med seboj).



Slika 6-1: Primera slik intenzitete za preprosto (levo) in bolj zapleteno območje (desno) [Katzenbeisser, 2002].

Najpogostejša uporaba intenzitete je za **vizualizacijo** območja snemanja. **Slika** je narejena preprosto z barvnim kodiranjem (običajno sivimi toni) prostorsko pravilnih lidarskih podatkov in je tako že georeferencirana in ortofektificirana<sup>1</sup>, na njej ni senc (kot na ortofotu) in ima pravo merilo. Slika intenzitete odbitih laserskih žarkov je podobna naravnemu dojetanju odbite vidne svetlobe, saj je valovna dolžina laserske svetlobe (tipično okoli 1 $\mu$ m) le malo večja od valovne dolžine vidnega spektra. Glede na gostoto posnetih točk lahko na površju jasno ločimo nekatere pojave, kot so ceste, poti, stavbe, drevesa, različna raba tal (Slika 6-1). Cenovno ugodne visoko-resolucijske georeferencirane infrardeče podobe imajo dodano vrednost, oziroma bi lahko celo nadomestile slike drugih optičnih naprav.

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** [Lutz et. al, 2003]. Zaradi teh uporabnih lastnosti meritev intenzitete se izvajajo številne analize podatkov in razvijajo naslednje aplikacije:

- V nenehni želji po izboljšanju kakovosti lidarskih podatkov lahko intenziteto uporabimo pri **iskanju homolognih pojavov** med prekrivajočimi se pasovi – t.j. za združevanje pasov, za odpravo napak meritev ter za kontrolo kakovosti (zanesljivosti)

<sup>1</sup> Vsaka točka ima določen položaj (X, Y, Z), relativno glede na koordinatno mrežo.

podatkov [Maas, 2001], [Kraus et al. 2006]. Dobro vidne pojave na sliki 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 terenskih in ne-terenskih točk (osnovna klasifikacijska rutina) in klasifikacije ali ekstrakcije točk glede na različne rabe tal (npr. ekstrakcija cest). S primerjavo podatkov višin in intenzitete (na npr. urbanem območju ali območju pokritem s snegom in ledom) ugotovimo, da slika intenzitete jasno pokaže nekatere pojave, ki jih na sliki višin ne moremo zaznati (najbolj opazen primer so asfaltirane ceste).
- Meritve intenzitete odboja se prav tako uporablja v **gozdarstvu** in sicer za izboljšanje ocene volumna gozda (funkcija višine in števila odbojev laserskega žarka od krošenj) [Lovell, 2003] in za identifikacijo vrste vegetacije (dosedanje raziskave so bile sicer neuspešne) [Moffiet et. al, 2005].

Uporabnost meritev intenzitete lahko povečamo v kombinaciji z drugimi podatki. Na primer sliko intenzitete prekrijemo s podatki katastrskih mej, pod točke z informacijo o intenziteti položimo ortofoto ali DMP s podatki višin terena in objektov, uporabimo merjene razdalje.

## 6.2 Opredelitev intenzitete odbitega laserskega žarka

Senzor zračnega laserskega skeniranja oddaja lasersko svetlobo (pulzno ali neprekinjeno) proti površju pod seboj, od katerega se ta difuzno odbije. Le del odbitega valovanje pride zopet nazaj v sprejemnik senzorja (detektor), ki tako registrira njegov čas potovanja in intenziteto. Informacije o načinu beleženja intenzitete v posameznem lidarskem merskem sistemu so težje dostopne (podajanje teh informacij ni v interesu razvijalcev sistema), zato je definicija intenzitete deloma nejasna.

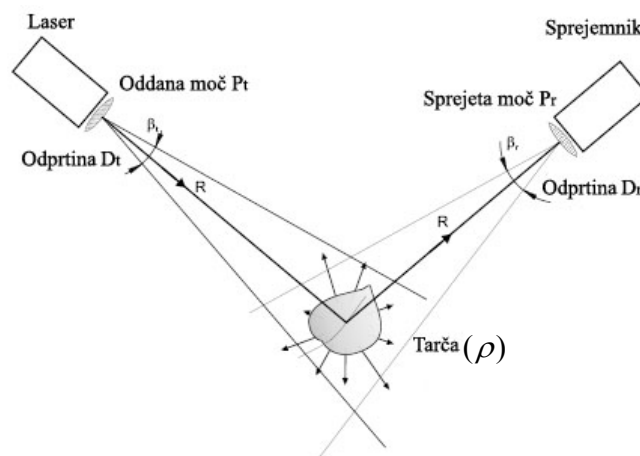
Po razlagi v Coren in Sterzai [2005] je intenziteta (angl. amplitude) registriranega odboja izražena z digitalno številko. Meritev je proporcionalna **število fotonov**, ki trčijo na fotodiode detektorja v določenem časovnem intervalu (v fiziki: moč). Tudi za Optech-ove sisteme po definiciji v Jonas [2002] velja, da se vrednosti merjene intenzitete nanašajo na **jakost odbitega signala**. Intenziteta zavzema vrednosti od 0 (šibak odboj) do 8160 (zelo močan

odboj) in se šteje kot relativna količina (ne absolutna) in ne nujno linearna meritev. Splošno je intenziteta ( $I_m$ ) določena s pomočjo merjenja amplitude tistega dela odbitega ali od tarče oddanega valovanja, ki prepotuje razdaljo tarča-senzor in pade na sprejemni element (film, elektro-optična naprava) senzorja LS-ja znotraj njegovega kota gledanja. Intenziteta se lahko zabeleži kot **največja dosežena amplituda** prejetega (vrnjenega) signala ali kot **povprečje (integracija) amplitude** na celotni dolžini vrnjenega signala.

Če upoštevamo dejstvo, da so vrednosti intenzitete brez merske enote in so meritve relativne<sup>1</sup>, potem je smiselna/uporabna definicije intenzitete po Song-u et. al [2002] kot **razmerje med jakostjo sprejete ( $P_r$ ) svetlobe na detektorju LS-ja in jakost iz laserja LS oddane ( $P_t$ ) svetlobe**.

### 6.3 Enačba radarja

S tako imenovano »enačbo radarja«<sup>2</sup> lahko izračunamo jakost oz. moč prejetega signala.



Slika 6-2: Skica<sup>3</sup> geometrije zajema lidarskih točk [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  $\beta$  in tako osvetli majhen (individualen) del površine

<sup>1</sup> Velja za meritve iste misije ZLS-ja (višina leta, merski sistem).

<sup>2</sup> Ker ZLS uporablja merski princip prvič predstavljen pri radarskem daljinskem zaznavanju, je tudi osnovna enačba za izračun moči signala poimenovana po tej tehniki.

<sup>3</sup> Oddajnik in sprejemnik sta zaradi večje preglednosti geometrije zajema prikazana ločeno. Sicer ima LS monostatično konstrukcijo.

$A_{laser}$ . 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 tarče<sup>1</sup>  $dA$ , 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**  $\rho$  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  $\Omega$  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-ja ( $\eta_{sis}$ ) ter v atmosferi ( $\eta_{atm}$ ) zapišemo končno obliko enačbe **moči sprejetega signala** po [Wangner, 2005]:

$$P_r = \left( \frac{P_t * D_r^2}{4\pi R^4 \beta^2} \right) * \left( \frac{4\pi}{\Omega} \rho * dA \right) * \eta_{sis} * \eta_{atm} \quad (6-1)$$

Kjer so:

$P_r$  ... jakost sprejetega signala;

$P_t$  ... jakost oddanega signala;

$D_r$  ... premer odprtine sprejemne optike;

$R$  ... razdalja tarča-senzor;

$\beta$  ... divergenca laserskega žarka;

$\eta_{sis}$  ... faktor prenosa žarka v sistemu;

$\eta_{atm}$  ... faktor prenosa žarka v atmosferi;

$\Omega$  ... prostorski kot;

$dA$  ... velikost tarče;

$\rho$  ... 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 6.5.

---

<sup>1</sup> Velikost tarče je efektivna površina vpada in odboja laserskega žarka na poljubnem objektu, ki leži na poti laserskega žarka proti tlom.

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:

$$dA = A_{laser} = \pi \frac{R^2 \beta^2}{4}. \quad (6-2)$$

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

$$P_r = \left( \frac{P_t * D_r^2}{4R^2} \right) * \eta_{sis} * \eta_{atm} * \rho \quad (6-3)$$

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

Če se vpadni kot ( $\zeta$ ) laserskega žarka na tarčo razlikuje od  $90^\circ$ , se spremeni izraz za izračun velikosti odtisa laserskega žarka (enačba (6-2)) in je po [Hug in Wehr, 1997]:

$$P_r = \left( \frac{P_t * D_r^2 * \cos \zeta}{4R^2} \right) * \eta_{sis} * \tau_{atm}^2 * \pi * \rho \quad (6-4)$$

## 6.4 Merjene vrednosti intenzitete

Vrednost merjene intenzitete odbitega laserskega žarka je zapletena funkcija večih 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 n.m.v.);
- kot gledanja senzorja ZLS (angl. viewing angle);
- vpadni kot ( $\zeta$ ) 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 absorpcija in lom valovanja (angl. air attenuation and diffraction);
- sevanje iz okolja, ki ima valovno dolžino blizu laserski svetlobi (sončna svetloba odbita od tal in od delcev v ozračju, termalno sevanje površja Zemlje).

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 opisan v poglavju 6.3 (ko je odboj difuzen in homogen, ter vpad žarka na tarčo pravokoten) z uporabo enačbe (6-3) izračunamo merjeno intenziteto.

Ker so meritve intenzitete relativne<sup>1</sup>, lahko zanemarimo vplive iz enačbe (6-3), ki so **konstantni** za isti merski sistem in za enake atmosferske pogoje ( $D_r, \eta_{atm}, \eta_{sis}$ ). Enačbo (6-3) zapišemo:

$$I_m \approx \frac{P_r}{P_t} = \frac{\rho}{R^2} * konst. \quad (6-5)$$

Kjer je:

$$konst. = \frac{D_r^2}{4} \eta_{sis} * \eta_{atm} \dots \text{konstantna vrednost.}$$

Merjene vrednosti intenzitete so tako odvisne od materiala tarče (vrednosti koeficienta odbojnosti  $\rho$ ) in se manjšajo s kvadratom razdalje  $R$ .

Iz enačbe (6-5) je razvidno, da bo imela ista površina ( $\rho = konst.$ ), osvetljena in opazovana z istim aktivnim senzorjem ZLS-ja vendar na različnih razdaljah ( $R$ ), različne vrednosti merjene intenzitete  $I_m$ .

Ker se vpadni kot  $\xi$  večinoma le malo razlikuje od  $90^\circ$  je njegov vpliv na merjeno intenziteto majhen. Upoštevamo ga le v primeru zahtev po visoki natančnosti merjenja odbojnosti. Tedaj je (iz enačbe (6-4)):

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

<sup>1</sup> Velja za lidarske pasove zajete v eni misiji ZLS.

<sup>2</sup> Z isto enačbo je opisan model difuznega odboja v [Hasegawa, 2006].

Kjer je:

$$konst. = \frac{D_r^2}{4} \eta_{sis} * \tau_{atm}^2 * \pi \dots \text{konstantna vrednost.}$$

Vrednost intenzitete je sedaj manjša, čim večji je vpadni kot  $\zeta$  ter večja kot je razdalja  $R$ .

Vrednosti merjene intenzitete po enačbah (6-5) in (6-6) 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:

1. Razdalje  $R$ .
2. Vrsta 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 (6-1), in se imenuje **prečni prerez odboja laserskega žarka  $\sigma$**  (angl. backscattering cross-section) [Wagner, 2005]

## 6.5 Prečni prerez odbitega laserskega žarka

Prečni prerez odbitega laserskega žarka je odvisen od **koeficienta odbojnosti** (dielektrične lastnosti) tarče, nagnjenost oz. **usmerjenost tarče** glede na vpadni in proti sprejemniku odbiti laserski žarek ter **velikost 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 so pomembne pri računanju jakosti sprejetega valovanja, je poglobljenega 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 - glej poglavje 2.7) 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 (angl. DEM), s katerim je določen nagib in usmerjenost tarče.

**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 ( $\beta$ ), je njena velikost kar enaka velikosti odtisa žarka. Velikost odtisa žarka na tej t.i. razprostrti tarči je za raven teren in za poljuben vpadni kot dana z enačbo (4-2) [Baltsavias, 1999b]. Velikost razprostrte tarče vpliva na merjeno intenziteto preko spremenljivke *vpadnega kota* ( $\zeta$ ) (glej enačbo (6-6)).

**Koeficient odbojnosti** ( $\rho$ ) 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. V preglednici (Preglednica 6-1) so zapisane tipične vrednosti koeficienta odbojnosti za različne materiale tarče in za valovno dolžino laserske svetlobe 1  $\mu\text{m}$ , ki je največkrat uporabljena v komercialnih LS. Ker so pogoji za merjenje neznani, je potrebno te vrednosti upoštevati pazljivo [Wagner, 2005].

Preglednica 6-1: Koeficient odbojnosti za različne materiale tarče pri valovni dolžini 1  $\mu\text{m}$  [Wagner, 2005].

Material	Koeficient odbojnosti
Aluminijasta folija	0,8 – 0,9
Asfalt	0,2
Cement	0,4
Krom	0,6
Baker	0,9
Koruzni list	0,9
Javorjev list	0,4
Platina	0,45 – 0,6
Peščena tla - mokra	0,15
Peščena tla - suha	0,3
Ilovnata tla – suha	0,6
Sneg	0,25
Nerjaveče jeklo	0,2 – 0,6
Voda – mirna gladina	< 0,01
Voda – rahlo valovita gladina	do 0,3
Pšenično steblo	0,9
Pšenični klas	0,65
Bel hrastov list	0,65

Vpliv odbojnosti tarče ( $\rho_{tarča}$ ) na merjeno intenziteto je (že po definiciji intenzitete, glej enačbo (6-5)) največji in najpomembnejši. Merjena intenziteta zaradi vpliva motečih faktorjev (poglavje 6.4) ni popolnoma v skladu s teoretičnimi vrednostmi za odbojnost materiala, ampak jim sledi relativno. Tako je mogoče ločiti različne materiale in bi podatke o intenziteti odboja teoretično lahko uporabili za razločevanje različnih površin. Pogoji 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]).

## 6.6 Analiza intenzitete odboja na območju projekta Neusiedler see

Namen moje analize podatkov intenzitete odbitega laserskega žarka (v nadaljevanju intenzitete) na območju projekta Neusiedler See je bil, ugotoviti možnost uporabe teh meritev za **klasifikacijo različnih površja**, ki se pojavljajo na območju projekta Neusiedler See:

- **polja** (zorana in prazna, na digitalni sliki so temno in svetlo rjava),

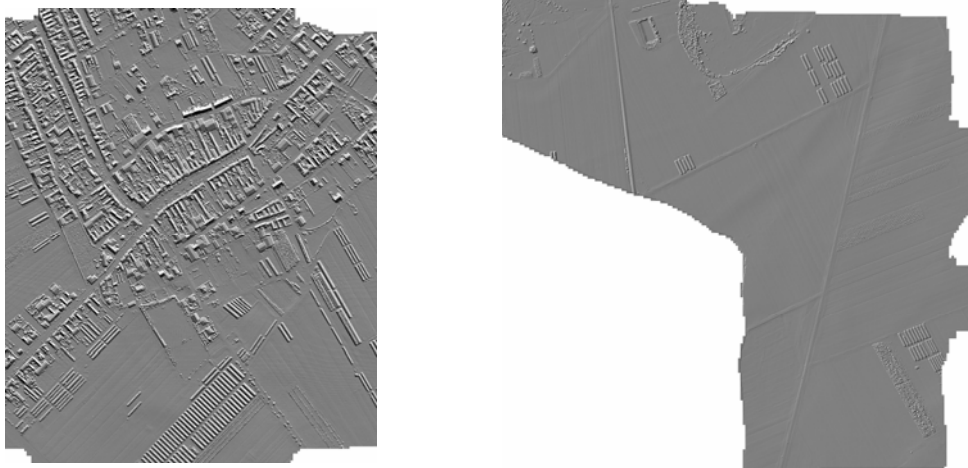
- **travniki** oz. druga nizka vegetacija (na digitalni sliki so zelena),
- **ceste** (asfaltne in gramozne),
- **vinogradi** (so vidni na DSM-ju).

Naprej sem pregledala podatke intenzitete na območju Neusiedler See in sicer znotraj dveh izbranih lokaciji (poglavje 6.6.1). Nato sem ob določenih predpostavkah, ki izhajajo iz karakteristik območja projekta Neusiedler See, **empirično analizirala** odvisnost merjene intenzitete od glavnih spremenljivk (imajo največji vpliv na  $I_m$ , enačba (6-6)). S popravki merjene intenzitete za »moteče« vplive spremenljivk sem izračunala **vrednosti »normalizirane« intenzitete**, ki predstavljajo psevdo-odbojnost tarč. Model psevdo-odbojnosti lahko nato služi za klasifikacijo pojavov oz. različnih rab tal.

### 6.6.1 Podatki za analizo intenzitete na območju Neusiedler See

Za analizo intenzitete sem imela na razpolago **lidarske podatke** južnega dela območja projekta Neusiedler See, ki so bili dani v projekciji UTM15. Višine se nanašajo na elipsoid. Izmed vseh podatkov, shranjenih ločeno po pasovih, sem izbrala in izrezala dve lokaciji, kjer se prekriva največ lidarskih pasov (posledično je tu gostota točk največja). Analiza intenzitete se nanaša na lidarske podatke znotraj teh dveh lokacij, ki sem ju poimenovala Lokacija 1 in Lokacija 2.

Za analizo izbrani lidarski pasovi so bili zajeti v različnih smereh (S-J, V-Z, SZ-JV) in dnevih (24.11. in 25.11. 2004). Iz 3D koordinat točk, ki so bile določene v procesu skrbnega georeferenciranih in za katere se je dodatno izračunalo polarne koordinate, sem izračunala **DMR** in **DMP**. Kot je razvidno iz DMR-ja je teren relativno raven, in se na celotnem obravnavanem območju spremeni le za 15 m. DMP s svojo teksturo prikazuje pojave na terenu kot so zgradbe, vegetacija (drevesa, grmičevje in vinogradi), drugi objekti (npr. avtomobili) in služi za podlago podatkom intenzitete - jim doda višinsko predstavbo. Poleg lidarskih podatkov sem imela na voljo še neobdelane **digitalne slike**.



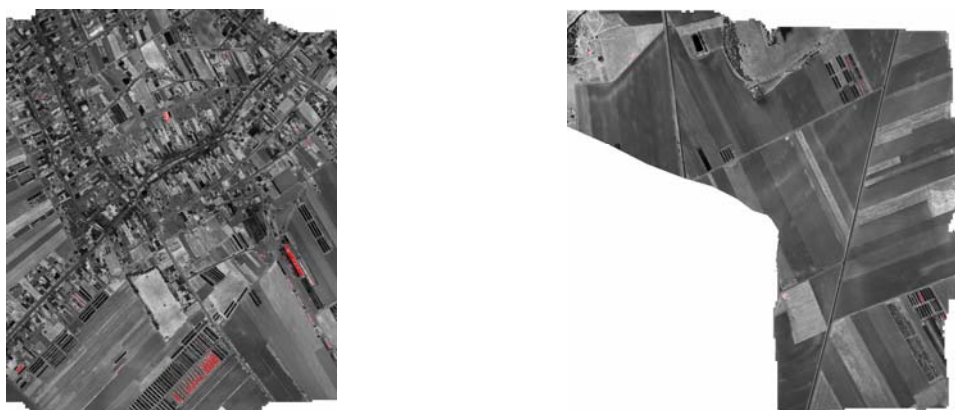
Slika 6-3: Senčen prikaz DMP-ja za Lokacijo 1 in Lokacijo 2.

Glede na senčen prikaz DMP-ja (Slika 6-3 – sliki nista prikazani v istem merilu) in ob pregledu digitalnih slik lahko Lokacijo 1 obravnavam kot urbano (prevladujejo objekti - hiše) in Lokacijo 2 kot ruralno območje (prevladujejo polja, vinogradi).

Misija ZLS je bila opravljena z Optechovim merskim sistemom **ALTM 2050**, ki omogoča merjenje **intenzitete** (za prvi in zadnji odboj), za katero veljajo naslednje **splošne značilnosti**:

- Meritve intenzitete prikazujejo tipičen zvonast histogram.
- Razpon vrednosti intenzitete je od 4 do 255 pri povprečni višini leta 1100 m.
- Nižje kot je letelo letalo, večje so vrednosti intenzitete odboja.

Dejansko so bile vrednosti intenzitete v sprejemniku sistema ALTM 2050 kodirane z 12 biti. Največje vrednosti (torej do 4096), ki so jih imele točke z visoko odbojnostjo (vodne in zrcalne površine, steklo) so motile vizualizacijo slike intenzitete. Zato so v podjetju TopScan pri ASCII izpisu omejili zalogo vrednosti na 255, ki omogoča 8 bitni prikaz podatkov intenzitete. Točkam s prvotno najvišjimi vrednostmi je bila brez skaliranja dodeljena zgornja mejna vrednost 255. Odboji z zelo nizko/majhno vrednostjo intenzitete morajo biti izpuščeni, saj je meritev razdalje geometrično nenatančna. V tem primeru so bili izločeni registrirani odboji, ki so imeli vrednost manjšo od 4. Zgornjo in spodnjo mejo je obdelovalec podatkov določil glede na višino leta letala nad tlemi [Lindenberger, 2006]. V programu SCOP++ sem s preprosto interpolacijo intenzitete (metoda »Moving Planes«) in sivo-tonskim kodiranjem vrednosti izdelala slike intenzitete za obe lokaciji (Slika 6-4). Maloštevilne vrednosti intenzitete nad 150 so prikazane rdeče.



Slika 6-4: Sliki intenzitete za Lokacijo 1 in Lokacijo 2.

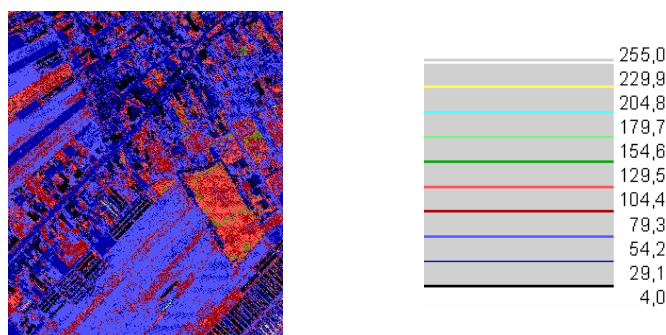
### 6.6.2 Analiza intenzitete znotraj določenih pojavov

Na slikah intenzitete za Lokacijo 1 in 2 (Slika 6-4) so dobro vidne različne rabe tal - predvsem na Lokaciji 2, ki prikazuje ruralno rabo tal. Kateri sivi ton (torej vrednost intenzitete) predstavlja določen pojav sem skušala razbrati s pomočjo digitalnih slik, ki pokrivajo izbrani lokaciji. S primerjavo slik (vidna svetloba in barvno kodirana intenziteta; Slika 6-5) sem razločila in identificirala pojave zapisane v preglednici (Preglednica 6-2).



Slika 6-5: Primer digitalne slike in slike intenzitete za isto območje.

**Oceno tipične vrednosti** (oz. interval spreminjanja) intenzitete za določene pojave sem določila v programu GVE. GVE omogoča barvno kodiran prikaz (v ravnini XY) točkovnih podatkov (vrednosti Z – v tem primeru intenzitete) in pregled vrednosti za posamezno točko.



Slika 6-6: Primer barvno kodiranih vrednosti intenzitete v programu GVE.

Pri ocenjevanju vrednosti intenzitete za **objekte nad terenom** sem pod lidarske točke položila DMP, na katerem je viden tip objekta (npr. hiša, vegetacija, avto itd) in njegov položaj na sliki intenzitete (npr. obris vegetacije, obod hiš). Tip in položaj **terenskih pojavov** na sliki intenzitete (npr. polja, travnik, ceste) sem ocenila s pomočjo digitalnih slik in intenzitete same. Tako sem zgolj z vizualnim pregledom slike intenzitete v GVE pridobila približne vrednosti za posamezen pojav, kot so zapisane preglednici (Preglednica 6-2). Natančnejša analiza vrednosti intenzitete v mojem primeru ni mogoča, saj bi potrebovala dodatne podatke (npr. ortofoto), za lociranje pojavov na sliki intenzitete in s tem za natančnejšo ekstrakcijo vrednosti intenzitete za določen pojav.

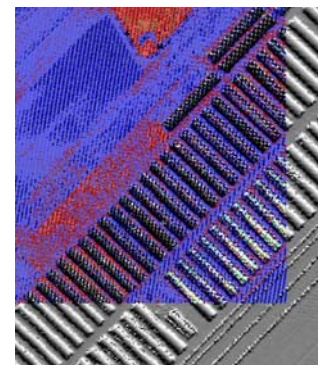
Preglednica 6-2: Različni pojavi (objekti, raba tal) znotraj izbranih lokacij in ocena vrednosti intenzitete.

Pojav		Ocena vrednosti intenzitete
Trava		76 - 107
Polja	zeleno	56 - 96
	rjavo	35 - 52
<b>Vinogradi</b>		<b>4 - 134</b>
Ceste	Asfaltirana	14 - 47
	gramozna	50 - 68
<b>Strehe zgradb</b>		<b>4 - 146</b>
<b>Objekti - rastlinjaki</b>		<b>4 - 255</b>

Intenziteta se najbolj spreminja in zavzema širok interval vrednosti na objektih (hiše in rastlinjaki) in na območju vinogradov, kar potrjuje vpliv vpadnega kota ( $\zeta$ ) na merjeno intenziteto (glej enačbo (6-6) in poglavje 6.5). Le-ta zaradi nagnjenosti površin (strehe hiš) oz. spreminjanja njihove orientacije, naklona (pri ukrivljenih strehah rastlinjakov, brajd



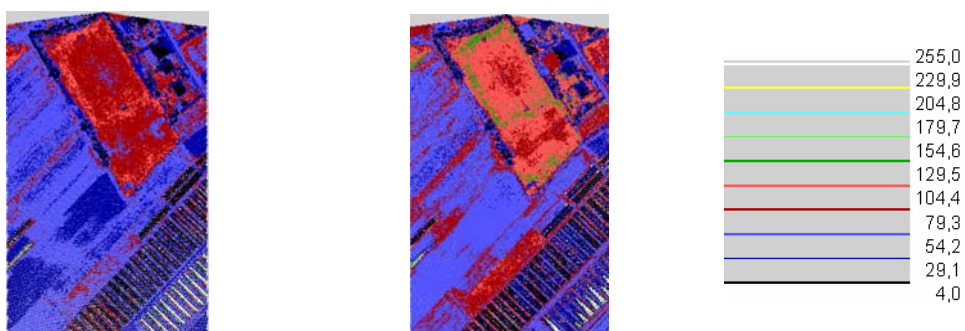
vinogradov) zelo variira. Hitro in neurejeno spreminjanje intenzitete odboja laserskega žarka na rastlinjakih (Slika 6-7) je še posledica prosojnosti materiala rastlinjaka (plastika), ki deloma prepušča laserske žarke, da se odbijejo od notranjih objektov. Intenziteta tako zavzema celoten razpon vrednosti od 4 do 255.



Slika 6-7: Barvno kodirane vrednosti intenzitete in DMP na območju rastlinjakov.

Posamezne visoke vrednosti intenzitete se pojavijo na **cestah** in predstavljajo odboj laserskega žarka na avtu, beli cestni oznaki (sredinska črta, prehod za pešce), pokrovu kanalnih vodov itd. Ti materiali imajo namreč visok koeficient odbojnosti (Preglednica 6-1). Ocenjene vrednosti intenzitete za terenske pojave prav tako zavzemajo (pre)velike intervale, ki se med seboj prekrivajo.

S **primerjavo** slik intenzitete posameznih **lidarskih pasov** v programu GVE, sem v nekaterih primerih ugotovila precejšnje razlike med njimi. Čeprav pasovi pokrivajo isto območje in slika intenzitete prikazuje iste pojave (odboj laserskega žarka na istem materialu, pojavu), se vrednosti merjene intenzitete razlikujejo. Na spodnji sliki (Slika 6-8) je primer izreza istega območja iz pasu 11 (levo) in pasu 55 (desno). Pasova sta bila posneta v različnih dnevih, smeri leta pa sta pravokotni med seboj.



Slika 6-8: Primer različnih slik intenzitete iz dveh lidarskih pasov za isto območje.

Z empiričnim primerjanjem intenzitete identičnih območji, vendar iz različnih pasov, sem ugotovila, da razlike niso odvisne od smeri niti od dneva leta. Pari histogramov intenzitete, ki se nanašajo na identična območja dveh lidarskih pasov, so med seboj zamaknjeni kot posledica različne višine leta letala.

### 6.6.3 Analiza vplivov na merjeno intenziteto

Merjena intenziteta je po enačbi (6-6) odvisna od razdalje ( $R$ ), vpadnega kota ( $\xi$ ), ki je parameter v enačbi za velikosti tarče, ter koeficienta odbojnosti ( $\rho$ ). Z analizo podatkov iščemo korelacijo med temi spremenljivkami.

$$I_m = f(R, dA(\xi), \rho) \quad (6-7)$$

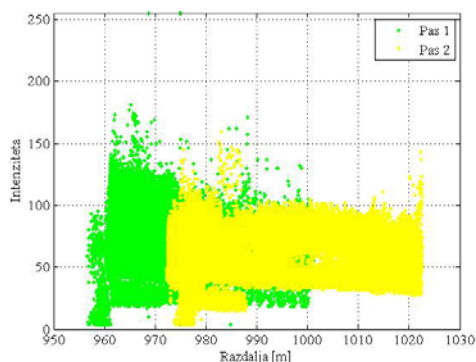
Velikost spremenljivke  $R$  je dana za vsako lidarsko točko, saj imamo podatke originalnih opazovanj. Pri upoštevanju vpliva  $dA$  predpostavljamo:

1. Pri klasifikaciji rabe tal obravnavamo le intenziteto terenskih točk. Ker je teren na območju Neusiedler See **raven** (glede na izračunani DMT) je **vpadni kot enak kotu skeniranja**. Ta se pri merskem sistemu ALTM2050 spreminja od  $0^\circ$  do  $\pm 20^\circ$  in je izmerjen za vsako lidarsko točko (originalna opazovanja polarnih koordinat). Torej velja  $\xi = \Theta = [0^\circ, 20^\circ]$ .
2. Laserski žarek se je odbil na homogeni površini t.j. na **razprostrti tarči** in je tako velikost tarče vedno enaka velikosti odtisa žarka na tleh. Potem je po enačbi (4-2) velikost tarče  $dA = A_{laser} = [20, 23] \text{ cm}$ .

Vpliv spreminjanja vpadnega kota na spremembo velikosti tarče in s tem na merjeno intenziteto je majhen glede na vpliv razdalje [Sterzai, 2006]. Upoštevamo še, da je v primeru ravnega terena vpadni kot ( $\xi$ ) parameter merjene razdalje ( $R = f(\xi)$ ). Zato vpliv vpadnega kota na merjeno intenziteto (oz. kota skeniranja) v nadaljevanju analize zanemarimo (ga ne upoštevamo). Največji vpliv na vrednosti merjene intenzitete ima koeficient odbojnosti tarče, ki pa je nepoznan. Tudi teoretičnih vrednosti (Preglednica 6-1), ki se nanašajo na določen pojav, ne moremo uporabiti, ker nimamo in tudi ne moremo pridobiti vrednosti merjene intenzitete le za določen pojav (npr. ekstrakcija  $I_m$  le za polja ni mogoča). Enačbo (6-7) sedaj zapišemo:

$$I_m = f(R, \rho) \quad (6-8)$$

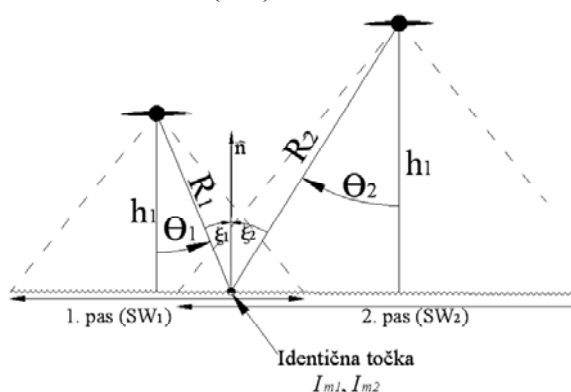
Ker se na obravnavanem območju (t.j. znotraj Lokacije 1 in 2) pojavljajo različne rabe tal (različni materiali), neposredne korelacije ob upoštevanju različnih ( $\rho$ ) med intenziteto odboja (na terenu) in razdaljo ni (Slika 6-9). Funkcije  $f$  v enačbi (6-8) se ne da določiti.



Slika 6-9: Grafa odvisnosti intenzitete od merjene razdalje.

V tem primeru upoštevamo dejstvo, da je odbojnost lastnost materiala posameznega pojava in bi zato morale imeti položajno **identične točke** (t.j. ležijo na istem pojavu), zajete v različnih lidarskih pasovih enake vrednosti  $\rho$  ( $\Delta\rho = 0$ ). Z analizo **razlik** merjenih vrednosti, ki se nanašajo na **identične terenske točke dveh pasov** ( $\Delta I_m, \Delta R$ )<sub>IDT</sub>, sem skušala zapisati **funkcijo** spreminjanja merjene intenzitete (torej znotraj določenega pojava) v odvisnost od spreminjanja razdalje senzor-tarča.

$$\Delta I_m = f(\Delta R), \Delta\rho = konst. \quad (6-9)$$



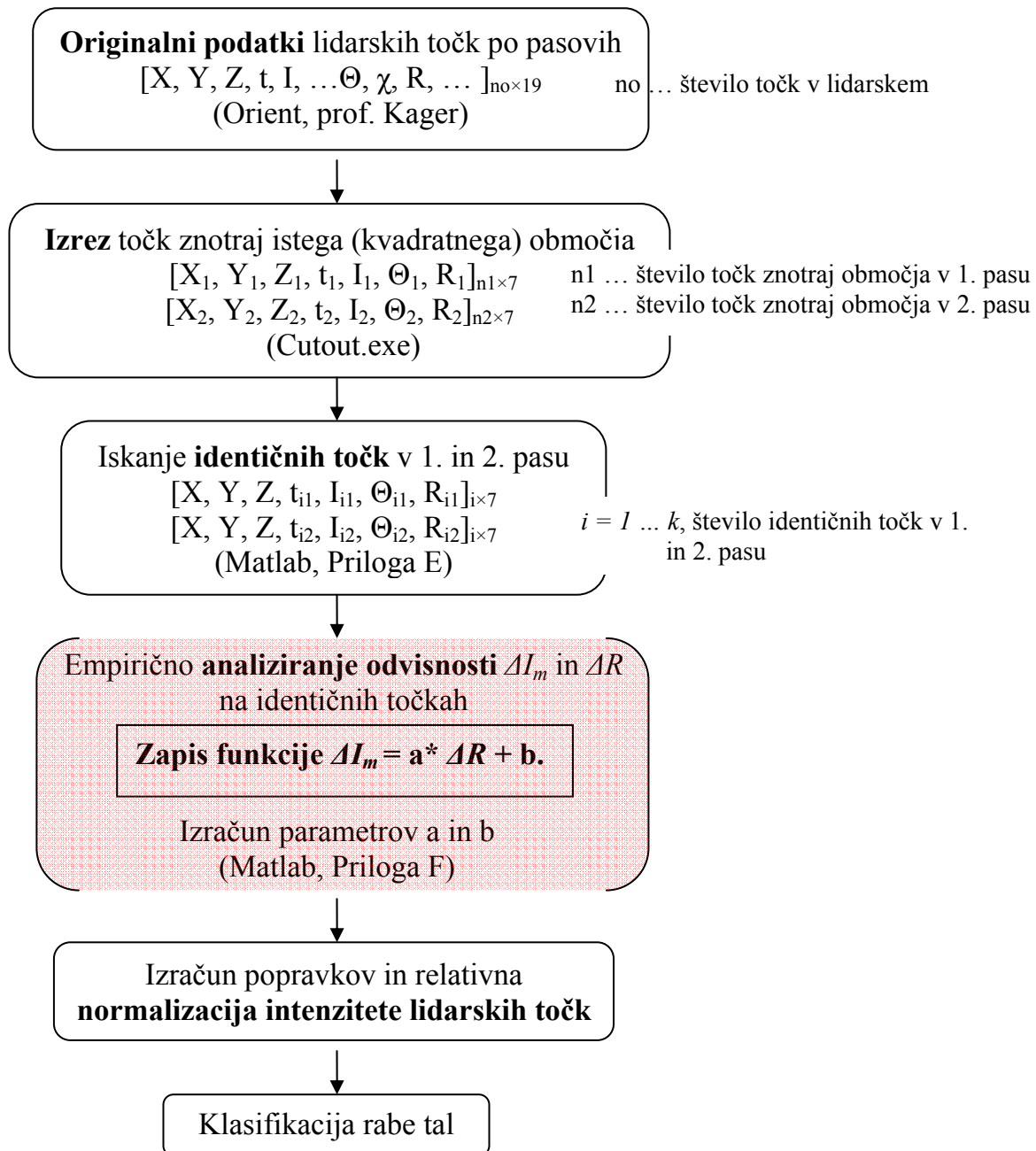
Slika 6-10: Skica geometričnih razmerji spremenljivk za identično točko v dveh lidarskih pasovih.

#### 6.6.4 Popravki merjene intenzitete za identične točke

S popravki vrednosti (merjenih) intenzitet, ki se nanašajo na identične točk prvega in drugega pasu (torej  $I_{IDT,1}^m$  in  $I_{IDT,2}^m$ ), moramo zadostiti pogoju, da so razlike normaliziranih intenzitet (identičnih točk prvega in drugega pasu) enake nič.

$$I_{IDT,1}^n - I_{IDT,2}^n = 0 \quad (6-10)$$

Potek empirične analize razlik spremenljivk za izračun normaliziranih vrednosti prikazuje spodnji diagram (Slika 6-11).



Slika 6-11: Diagram poteka empirične analize za normalizacijo intenzitete.

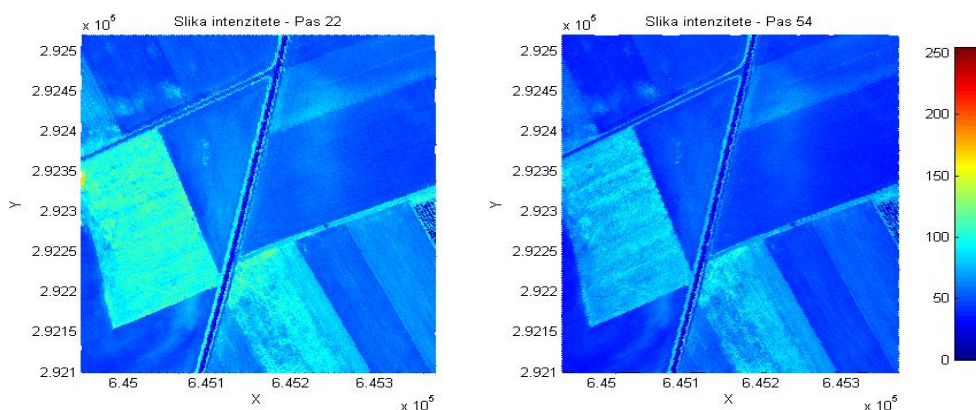
#### 6.6.4.1 Priprava podatkov lidarskih točk

Izračun polarnih koordinat za lidarske točke. Originalni podatki **polarnih koordinat lidarskih točk** (razdalja in kota skeniranja) uporabniku običajno niso na voljo. Za potrebe te analize jih je s programom ORIENT izračunal prof. Kager iz I.P.F. Podatki so dani za

Lokacijo 1 in Lokacijo 2 po pasovih. Datoteka vsebuje 19 podatkov (kolon) za vsako lidarsko točko.

**Izrez podatkov lidarskih točk**, ki ji potrebujemo za analizo intenzitete, znotraj manjših kvadratnih območji (na Lokaciji 1 in 2). S programom Cutout.exe (avtorica Maria Attwenger, I.P.F.) sem znotraj kvadrata velikosti<sup>1</sup> 420 m × 420 m iz dveh (prekrivajočih se) lidarskih pasov izrezala lidarske točke. Izhodne datoteke po pasovih vsebujejo podatke (kolone) (X, Y, Z, t,  $I_m$ ,  $\Theta$ , R) za vsako lidarsko točko.

Primerjava dveh slik intenzitete odbojev, ki prikazujeta isto območje izrezano iz podatkov dveh različnih lidarskih pasov (v nadaljevanju: par slik intenzitete odbojev), pokaže različne vrednosti (Slika 6-9).



Slika 6-12: Primerjava slik merjene intenzitete na istih območjih iz dveh pasov.

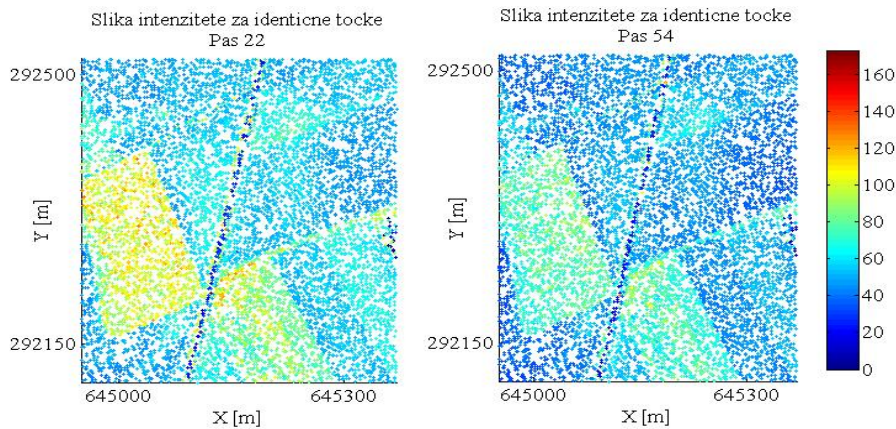
#### 6.6.4.2 Iskanje identičnih točk in analiza razlik spremenljivk

Za izbrano kvadratno območje imamo dva seta podatkov lidarskih točk. V programskem paketu Matlab sem napisala kodo (Priloga E), ki v obeh lidarskih pasovih poišče identične točke. Le-te po položaju (X,Y) med seboj niso oddaljene za več kot 10 cm (polmer odtisa laserskega žarka ima od 10 cm do 12,5 cm) in predpostavljam, da ležijo na istem pojavu (travniki, vinogradi, ...). Zato imata identični točki isto odbojnost (isti material) in bi morala biti (teoretično) **merjena intenziteta enaka**.

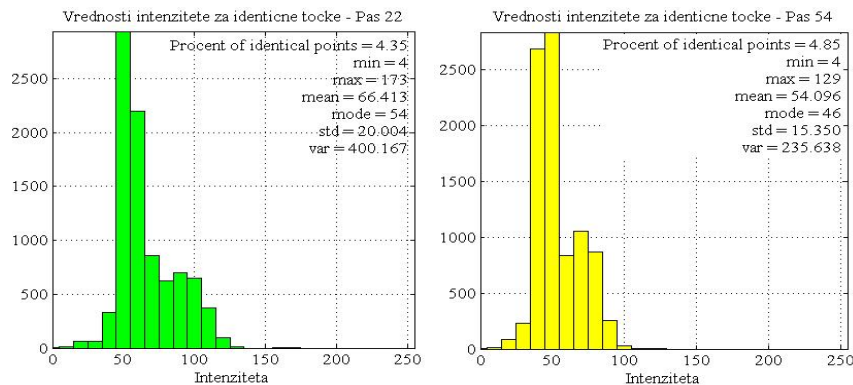
Dejansko se merjene **intenzitete na identičnih točkah** razlikujejo, kar je vidno s primerjavo slik intenzitete istega območja iz dveh pasov (Slika 6-13) in predstavljeno še s parom

<sup>1</sup> Velikost kvadrata je omejena s procesorsko močjo računalnika, s katerim v Matlabu iščem identične točke.

histogramov (Slika 6-14). S primerjanjem histogramov je opazen zamik vrednosti intenzitete 1. pasu glede na 2. pas (torej za identične točke).



Slika 6-13: Par slik intenzitete za identične točke.



Slika 6-14: Par histogramov z vrednostmi intenzitete za identične točke.

Sedaj lahko med identičnimi točkami izračunamo razlike merjenih spremenljivk in analiziramo njihovo odvisnost (empirično - z grafi).

- *razlika intenzitet* (Slika 6-15):  $\Delta I_i^m = I_{i,2}^m - I_{i,1}^m \quad i = 1, \dots, k$  (6-11)

- *razlika razdalj*:  $\Delta R_i = R_{i,2} - R_{i,1}$  (6-12)

Kjer so:

$k$  ... število identičnih točk v paru pasov;

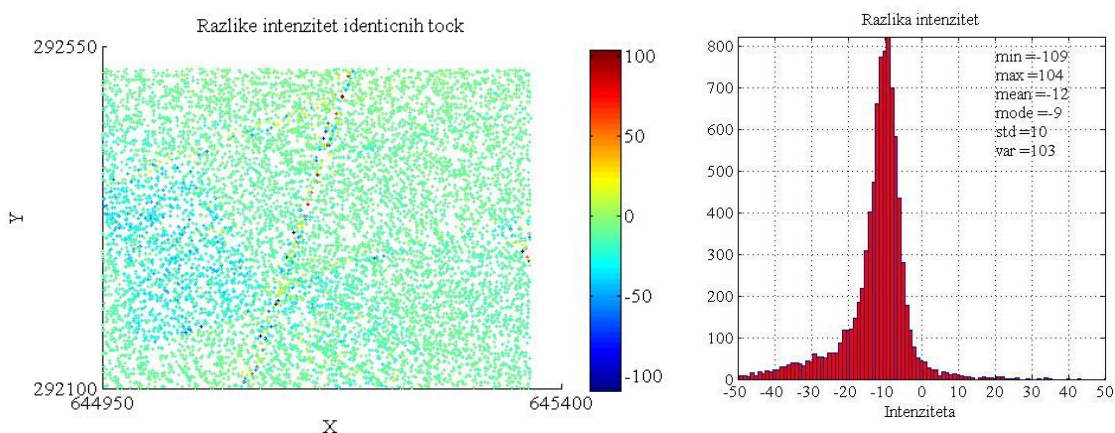
$\Delta I_i^m$  ... *razlika intenzitet* za identično točko  $i$ ;

$I_{i,1}^m$  oz.  $I_{i,2}^m$  ... vrednost intenzitete identične točke  $i$  v 1. pasu oz. 2. pasu;

$\Delta R_i$  ... *razlika razdalj* za identično točko  $i$ ;

$R_{i,1}$  oz.  $R_{i,2}$  ... merjena razdalja za identično točko  $i$  v 1. pasu oz. 2. pasu.

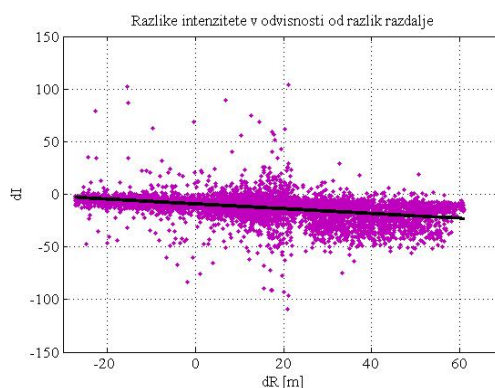
S prostorskim prikazom spremenljivke *razlika intenzitet*  $\Delta I_i^m$  (Slika 6-15), se vidijo pojavi, kjer vrednosti intenzitete najbolj variirajo. S histogramom pa je prikazana njena najpogostejša vrednost (vrh histograma). Izračunala sem še statistične vrednosti *razlike intenzitet*  $\Delta I_i^m$  (minimum, maksimum, srednjo razliko, najpogostejšo razliko, standardno deviacijo in varianco).



Slika 6-15: Slika razlike intenzitet in histogram razlik.

Ker razlike intenzitet za isto točko iz dveh lidarskih pasov ( $\Delta I_i^m$ ) niso enake pričakovani vrednosti nič, iščemo njeno funkcijsko odvisnost od spremenljivke  $\Delta R_i$  (enačba (6-9)).

Sprememba intenzitete na identičnih točkah v odvisnosti od različnih razdalj, ki jih je izmeril LS v dveh lidarskih pasovih, je prikazana na grafu (Slika 6-16).



Slika 6-16: Graf odvisnosti *razlike intenzitete* od *razlike razdalj*.

Za razliko od grafa odvisnosti *intenzitete* od *razdalje* (Slika 6-9), kjer ni nikakršne korelacije med spremenljivkama, kaže graf odvisnosti *razlike intenzitet* od *razlike razdalj* linearno odvisnost (Slika 6-16). Enačbo (6-9) sedaj zapišemo:

$$\Delta I_m = a * \Delta R + b \quad (6-13)$$

Ker sta **razliki**  $\Delta I_m$  in  $\Delta R$  izračunani s pomočjo **identičnih točk**, lahko neznana **parametra**  $a$  in  $b$  ocenimo z realizacijo vzorca identičnih točk, po metodi najmanjših kvadratov. Izračunana koeficienta  $\tilde{a}$  in  $\tilde{b}$  imenujemo regresijska koeficienta, premico  $\overline{\Delta I(\Delta R)} = \tilde{a} * \Delta R + \tilde{b}$  pa regresijska premica (Slika 6-16 - črna črta).

Vrednosti parametrov  $a$  in  $b$  natančneje določajo vpliv  $\Delta R$  na  $\Delta I_m$  in omogočajo izračun popravkov za merjene intenzitete (izračun sem izvedla v Matlabu, glej Priloga F).

### 6.6.5 Izračun popravkov in normalizacija intenzitete

S **parametroma a in b**, ki veljata za par lidarskih pasov iz katerih so bile izrezane identične točke, izračunamo popravke merjene intenzitete  $\overline{\Delta I(\Delta R)}$ . Popravki so **relativni**, saj se nanašajo na razlike razdalj  $\Delta R$ , zato se intenziteta enega *osnovega* pasu (angl. master) ne spremeni, intenziteti drugega *podrejenega* pasu (angl. slave) pa popravek prištejemo oz. odštejemo. Spodnji možnosti veljata v primeru, ko so razlike  $\Delta R$  izračunane kot vrednosti drugega pasu minus vrednosti prvega pasu (2. pas – 1. pas).

$$1. \text{ možnost: } I_2 \text{ (2. pas - osnovni)} \quad (6-14)$$

$$I_1 \rightarrow I_1^n = I_{m,1} + \overline{\Delta I(\Delta R)}$$

$$2. \text{ možnost: } I_1 \text{ (1. pas - osnovni)} \quad (6-15)$$

$$I_2 \rightarrow I_2^n = I_{m,2} - \overline{\Delta I(\Delta R)}$$

Parameter popravkov  $\Delta R$  je za identične točke izračunan po enačbi (6-12), za vse ostale točke (v *podrejenem* pasu) pa:

$$1. \text{ možnost: } \Delta R = \overline{R_2} - R_1 \quad (6-16)$$

$$2. \text{ možnost: } \Delta R = R_2 - \overline{R_1} \quad (6-17)$$

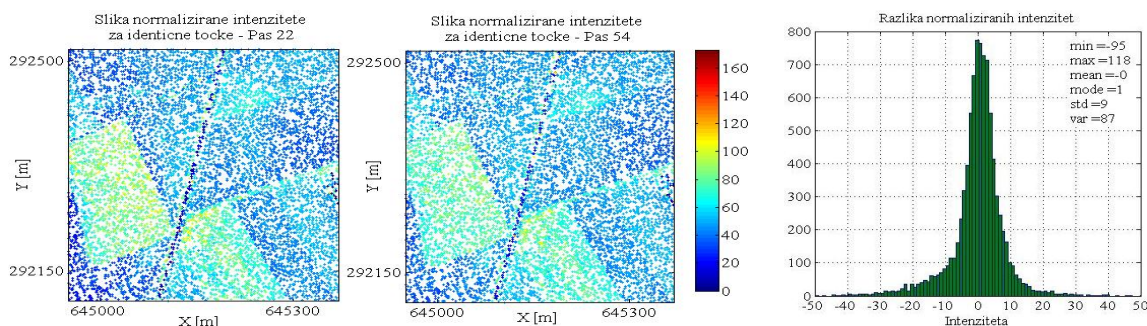
Kjer sta:

$\overline{R_1}$  oz.  $\overline{R_2}$  ... povprečna vrednost razdalj lidarskih točk v 1. oz. 2. pasu;

$R_1$  oz.  $R_2$  ... merjene razdalje lidarskih točk v 1. oz. 2. pasu.



Sliki relativno normaliziranih intenzitet identičnih točk sta sedaj enaki in je razlika vrednosti (normaliziranih) intenzitet enaka nič (Slika 6-17).



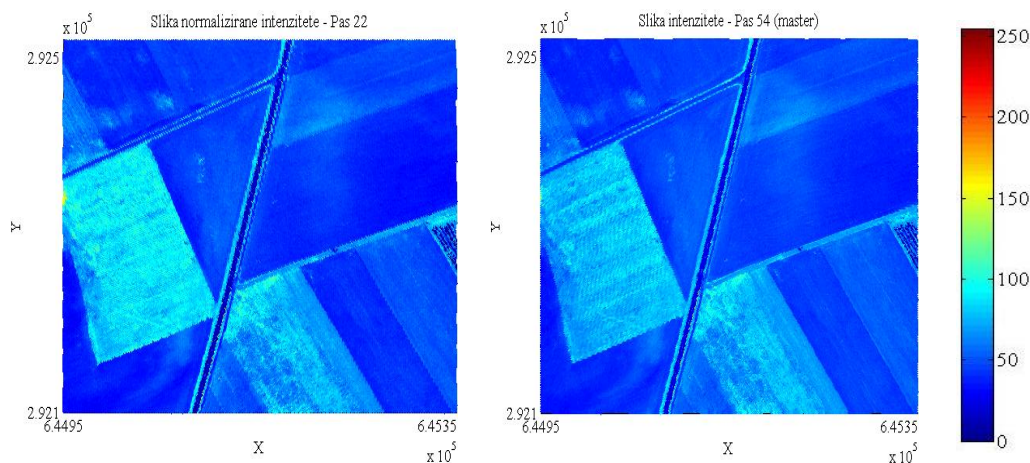
Slika 6-17: Primerjava slik normaliziranih intenzitet za identične točke in histogram razlik normaliziranih vrednosti.

Standardna deviacija normaliziranih razlik intenzitete se spremeni le za majhne vrednosti (10 pred in 9 po normalizaciji razlik). Dejansko so **normalizirane vrednosti podrejenega** pasu le zamaknjene glede na njegove **merjene vrednosti**, tako da je njihova razlika z intenziteto *osnovnega* pasu enaka nič. To potrjujeta (tudi) velikost parametrov *a* in *b*, kjer je *a*, s katerim je določen vpliv razlike razdalj, precej manjši od konstantnega člena (t.j. parametra *b*).

Preglednica 6-3: Pregled rezultatov normalizacije pasov 22 in 54 (*osnovni*) – za identične točke.

	1. pas: 22	2. pas: 54 ( <i>osnovni</i> )
Povprečna višina leta letala	1122,19 m	1137,01 m
Velikost območja	420 m × 420 m	
Število točk znotraj kvadrata	204.518	183.660
Število identičnih točk	8.902	
Povprečje merjene intenzitete $\overline{I_i^m}$	66	54
Razlika intenzitete $\Delta I_i^m$	-12 ± 10 (povprečje ± standardna deviacija)	
Parametra <i>a</i> in <i>b</i>	[-0,2278, -9,0596]	
Razlika relativno normalizirane intenzitete $\Delta I_i^n$	0 ± 9	
Povprečje relativno normalizirane intenzitete	54	54 ( <i>ostane</i> )

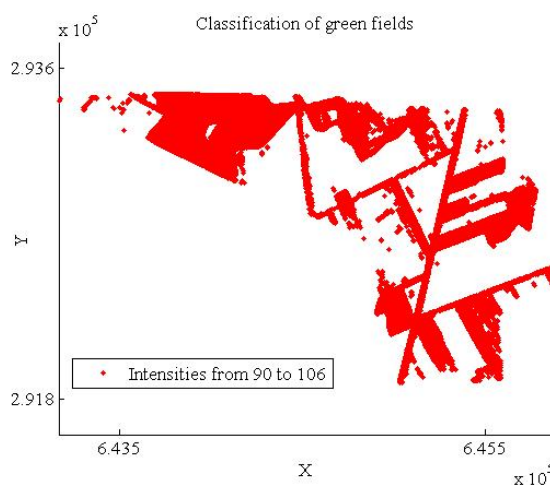
Sliki relativno normalizirane intenzitete (Slika 6-18) sta primerljivi s slikama merjene intenzitete (Slika 6-12). Vrednosti za osnovni pas (pas 54 – desna slika) so enake, barve na sliki *podrejenega* pasu (pas 22 – leva slika), pa so vidno spremenjene.



Slika 6-18: Primerjava slik relativno normalizirane intenzitete na istih območjih iz dveh pasov.

### 6.6.6 Klasifikacija pojavov

Po Katzenbeisser [2002] je za primerjanje merjenih intenzitet nujna njena **normalizacija na povprečno vrednost razdalje**. Z opisano relativno normalizacijo intenzitete s pomočjo identičnih točk sicer popravimo merjene vrednosti za spreminjanje razdalj  $\Delta R$  med pasovi in kot rezultat dobimo bolj **homogeno, natančno in jasno sliko intenzitete lidarskih točk** na zajetem območju. Vendar popravki skoraj ne vplivajo na spreminjanje intenzitete znotraj določenega pojava. Ker je razpon vrednosti intenzitete na določenem pojavu (npr. na travi) tako velik in se prekriva z vrednostmi drugih pojavov je klasifikacija neuspešna. Na sliki (Slika 6-19) so poleg željenih zelenih polj oz. travnikov prikazane še ceste in druga manjša območja oz. točke, ki sicer ležijo na polju.



Slika 6-19: Primer slike intenzitete za njene vrednosti od 90 do 106.

Čeprav so pojavi trava, orna zemlja in gramoz (pesek oz. prod) glede na rezultate raziskave v [Hasegawa, 2006] ločljivi med seboj, bi morala za natančnejšo in uspešnejšo klasifikacijo uporabiti dodatne podatke. Le laserske meritve ne zadostujejo. Drugače je npr. pri daljinskem zaznavanju z multisprektralno kamero, kjer z večimi barvnimi kanali pridobimo dovolj informacij za avtomatsko klasifikacijo.

### 6.6.7 Sklep

Na merjenje intenzitete oz. na same vrednosti meritev vplivajo mnogi faktorji kot so način registracije odboja v laserskem skenerju, stanje atmosfere, skozi katero potuje laserski žarek, vrsta materiala tarče in njen položaj, od kateri se je žarek odbil, merjenih polarnih koordinat tarče (razdalja in kot skeniranja), itd. Z različnimi laboratorijskimi eksperimenti ali glede na podatke, ki jih imamo na razpolago pri določenemu projektu, skušamo normalizirati vrednosti intenzitete za različne vplive, saj so le tako dejansko uporabne. Glede na raziskave drugih avtorjev naj bi bila intenziteta v največji meri odvisna od merjene razdalje senzortarča, odbojnosti materiala tarče in vpadnega kota. Ker je teren obravnavanega območja Neusiedler See raven, je vpadni kot enak kotu skeniranja, ki pa ima zanemarljivo majhen vpliv na merjeno intenziteto. Tudi podatkov o vrsti materiala torej o odbojnosti, ki jim pripadajo določene vrednosti intenzitete, ni bilo na voljo. Zato smo v tej analizi uporabili meritve na identičnih točkah dveh prekrivajočih se pasov. Razlike merjenih razdalj za identične točke so v največji meri posledica razlike višin leta nosilca, ki je konstantna. Zato so tudi intenzitete med seboj le zamaknjene za neko konstantno vrednost. Z relativno normalizacijo vrednosti intenzitete vseh vzdolžnih pasov (*podrejeni*) glede na prečni pas (*osnovni*), kot so bili zajeti v projektu Neusiedler See (Slika 4-5), bi bila slika intenzitete vseh prekrivajočih se lidarskih pasov bolj homogena in jasna. V prihodnji analizi, bi bilo potrebno raziskati spreminjanje intenzitete znotraj določenega pojava (ne le relativno, glede na osnovni pas). Korelacija med intenziteto in razdaljo, ki je za raven terena funkcija kota skeniranja (višina leta je konstantna), bi bila določena neposredno za določen pojav in bi preko izračunanih popravkov intenzitete omogočala natančnejšo (avtomatsko) klasifikacijo pojavov. Za ekstrakcijo vrednosti intenzitete, ki pripadajo določenemu pojavu, bi potrebovali dodatne informacije o položaju pojava v oblaku lidarskih točk. Le-te so dane npr. z digitalnim ortofotom, s katastrskimi podatki meja, terenskimi meritvami, itd.

## 7 ZAKLJUČEK

Ob prebiranju množice literature o tehnologiji ZLS in spremljanju dela na I.P.F. Dunaj sem spoznala kako številne in raznovrstne so raziskave na tem področju. V diplomski nalogi so podane le osnove ZLS, iz katerih pa se je do danes razvilo oz. se razvija mnogo podrobnih obravnav in različnih teorij, ki se nanašajo na razvoj merskih sistemov in izbor primernih parametrov, (avtomatsko) obdelavo podatkov in izboljšanje njihove natančnosti ter optimalno uporabo izdelkov za različne namene.

S preizkušanjem programa *sigmaDTM.exe* na podatkih projekta Neusiedler See lahko ugotovimo njegovo praktično uporabnost in preprosto delovanje, katerega rezultat pa je celovit in podroben opis kakovosti DMR-ja. Vizualizacija rezultatov programa *sigmaDTM.exe* (t.j. digitalnih modelov izračunanih lokalnih parametrov kakovosti DMR-ja) v programu *SCOP++* omogoča nazorno predstavitev kakovosti DMR-ja. Težje je oblikovati lestvice za barvno kodiranje vrednosti parametrov, da so slike razumljive in lahko na njih določimo (oz. ločimo) območja boljše in slabše kakovosti. V moji analizi sem razrede barvne lestvice za posamezen parameter določila s pomočjo v Matlabu izračunanih histogramov, ki prikazujejo porazdelitev vrednosti lokalnih parametrov.

Po pričakovanjih je DMR na območju Neusiedler See zelo natančen. Največja vrednost standardne deviacije DMR-ja je na območju gozda, kjer je nekaj višin točk mreže določenih slabše kot 3 cm. Razlog za dobro kakovost DMR-ja so uporabljeni lidarski podatki, ki so bili skrbno georeferencirani in tako brez sistematičnih napak. Njihova povprečna natančnost je le malo slabša od apriori določene natančnosti 5 cm (razen za območje *gozd*). Druga dva razloga pa sta skoraj raven teren in enostavno površje (ni večjih zgradb ali goste vegetacije). Nagnjenost terena in njegovo spreminjanje v veliki meri vplivata na višinsko natančnost DMR-ja. Velik vpliv na kakovost DMR-ja imajo še zgradbe in vegetacija, kar je najbolj razvidno iz slabših rezultatov na obravnavanem območju *gozd*. Ker je zgradb in goste vegetacije na celotnem območju projekta Neusiedler See malo, ima DMR posledično visoko natančnost. Ravno zaradi ravninskosti in majhnega števila objektov na zajetem območju

Neusiedler See, pa bi bilo potrebno preveriti planimetrično natančnosti modela. Ta postopek še ni operativen in je predmet prihodnjih raziskav.

Obravnavana metoda določitve kakovosti DMR-ja za vsako točko mreže obljublja obetajoče rezultate in izpolnjuje zahtevo po jasnem in uporabniku razumljivem podajanju informacij. V prihodnosti bi morali zagotoviti posredovanje podatkov o kakovost DMR-ja skupaj z modelom; najlažje v obliki podatkovnih slojev (angl. **quality layers**). Le-ti bi vsebovali vrednosti predstavljenih lokalnih parametrov. Najpomembnejši podatkovni sloj je standardna deviacija za vsako točko mreže, ki vsebuje podatke o **relativni natančnost**. Gostota točk in razdalja med točko mreže in njej najbližjo originalno točko pa podajata **zanesljivost** DMR-ja na posamezni točki mreže.

Če je bila v preteklosti meritev intenzitete zanemarjena, jo sedaj raziskujejo z različnimi eksperimenti. Že preprost prikaz vrednosti intenzitete v črno-beli sliki jasno pokaže različne objekte in pojave na skeniranem površju. Vendar je neposredna uporaba teh meritev za dejansko identifikacijo in nadalje klasifikacijo objektov nemogoča, kot se je izkazalo tudi v moji analizi. Prvi razlog je v uporabljenem laserskem senzorju, ki je monokromatičen in so podatki zajeti le v eni barvi t.j. z eno ozko valovno dolžino. Drugi razlog pa je, da so vrednosti intenzitete zaradi različnih vplivov popačene. Na primeru Neusiedler See podatkov se intenziteta točk, ki ležijo na zgradbah, zelo spreminja. In sicer zaradi različne orientacije nagnjenih streh in s tem spreminjanja vpadnega kota laserskega žarka. Ker je modeliranje vpadnega kota zapleteno, smo obravnavali le intenziteto terenskih točk. Ob predpostavki, da je teren raven in da lidarske točke iz dveh prekrivajočih se pasov ležijo na istem pojavu t.j. imajo isto odbojnost, smo z analizo razlik meritev na identičnih točkah prvega in drugega pasu ugotovili linearno odvisnost merjenih intenzitet od merjene razdalje. Pridobljena linearna funkcija omogoča izračun popravkov, ki se nanašajo na razliko merjenih razdalj (pas 1 – pas 2). Z normalizacijo vrednosti intenzitete *podrejenega* pasu glede na *osnovni* pas, ki ostane nespremenjen, je slika intenzitete prekrivajočih se lidarskih pasov bolj homogena in jasna. Izračunani koeficienti v linearni funkciji kažejo, da so vrednosti intenzitete med pasovi v največji meri zamaknjene za neko konstantno vrednost in ima sprememba razdalje manjši vpliv. V primeru odboja žarka na istem pojavu ter na ravnem terenu je njegova intenziteta tako odvisna predvsem od višine leta nosilca merskega sistema. Za potrditev te ugotovitve, bi

morali v prihodnje postopek preizkusiti na več območjih prekrivajočih se pasov, ki bi imeli različne višine leta. Naslednji korak pri iskanju vplivov na intenziteto, je uporaba točk na nagnjenem terenu. Pričakujemo lahko večji vpliv razlik merjene razdalje. V tem primeru bi bilo potrebno za uspešno normalizaciji upoštevati vpadni kot žarka na površje.

V raziskavi Hasegawa [2006] je dokazano, da se na podlagi vrednosti merjenih intenzitet lahko loči pojave kot so trava, orno polje in gramoz/pesek. Vendar je glede na rezultate moje analize identifikacija pojavov le na podlagi lidarskih podatkov kljub relativni normalizaciji še vedno nemogoča. Potrebovali bi dodatne informacije o zajetem območju, ki jih pridobimo npr. iz digitalnega ortofota, katastrskih mej, itd. Z ročno ekstrakcijo pojavov in njim propadajoče normalizirane intenzitete bi lahko določili tipične vrednosti intenzitete, ki bi služile za (avtomatsko) klasifikacijo teh pojavov.

S podatki o vrednosti intenzitete le za določen pojav (npr. asfaltirano cesto, kjer se intenziteta najmanj spreminja) bi lahko ponovno izvedli analizo vplivov na intenziteto. Pri izračunu novega modela odbojnosti (oz. normalizirane intenzitete) bi lahko upoštevali še spreminjanje vpadnega kota žarka na teren in natančneje določili vpliv merjenih razdalj (preko razlik med pasovoma). Pričakujemo, da bi nove normalizirane vrednosti intenzitete izboljšale proces klasifikacije.

## LITERATURA IN VIRI

### Uporabljeni viri

Ackermann, F. 1999. Airborne laser scanning – present status and future expectations. PE&RS 54: 64-67.

ALTM 2050 Airborne Laser Terrain Mapper. Podroben opis sistema. 2002. Toronto, podjetje Optech v Kanadi.

Attwenger, M. 2005. ALS Project Neusiedler See / Seewinkel National Park. Predstavitev na: University Course: Laser scanning - Data Acquisition and Modeling. Institute of photogrammetry and remote sensing, TU Vienna, 6. 10.-7. 10. 2005.

Attwenger, M., Chlaupek, A. 2006. Erstellung eines grenzüberschreitenden digitalen Geländemodells im Nationalpark Neusiedler See-Seewinkel/Fertő Hanság aus Laserscanner-Daten. Strobl, J. (ur), Blaschke, T. (ur), Griesebner, G (ur). Angewandte Geoinformatik 2006, Beiträge zum 18. AGIT-Symposium. ISBN3-87907-437-2: 16 – 23.

Attwenger, M., Chlaupek, A., Ressler, C. 2006. Berechnung des digitalen Gelände- und Oberflächenmodells Analyse des digitalen Geländemodells Orthophoto-Berechnung. Popočilo projekta. I.P.F. TU Dunaj.

Axelsson, P. 1999. Processing of Laser scanner data - algorithms and applications. ISPRS-Journal 54, 2-3: 138-147.

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

Baltsavias, E.P. 1999b. Airborne Laser scanning: basic relations and formulas. ISPRS-Journal 54, 2-3: 199-214.

Briese, Ch., Pfeifer, N. 2001. Airborne Laser Scanning and Derivation of Digital Terrain Models. V: Grün/Kahmen (ur.). Optical 3-D Measurement Techniques V: 80 - 87.

Briese, Ch., Pfeifer, N., Dorninger, P. 2002. Applications of the Robust Interpolation for DTM determination. Talk: Symposium der ISPRS-Comm. III, Graz; 09-09-2002 - 09-13-2002. IAPRS, Volume XXXIV / 3A: 55 - 61.

Briese, Ch. 2004. Breakline Modelling from Airborne Laser Scanner Data. Doktorska disertacija. Wien, TU Wien. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.

Burman, H. 2000. Calibration and Orientation of airborne image and laser scanner data using GPS and INS. Doktorska disertacija. Sweden, Royal Institute of Technology Department of Geodesy and Photogrammetry Stockholm.

Coren, F., Sterzai, P. 2005. Radiometric correction in laser scanning. Članek posredovan po elektronski pošti (24.10.2006).

Cramer, M. 1997. GPS/INS Integration. V: Fritsch/Hobbie (ur.). Photogrammetric Week 1997. Stuttgart, Germany: 1-10.

Cramer, M. GPS/inertial-Daten in der Luftbildphotogrammetrie. Stuttgart, Institut für Photogrammetrie.  
<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/forschung/photo/georef-Dateien/georef.html> (21.11.2005).

Filtering and Classification of Laser Scanner Data. EuroSDR Distance Learning Course, Airborne Laserscanning and Interferometric SAR. Vienna, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, 01.06.2004.  
<http://www.ipf.tuwien.ac.at/euroedr/index.htm> (12.3.2006)

Gajski, D. 2004. Rasterbasierte Geländeoberflächenanalysen. Doktorska disertacija. Dunaj, Tehnična Univerza Dunaj, Fakulteta za matematiko in geoinformacijo.

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> (8.12.2006)

Herzig, A., Horvath, D., Kraus K., Naumann K. 2002. Ein Beitrag zur Renaturierung des Nationalparks Neusiedler See-Seewinkel/Fertö-Hanság mit Hilfe von Laserscanning. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 90. Jahrgang (2002), Heft 2/2002; 34 - 42.

Horvath, D. 2001. Ein Geländemodell aus Laser-Scanner-Daten als Grundlage eines Informationssystems für den Nationalpark Neusiedler See-Seewinkel. Diplomski naloga. Austria, Technischen Universität Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.

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.

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](http://www.aamhatch.com.au/resources/pdf/publications/technical_papers/11arspc_jonas.pdf) (9.12.2006)

Kager, H., Kraus, K. 2001. Height Discrepancies between Overlapping Laser Scanner Strips. In Grün/Kahmen (Eds.). Optical 3-D Measurement Techniques V: 103-110.

Kager, H. 2003. Simultaneous Georeferencing of Aerial Laser Scanner Strips. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang (2003), 4: 235 - 242.



Kager, H. 2004. Discrepancies Between Overlapping Laser Scanning Strips- Simultaneous Fitting of Aerial Laser Scanner Strips. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing XXth Congress. Istanbul, 07-12-2004: 07-23.

[http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/ISPRS\\_2004\\_Istanbul/Aerial\\_Laser\\_hk.pdf](http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/ISPRS_2004_Istanbul/Aerial_Laser_hk.pdf)

(8.12.2006)

Kager, H. 2005. Quality check and georeferencing of aerial laser scanner strips. At University Course: Laser scanning - Data Acquisition and Modeling. Institute of photogrammetry and remote sensing, TU Vienna, 6. 10.-7. 10. 2005.

Karel, W. 2005. Quality Parameters of Airborne Laser Scanner Projects: Results and Discussion. Presentation on University Course: Laser scanning - Data Acquisition and Modeling. Institute of photogrammetry and remote sensing, TU Vienna, 6. 10.-7. 10. 2005.

Karel, W., Kraus, K. 2006. Quality parameters of digital terrain models. V: Höhle, J. (ur.). Seminar on Automated Quality Control of Digital Terrain Models. Aalborg, Denmark. EuroSDR. In press.

[http://www.land.aau.dk/~jh/dtm\\_checking/SpecialContribution.pdf](http://www.land.aau.dk/~jh/dtm_checking/SpecialContribution.pdf) (8.12.2006)

Karel, W., Pfeifer, N., Briese, C. 2006. DTM quality assessment. Talk: ISPRS Technical Commission Symposium. Vienna; 07-12-2006 - 07-14-2006. In: ISPRS Technical Commission II Symposium 2006, International Archives of the ISPRS, XXXVI/2 (2006), 1682-1750: 7 - 12.

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

<http://www.toposys.com/pdf-ext/Engl/echo-detec3.pdf> (8.12.2006)

Katzenbeisser, R. 2002. Intensity. Technical note. TopoSys GmbH Ravensburg.

<http://www.toposys.com/pdf-ext/Engl/TN-Intensity.pdf> (8.12.2006)

Kocaman, S. 2003. GPS and INS Integration with Kalman Filtering for Direct Georeferencing of Airborne Imagery. Geodetic seminar report. ETH Hönggerberg, Zürich Institute of Geodesy and Photogrammetry.

Kraus, K. 1997. Eine neue Methode zur Interpretation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 85. Jahrgang, Heft 1: 15 – 30.

Kraus, K. 2000. Photogrammetrie : Topographische Informationssysteme. Band 3. Dümmler Verlag, Bonn: 516 str.

Kraus, K. 2004. Photogrammetrie : Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Band 1. Walter de Gruyter, Berlin: 516 str.

Kraus K. 2005. Quality parameters of airborne laser scanning projects. Presentation on University Course: Laser scanning - Data Acquisition and Modeling. Institute of photogrammetry and remote sensing, TU Vienna, 6. 10.-7. 10. 2005.

Kraus, K., Ressler, C., Roncat, A. 2006. Least Squares Matching for Airborne Laser Scanner Data. Talk: Turkish-German Joint Geodetic Days, Berlin (invited); 03-29-2006 - 03-31-2006. In: Fifth International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days . Geodesy and Geoinformation in the Service of our Daily Life. Gründig, L., Altan, O. (ed.). ISBN 3-9809030-4-4: 7 p.

Kraus, K., Pfeifer, N. 1997. A new method for surface reconstruction from laser scanner data. IAPRS Vol XXXII, 3/2W3. Haifa, Israel: 80-86

Kraus, K., Pfeifer, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne Laser scanner data. ISPRS-Journal 53, 4/1998: 193-203.

Kraus, K., Pfeiffer, N. 2001. Advanced DTM Generation from Lidar Data. IAPRS, Volume XXXIV-3/W4. Annapolis, Maryland.

Laserscannermessung mit zeitgleicher digitaler Bilddatenerfassung Neusiedler See. Tehnično poročilo o projektu. Marec 2005. Podjetje TopScan.

Lindenberger, J. 2006. Re: intensitet als (online). Message to: Attwenger, M. 24. marec 2006. Osebna komunikacija.

Lohmann, P., Koch, A. 1999. Quality Assessment of Laser-Scanner-Data. In proceedings of ISPRS workshop "Sensors and Mapping from Space 1999".

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: Svartisheibreen, Norway). In: IAPRS, 34(3/W 13). Dresden: 143 - 148.

[http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop\\_laserscanning/papers/Lutz\\_ALSDD2003.pdf](http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/Lutz_ALSDD2003.pdf) (9.12.2006)

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

Mandlbürger, G. 2005. Derivation of Terrain Model from ALS data. Presentation on University Course: Laser scanning - Data Acquisition and Modeling. Institute of photogrammetry and remote sensing, TU Vienna, 6. 10.-7. 10. 2005.

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.

Petzold, B. 1999. DTM Determination by Laser-Scanning – An Efficient Alternative. OEEPE Workshop on Automation in Digital Photogrammetric Production. Marne la Vallée, France, June 22-24, 1999.

Pfeifer, N., Köstli, A., Kraus, K. 1998. Interpolation and filtering of laser scanner data - implementation and first results. IAPRS Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part 3=1. Columbus, OH, USA.

Pfeifer, N., Stadler, P., Briese, Ch., 2001. Derivation of digital terrain models in the SCOP++ environment. Proceeding of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models, Stockholm, Sweden.

Skaloud, J. 1999. Optimizing Georeferencing of Airborne Survey Systems by INS/DGPS. Ph.D. Thesis. Calgary, Alberta, The Uni. of Calgary, Dept. of Geomatics Engineering.

Software Manual for SCOP++ Version 5.3.2 and higher. I.P.F. TU Dunaj 2006. Literaturo sem dobila med študijem na I.P.F Dunaj.

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.

Sterzai, P. 2006. Vprasanja glede clanka in enache (online). Message to: Bitenc, M. 15. oktober 2006. Osebna komunikacija.

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

Wagner, W. 2005. Physical Principles of Airborne Laser Scanning. Paper from University Course: Laser scanning - Data Acquisiton and Modeling. Institute of photogrammetry and remote sensing, TU Vienna, 6. 10.-7. 10. 2005.

Wehr, A., Lohr, U. 1999. Airborne Laser Scanning - an introduction and overview. ISPRS-Journal 54, 2-3/1999: 68-82.

Wehr, A., Lohr, U., Baltsavias, E.P. 1999. Editorial – The issue on airborne laser scanning. PE&RS 54: 61-63.

#### **URL naslovi:**

[SISTEMaPARC1] Spletna stran projekta SISTEMaPARC:

<http://www.tu-dresden.de/sistemaparc/project.html> (17.4.2006)

[SISTEMaPARC2] <http://www.geoway.de/sistemaparc/index.php?javascript=enabled>  
(17.4.2006)

[Airbornelasermapping]

<http://www.airbornelasermapping.com/ALMSkinny.html#Applications> (15.11.2006)

[AeroMap] <http://www.aeromapss.com/lidar.htm> (15.11.2006)

[TopoSys] <http://www.toposys.com> (15.11.2006)

[Helica] <http://www.helica.it/eng/prod/applic.asp> (15.11.2006)

[ALTM] <http://www.optech.ca/altmapps.htm> (15.11.2006)

[ALTM Gemini] <http://www.optech.ca/pdf/Brochures/ALTM-GEMINI.pdf> (23.11.2006)

[Riegl LMS-Q560] [http://www.riegl.com/airborne\\_scanners/lms\\_q560/\\_q560\\_all\\_.htm](http://www.riegl.com/airborne_scanners/lms_q560/_q560_all_.htm)  
(26.11.2006)

[Wikipedija] [http://en.wikipedia.org/wiki/Yaw%2C\\_pitch\\_and\\_roll](http://en.wikipedia.org/wiki/Yaw%2C_pitch_and_roll) (10.12.2006)

## Ostali viri

Briese, Ch. 2000. Digitale Modelle aus Laser-Scanner-Daten in städtischen Gebieten. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien.

Favey, E., Cerniar, M., Cocard, M., Geiger, A. 1999. Sensor Attitude Determination Using GPS Antenna Array and INS. ISPRS WG III/1 Workshop: Direct versus Indirect Methods of Sensor Orientation. Barcelona, 25-26 november 1999.

Herzig, A., Horvath, D., Kraus K., Naumann K. 2002. Ein Beitrag zur Renaturierung des Nationalparks Neusiedler See-Seewinkel/Fertő-Hanság mit Hilfe von Laserscanning. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 90. Jahrgang (2002), Heft 2/2002: 34 - 42.

Kraus, K., 1997. Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung von Daten mit einer schiefen Fehlerverteilung. Österreichische Z. Vermessungswesen Geoinform. 1: 25–30.

Kraus, K., Pfeifer, N., 1997. A new method for surface reconstruction from laser scanner data. In: IAPRS, Vol. XXXII, Part 3-2W3. Haifa, Israel: 80–86.

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

O'Hagan, B. 2002. Intensity returns a whole new image. Scanning Horizons, issue 13, February/March 2002.

Petzold, B., Reiss, P., Stossel, W. 1999. Laser scanning - surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. PE&RS 54: 95-104.

Pfeifer, N. 2002. 3D Terrain Models on the Basis of a Triangulation. Ph. D. thesis. Vienna, University of Technology.

Pfeifer, N., Oude Elberink, S., Filin, S. 2005 Automatic tie elements detection for laser scanner strip adjustment. IAPRS Vol XXXVI, 3/W3. Proceedings of Laserscanning 2005, Enschede, The Netherlands.

Resnik, M. 2005. Analiza uporabnosti CPAS metode aerotriangulacije v projektu Cikličnega aerosnemanja v Sloveniji. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Geodetske smer: 95 str.

Triglav Čekada, M. 2004. Lasersko skeniranje: osnove, analitični model in obnašanje napak pri aerolaserskih sistemih. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, podiplomski študi geodezije.

Triglav Čekada, M. 2005. Naročanje zračnega laserskega skeniranja. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, podiplomski študi geodezije.

## PRILOGE

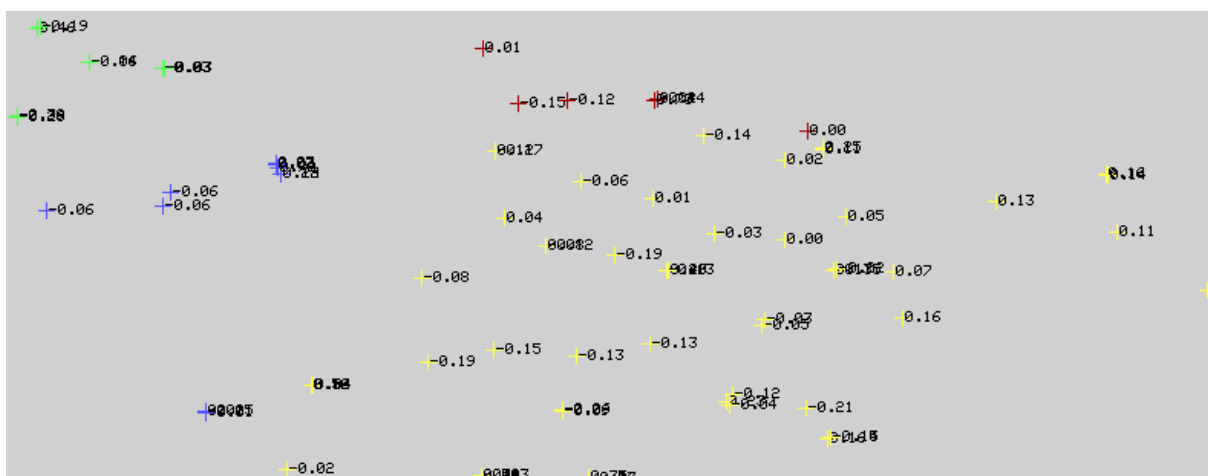
### Priloga A: Določitev absolutne natančnosti DMR-ja z uporabo triangulacijskih točk

Maria Attwenger (I.P.F. Dunaj) je izvedla kontrolo absolutne (zunanje) kakovosti DMR-ja na južnem delu območja projekta Neusiedler See. V ta namen je uporabila triangulacijske točke Avstrijske geodetske mreže. Njihove koordinate je posredovala uprava "Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen". Natančnosti položaja teh točk je ocenjena na  $\pm 5$  cm.

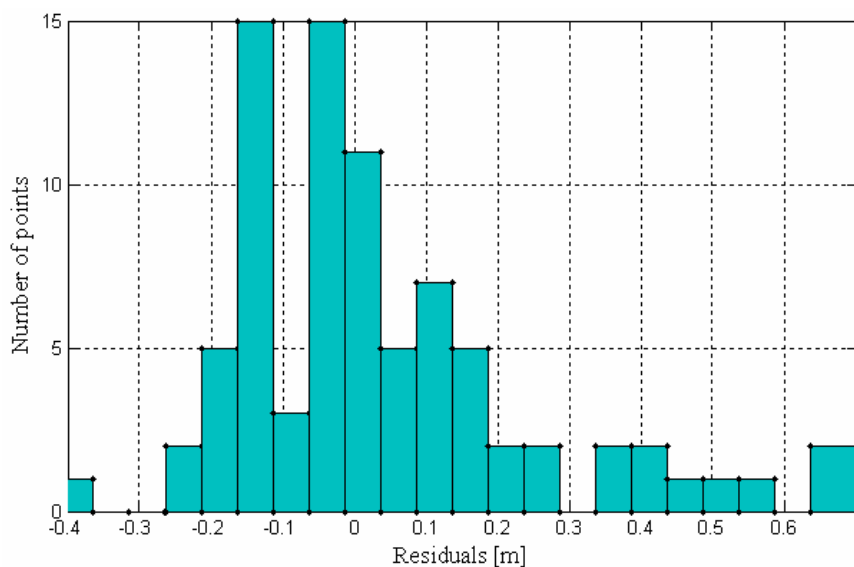
Skupno je bilo uporabljenih 82 točk iz štirih mapnih listov (nem. »Mappenblätte«).

Številka lista	Število točk
78	8
79	8
108	11
109	55
vsota	82

Na omenjenem južnem območju zajema lidarskih točk je sicer več triangulacijskih točk. Vendar so bile izbrane le tiste točke, ki so stabilizirane na tleh in tako lažje primerljive z izračunanim DMR. Njihov planimetrični položaj in višinska odstopanja glede na DMR so prikazana na spodnji sliki:

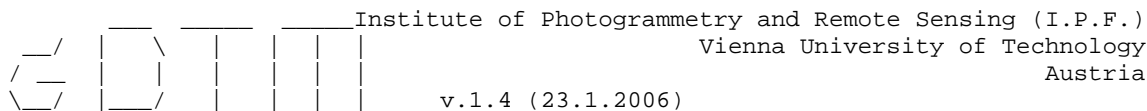


Za boljšo predstavitev velikosti višinskih odstopanj na točkah je spodaj prikazan histogram razlik:



Nekatera velika odstopanja so lahko pojasnjena s pregledom načina stabilizacije točke in se tako pojavljajo v primeru stabilizacije na zunanjo steno objekta ali na nižji opornik. Drugi razlog pa je mesto postavitve točke npr. na gramozni cesti, kjer je lahko prišlo do premika točke.

## Priloga B: Uvodno besedilo programa *sigmaDTM.exe*



Program to compute the expected z-accuracy of each grid point of an RDH. The computation is done with the neighbours of each grid point, these are:

- max. k neighbouring points (KD-tree), ev. not behind breaklines
- + the points of max. k lines (R-tree), ev. not behind breaklines.

Option q affects the search for neighbouring points (KD-tree) only:

- if used, k/4 points are searched in the 4 quadrants of each grid point.

The resulting accuracy is the product of the

- RMSE with reference to the DTM and the
- cofactor in z-direction of an adjusting plane deduced from the neighbours.

These points are weighted both in RMSE and cofactor computation according to the distance to the respective grid point and the curvature at the grid point in the direction to the data point (or vice versa, see -c).

If sigma a priori is set and RMSE results to be smaller, it is replaced by sigma a priori.

If maxDist2DataFactor is set and none of the distances (grid point - data pt.) is smaller than maxDist2DataFactor\*gridWidth(input DTM), then sigmaDTM is set to -1.0

The resulting RDH owns the gridWidth of the input DTM \* reductionFactor. Where sigmaDTM cannot be computed, it is set to -1.0

usage:

input:

- d <filename> DTM to evaluate (RDH)
- i <filename> Original data
- f <int> Input data format (0->XYZ; 1->WINPUT) [according to file ext.]

processing parameters:

- k <int> Number of neighbours [12]
- q <0|1> Search toggle 1 -> k/4 neighbours in each grid point's quadrant [def] 0 -> Circular search for k neighbours
- s <float> Sigma a priori; set negative to avoid its usage [0.05]
- m <float> MaxDist2DataFactor [7.0]
- r <int> ReductionFactor [1]
- b <0|1|1> Consider breaklines, if there are any (0->No;1->Yes) [1]
- c <0|1> Curvature toggle 1 -> Take curv. at data towards grid point [1] 0 -> "=" grid "=" data point

output:

- o <filename> output RDH with sigmaDTM as heights [<input>\_sigma.dtm]
- x <int> Output format (0->ArcInfo Grid;1->RDH) [1]
- a <0|1> Write additional outputs (0->No;1->Yes): [0/No]

cofactors: <input>\_cofac  
RMSE: <input>\_rmse RMSE=sqrt([vvp]/[weights])  
dist. to nearest data point: <input>\_dist2data  
maximum main curvature: <input>\_maxMain

-d and  
-i are mandatory





```
+++++ Pak: -8MB 09.391
+++++ Pak: -4MB 41.578
+++++ Pak: -9MB 43.891
+++++ Pak: -6MB 45.297
+++++ Pak: -12MB 44.968
+++++ Pak: -9MB 51.625
+++++ Pak: -13MB 57.813
+++++ Pak: -18MB 42.406
+++++ 41.859
Finished: 16:40:19 Duration: 08:18.750
```

Creation of output RDHs...

Started: Nov 16:40:19

656-284\_sigma.dtm

-> 1549124 grid points set.

656-284\_cofac.dtm

-> 1549124 grid points set.

656-284\_rmse.dtm

-> 1549124 grid points set.

656-284\_dist2data.dtm

-> 4004001 grid points set.

656-284\_maxMain.dtm

-> 1549225 grid points set.

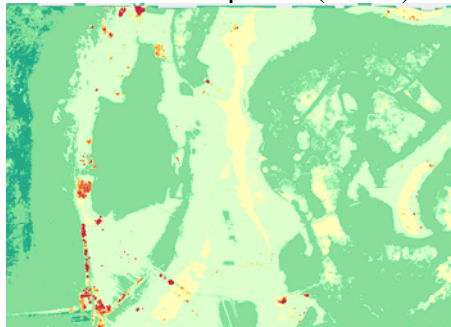
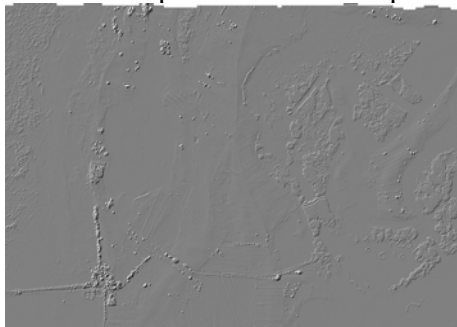
Finished: 16:41:05 Duration: 00:46.203

SigmaDTM finished. Overall computing time: 11:11.187

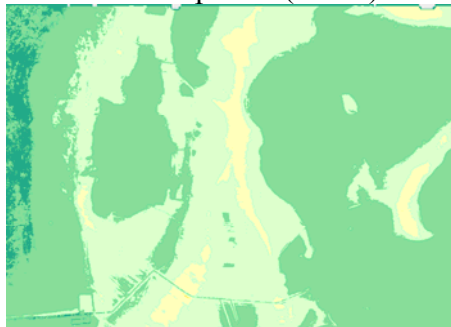
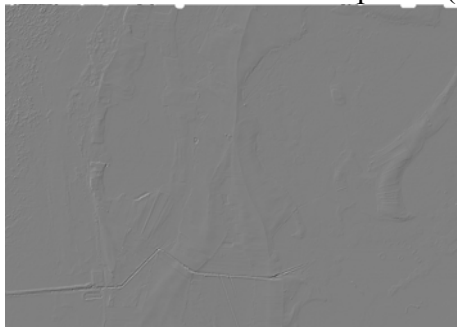
## Priloga D: Rezultati analize kakovosti DMR-ja z lokalnimi parametri

### Priloga D1: Rezultati za območje *Trsje*

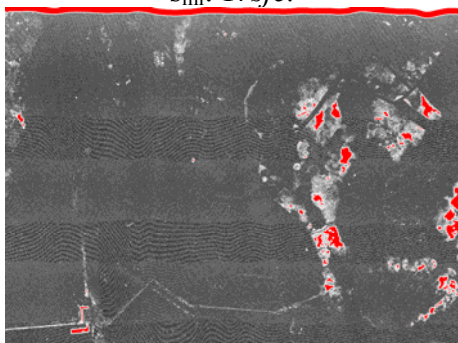
Digitalni model površine: senčni prikaz (levo) in barvno kodiran prikaz (desno).



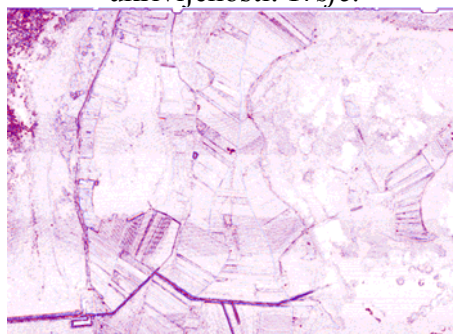
Digitalni model terena: senčni prikaz (levo) in barvno kodiran prikaz (desno).



Barvno kodirani model najmanjših razdalj  
Smi: *Trsje*.



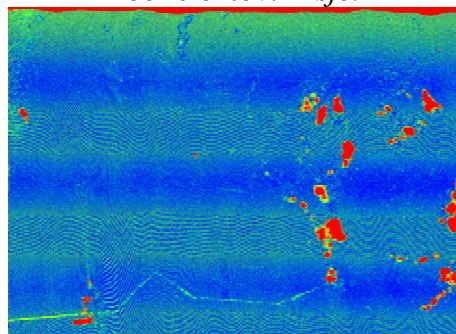
Barvno kodirani model največje glavne ukrivljenosti: *Trsje*.



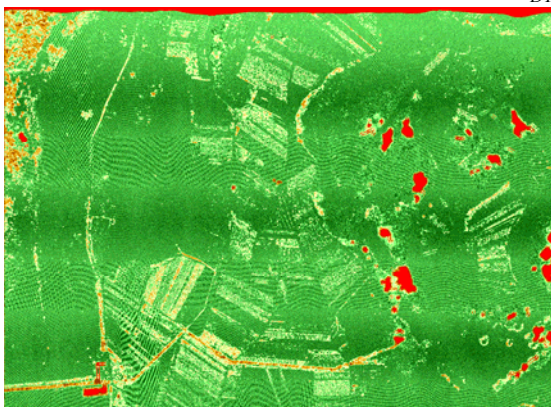
Barvno kodirani model natančnosti višin  $\sigma_{0,d}$   
originalnih točk: *Trsje*.



Barvno kodirani model utežnih  
koeficientov: *Trsje*.

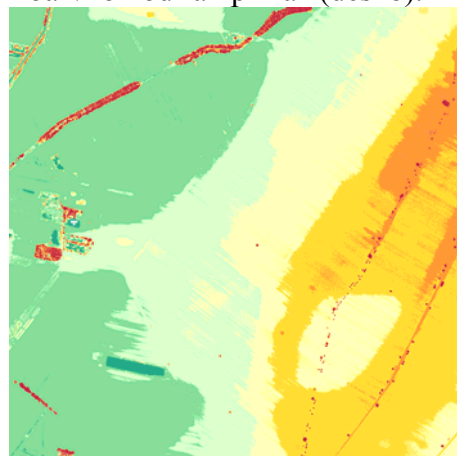
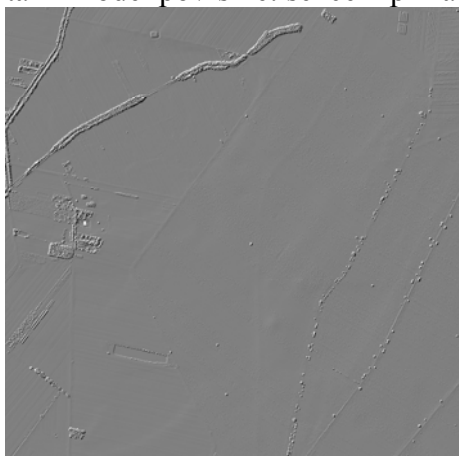


Barvno kodirani model natančnosti višin DMR  $\hat{\sigma}_{DTM}$ : *Trsje*.

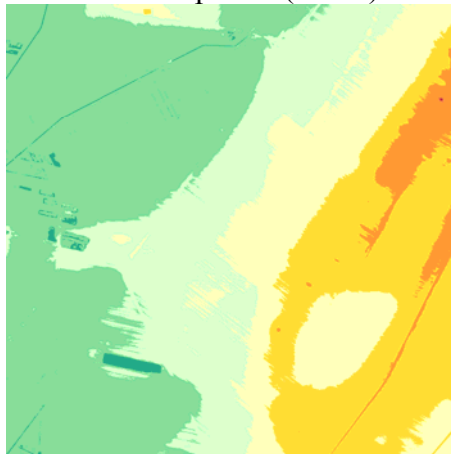
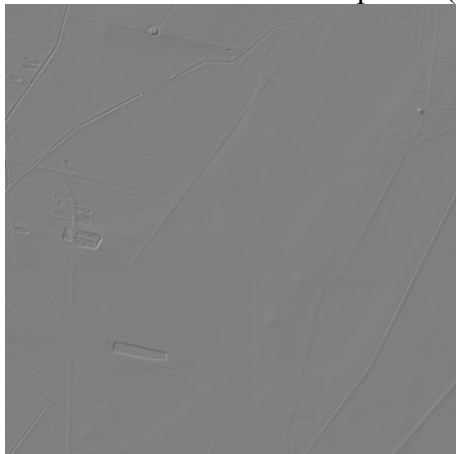


## Priloga D2: Rezultati za območje Vinograd

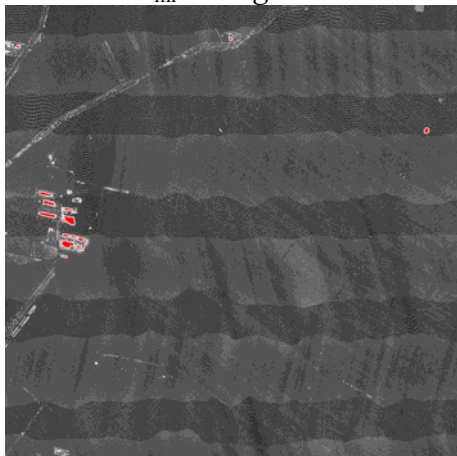
Digitalni model površine: senčni prikaz (levo) in barvno kodiran prikaz (desno).



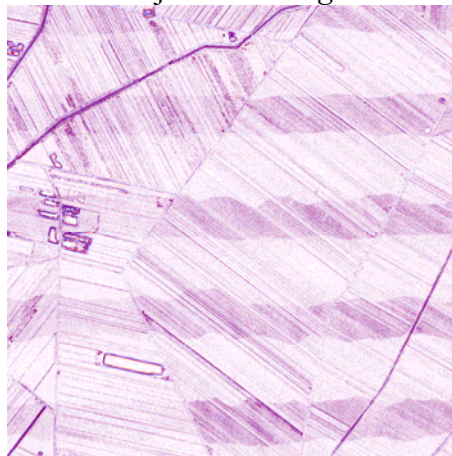
Digitalni model terena: senčni prikaz (levo) in barvno kodiran prikaz (desno).



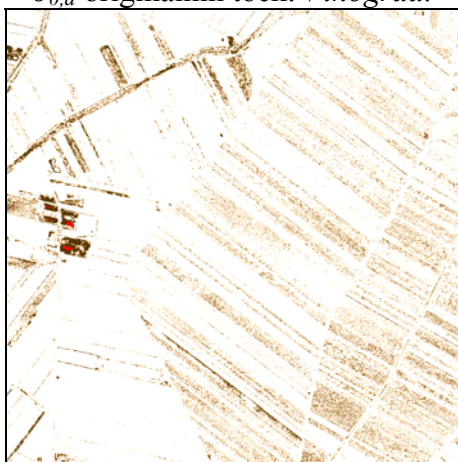
Barvno kodirani model najmanjših razdalj  
 $S_{mi}$ : *Vinograd.*



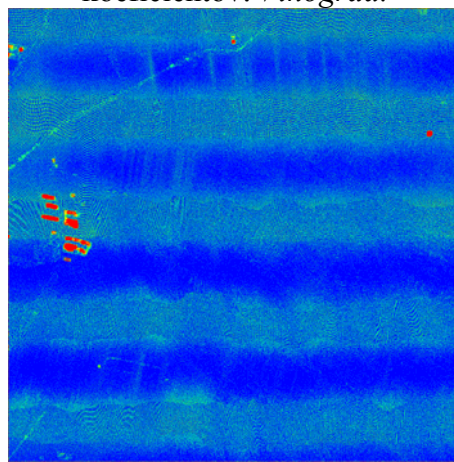
Barvno kodirani model največje glavne  
ukrivljenosti: *Vinograd.*



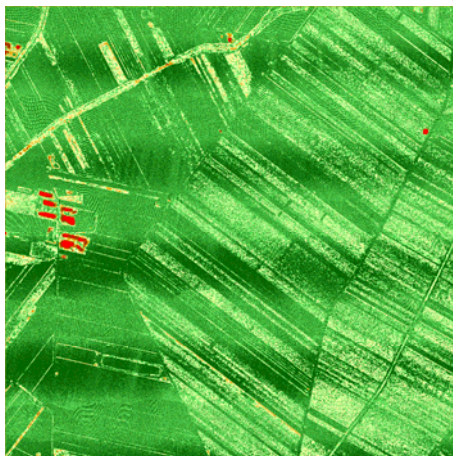
Barvno kodirani model natančnosti višin  
 $\sigma_{0,d}$  originalnih točk: *Vinograd.*



Barvno kodirani model utežnih  
koeficientov: *Vinograd.*

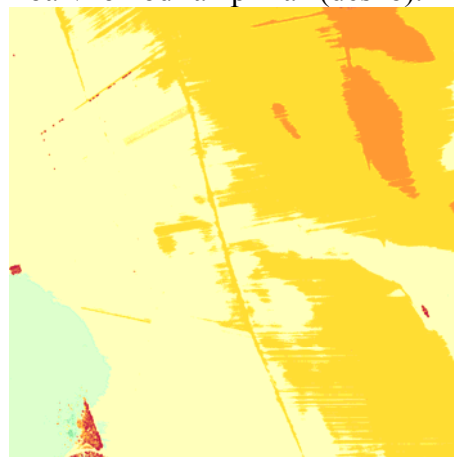
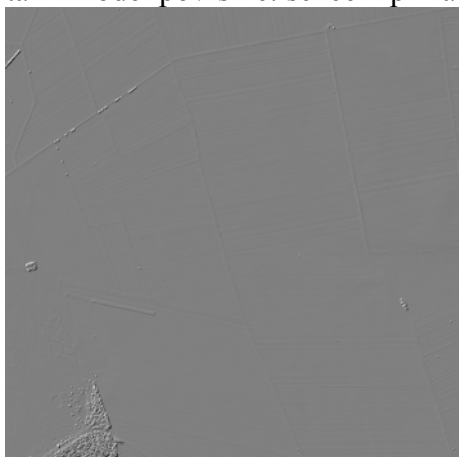


Barvno kodirani model natančnosti višin DMR  $\hat{\sigma}_{DTM}$ : *Vinograd*.

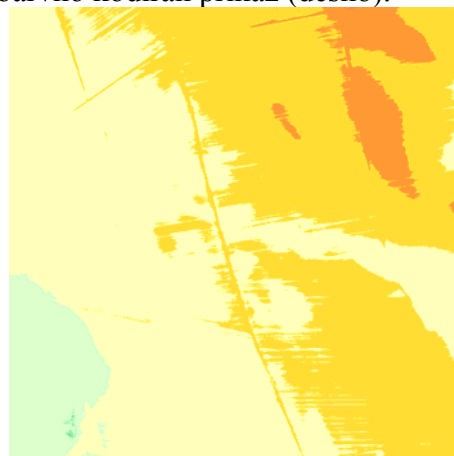
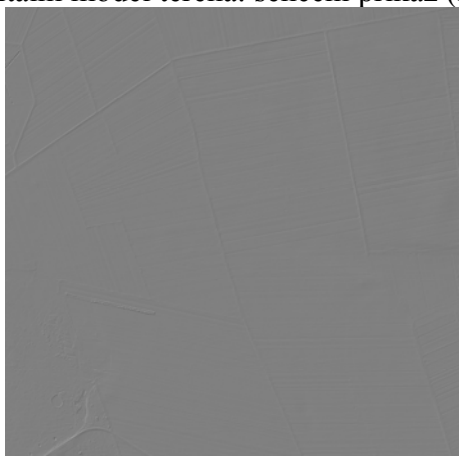


### Priloga D3: Rezultati za območje *Polje*

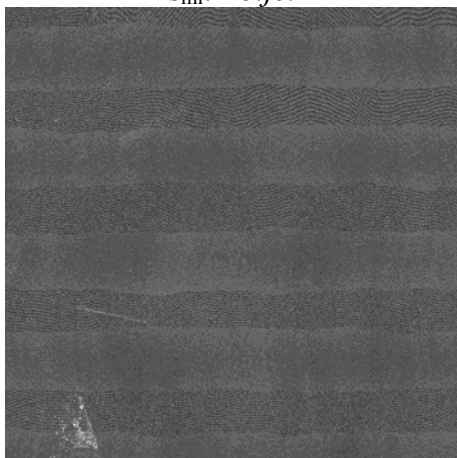
Digitalni model površine: senčni prikaz (levo) in barvno kodiran prikaz (desno).



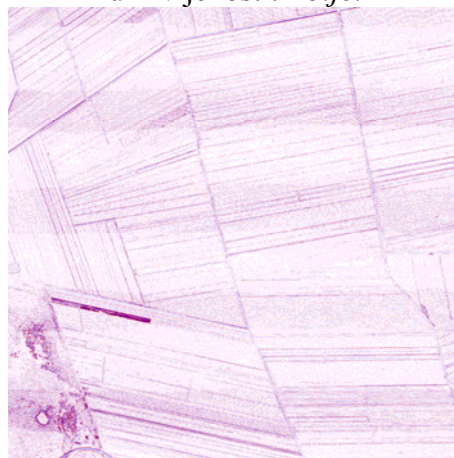
Digitalni model terena: senčni prikaz (levo) in barvno kodiran prikaz (desno).



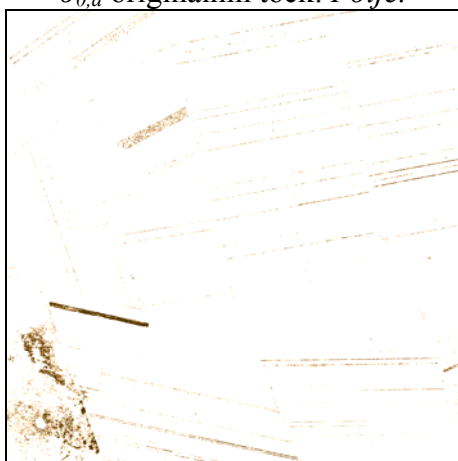
Barvno kodirani model najmanjših razdalj  
 $s_{mi}$ : *Polje*.



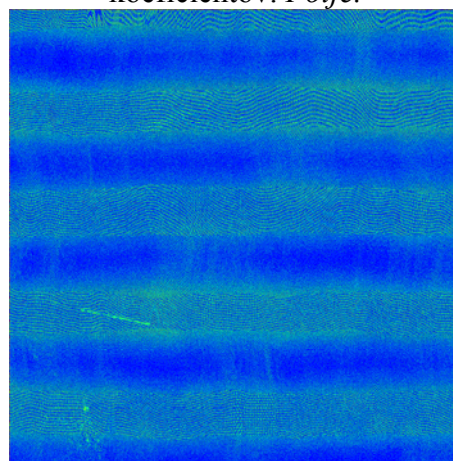
Barvno kodirani model največje glavne ukrivljenosti: *Polje*.



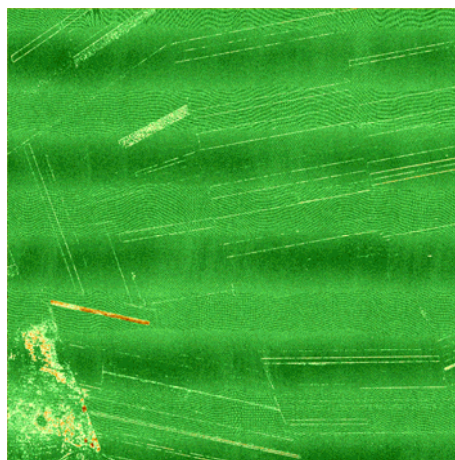
Barvno kodirani model natančnosti višin  
 $\sigma_{0,a}$  originalnih točk: *Polje*.



Barvno kodirani model utežnih koeficientov: *Polje*.

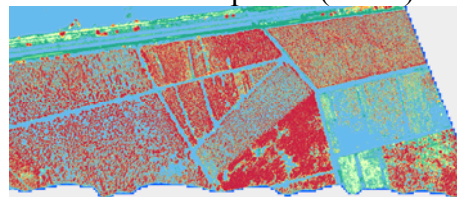
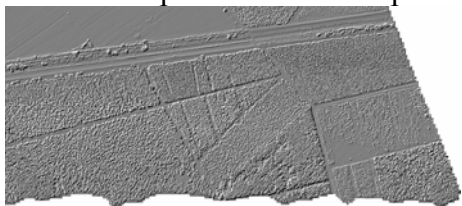


Barvno kodirani model natančnosti višin DMR  $\hat{\sigma}_{DTM}$ : *Polje*.

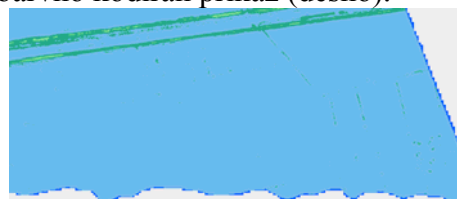
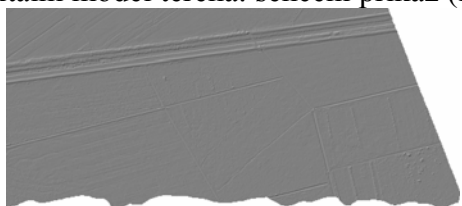


## Priloga D4: Rezultati za območje Gozd

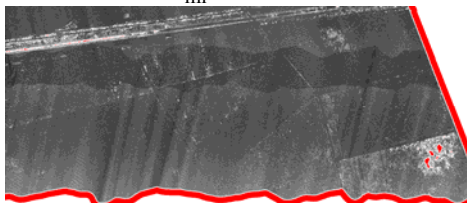
Digitalni model površine: senčni prikaz (levo) in barvno kodiran prikaz (desno).



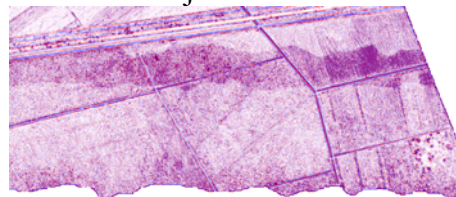
Digitalni model terena: senčni prikaz (levo) in barvno kodiran prikaz (desno).



Barvno kodirani model najmanjših razdalj  
 $s_{mi}$ : *Gozd*.



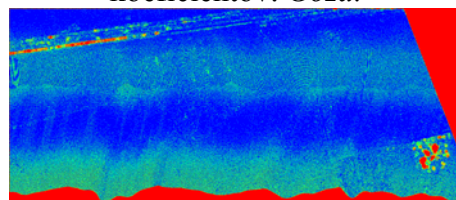
Barvno kodirani model največje glavne  
ukrivljenosti: *Gozd*.



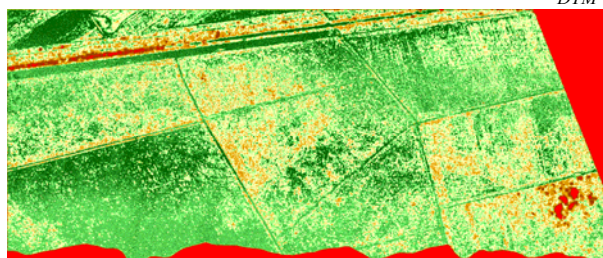
Barvno kodirani model natančnosti višin  
 $\sigma_{0,d}$  originalnih točk: *Gozd*.



Barvno kodirani model utežnih  
koeficientov: *Gozd*.


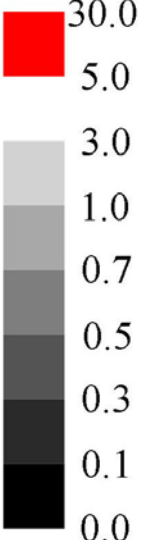

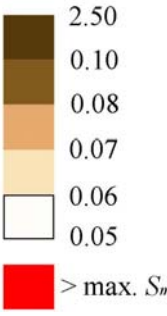
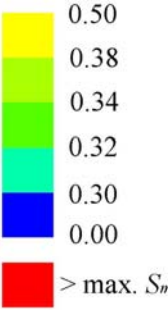
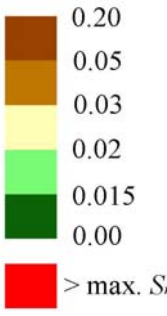


Barvno kodirani model natančnosti višin DMR  $\hat{\sigma}_{DTM}$ : *Gozd*.





**Priloga D5: Legende barvnih prikazov**

Legenda za digitalni model terena in površine	Legenda za model najmanjših razdalj	Legenda za model največje glavne ukrivljenosti	Legenda za model natančnosti višin originalnih točk	Legenda za model utežnih koeficientov	Legenda za model natančnosti DMR-ja
<p><b>Farbpalette DSM [m]</b></p>  <p>125.0 123.0 121.5 120.0 118.5 117.0 115.5 114.0 112.0</p>	<p><math>S_{mi}</math> [m]</p>  <p>30.0 5.0 3.0 1.0 0.7 0.5 0.3 0.1 0.0</p>	<p><math>1/r_{\alpha i}</math> [m<sup>-1</sup>]</p>  <p>3.00 0.30 0.15 0.10 0.06 0.03 0.01 -0.01 -0.03 -0.06 -0.10 -0.15 -0.30 -3.00</p>	<p><math>\sigma_{0,d}</math> [m]</p>  <p>2.50 0.10 0.08 0.07 0.06 0.05</p> <p>&gt; max. <math>S_{mi}</math></p>	<p><math>q_{a0}</math></p>  <p>0.50 0.38 0.34 0.32 0.30 0.00</p> <p>&gt; max. <math>S_{mi}</math></p>	<p><math>\sigma_{DTM}</math> [m]</p>  <p>0.20 0.05 0.03 0.02 0.015 0.00</p> <p>&gt; max. <math>S_{mi}</math></p>

## Priloga E: Programska koda za izračun identičnih točk (*Matlab*)

```
%%FINDING IDENTICAL POINTS IN BOTH STRIPS

t0 = clock; % start time

%%OPEN first (1) and second (2) file with data set (X,Y,Z,t,Int,sa,d)----
strip1 = 11;
strip2 = 55;
str1 = load('D:\ajam\Intensity\PairsCut1155\out11xyztisad.xyz');
str2 = load('D:\ajam\Intensity\PairsCut1155\out55xyztisad.xyz');
%%-----

%Dimensions of matrices with data
[np1,c1] = size(str1); %np - number of points = rows, c - columns
[np2,c2] = size(str2);

%Definition of indexes
i=1; %for points in the first strip (11)
j=1; %for points in the second strip (12)
k=0; %for identical points (1112)

for i = 1:np1
    for j = 1:np2
        if (str2(j,1) >= str1(i,1)-0.1) & (str2(j,1) <= str1(i,1)+0.1) %If the
X koordinats are the same (in the interval)
            if (str2(j,2) >= str1(i,2)-0.1) & (str2(j,2) <= str1(i,2)+0.1) %and if
are the Y koordinats ...
                k = k+1; %Prepare the index k for the identical points of both
strips.
                index(k, [1:3]) = [k,i,j]; %Matrix with indeces for identical
points
                %Write matrices (X,Y,Z,t,Int,sa,d) of identical points in both
strips
                points1(k,[1 2 3 4 5 6 7]) = str1(i,1:7);
                points2(k,[1 2 3 4 5 6 7]) = str2(j,1:7);
            end %End if the Y koord. is not the same.
        end %End if the X koord. is not the same.

    end %End when it finishes the check of all points in the strip 12.
    i
end

%Variables:
X = points1(:,1);
Y = points1(:,2);
Z = points1(:,3);
int1 = points1(:, 5); %Intensity
int2 = points2(:, 5);
sa1 = points1(:, 6);
sa2 = points2(:, 6);
d1 = points1(:, 7);
d2 = points2(:, 7);

%%Save REZULTS of identical points in a file-----
-----
fid1 = fopen('D:\ajam\Intensity\PairsCut1155\IdenP24_.xyz', 'w');
fid2 = fopen('D:\ajam\Intensity\PairsCut1155\IdenP54.xyz', 'w');
fid = fopen('D:\ajam\Intensity\PairsCut1155\index.wnp', 'w');
```

```
%%-----  
  
nrrows = size(points1, 1); %k  
for k = 1:nrrows  
    fprintf(fid1, sprintf('%6.3f %6.3f %3.3f %6.6f %3i % .6f % 4.2f\n', ...  
points1(k,1),points1(k,2),points1(k,3),points1(k,4),points1(k,5),points1(k,6),point  
s1(k,7)));  
end  
fclose(fid1);  
  
for k = 1:nrrows  
    fprintf(fid2, sprintf('%6.3f %6.3f %3.3f %6.6f %3i % .6f %4.2f\n', ...  
points2(k,1),points2(k,2),points2(k,3),points2(k,4),points2(k,5),points2(k,6),point  
s2(k,7)));  
end  
fclose(fid2);  
  
nrrows = size(index, 1); %k  
for k = 1:nrrows  
    fprintf(fid, sprintf('%i %i %i \n', index(k, 1), index(k, 2), index(k, 3)));  
end  
fclose(fid);  
  
t1 = clock; % stop time  
elapsed = etime(t1, t0); % calculate time elapsed  
fprintf('Time elapsed: %.0f seconds\n', elapsed);
```

## Priloga F: Prileganje linearne funkcije in normalizacija intenzitete (*Matlab*)

```
%%Plot: the dependancy di from dd.
figure;
plot(dd,di,'.'); %Chart of dependancy di from dd.
p = polyfit(dd,di,1); %p=[a, b]; Polynomial curve fitting: row vector of
length n+1 containing the polynomial coefficients in descending powers.
y= polyval(p, dd); %Polynomial evaluation y = di(dR) - CORRIGENDA.
hold on;
grid on;
plot(dd,y,'k'); %Ploting the line on the previous chart.
xlabel('dR [m]')
ylabel('dI')
title('Razlike intenzitete v odvisnosti od razlik razdalje','FontSize',12)

%%Normalization: identical points-----
int1n = int1+y;

%INTENSITY IMAGE - comparison of normalised strips
maks_int = max([max(int1); max(int2)])
figure;
subplot(1,2,1);
scatter(X,Y,5,int1n,'filled')
axis([min(X),max(X),min(Y),max(Y)]);
caxis([0 maks_int])
xlabel('X')
ylabel('Y')
subplot(1,2,2);
scatter(X,Y,5,int2,'filled') %Intensity for "master strip"
axis([min(X),max(X),min(Y),max(Y)]);
caxis([0 maks_int])
xlabel('X')
ylabel('Y')
colorbar %add legende

%Plot: the dependancy di_n from dd
di_n = int2-(int1+y); %Differences of corected intensity values

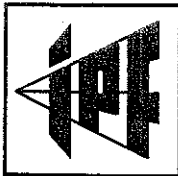
figure
plot(dd,di_n,'.r');
p_c = polyfit(dd,di_n,1);
y_c = polyval(p_c, dd); %Polynomial evaluation - CORRIGENDA = 0!
hold on;
plot(dd,y_c,'k'); %Ploting the line on the previous chart
xlabel('dR [m]')
ylabel('dI-normalizirana')
grid on;

%%Normalization of the whole 2. strip in accorning to the 1. strip-----
i2cel; %master strip
R2_p = mean(R2cel); %srednja vrednost razdalj 1. pasu (master)
I1n = ilcel + (p(1)*(R2_p-R1cel)+p(2)); %NORMALIZED INTENSITY

%INTENSITY IMAGE - comparison of normalised strips
```

```
Imax = max(max(I1n), max(i2cel))
figure;
subplot(1,2,1);
scatter(X1cel,Y1cel,5,I1n,'filled')
axis([min(X1cel),max(X1cel),min(Y1cel),max(Y1cel)]);
caxis([0 max(255)])
xlabel('X')
ylabel('Y')
title('Slika normalizirane intenzitete - Pas 22','FontSize',12)
subplot(1,2,2);
scatter(X2cel,Y2cel,5,i2cel,'filled') %Master strip
axis([min(X2cel),max(X2cel),min(Y2cel),max(Y2cel)]);
caxis([0 max(255)])
title('Slika intenzitete - Pas 54 (master)','FontSize',12)
xlabel('X')
ylabel('Y')
colorbar %add legende
```

**Priloga G: Fotokopija dovoljenja I.P.F. TU Dunaj za uporabo  
programskega modula SCOP++ doma**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
INSTITUT FÜR  
PHOTOGRAMMETRIE  
UND FERNERKUNDUNG

VIENNA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
INSTITUTE OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING

GUSSHAUSSTRASSE 27-29  
A-1040 WIEN, ÖSTERREICH - AUSTRIA  
Tel: +43-1-58801 - 12201 <http://www.ipf.tuwien.ac.at>  
Fax: +43-1-58801 - 12299 [mbox@ipf.tuwien.ac.at](mailto:mbox@ipf.tuwien.ac.at)

Insitut für Photogrammetrie  
und Fernerkundung

Gusshausstraße 27-29  
1040 Wien  
Austria

DATUM 3. April 2006

UNSER ZEICHEN

SACHBEARBEITER ma

NEBENSTELLE 12243

Betrifft: SCOP++ Dongle

Dear Prof. Kraus,

I received the SCOP++ Dongle 4/17 on 3. April 2006.

I will use SCOP++ for my diploma thesis only. After finishing the diploma thesis I will return the SCOP++ dongle to the I.P.F.

Best regards,

  
Maja Bitenc