

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

ODDELEK ZA  
GEODEZIJO



**UNIVERZITETNI  
ŠTUDIJ GEODEZIJE  
SMER GEODEZIJA**

Kandidat:

**MARIN RIĐIĆ**

**Izdelava in ocena kakovosti popolnega ortofota**

Diplomska naloga št.: **884**

**Generation and quality checking of true orthophoto**

Graduation thesis No.: **884**

***Mentorica:***

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

***Predsednik komisije:***

izr. prof. dr. Dušan Kogoj

***Somentor:***

Zoran Posinković, mag.ing.geod., GEOFOTO Zagreb

Ljubljana, 2012

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVE**

Podpisani Marin Ridić izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Izdelava in ocena kakovosti popolnega ortofota«.

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

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

Ljubljana, 11. 1. 2012

Marin Ridić

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

**UDK: 528.7/8:004.4(043.2)**

**Avtor: Marin Ridić**

**Mentor: doc.dr. Mojca Kosmatin Fras**

**Somentor: Zoran Posinković, mag.ing.geod., GEOFOTO Zagreb**

**Naslov: Izdelava in ocena kakovosti popolnega ortofota**

**Obseg in oprema: 71 str., 8 pregl., 66 sl., 10 en.**

**Ključne besede: popolni ortofoto, digitalni model površja, zakrita območja,  
mozaičenje, kakovost, položajna točnost**

### **Izveček**

V diplomski nalogi je obravnavan postopek izdelave popolnega ortofota. Pomemben vhodni podatek pri izdelavi popolnega ortofota je digitalni model površja (DMP), ki ga izdelamo z združitvijo digitalnega modela reliefa in digitalnega modela zgradb. V nalogi smo DMP izdelali na dva različna načina in sicer iz fotogrametrično zajetih podatkov oziroma iz klasificiranih lidarskih podatkov. Diplomaska naloga je razdeljena na teoretični in praktični del. V prvem delu je predstavljena razlika med klasičnim in popolnim ortofotom, opisani so vhodni podatki za izdelavo in metode za njihovo pridobitev ter teoretične osnove splošnih korakov izdelave popolnega ortofota. Na koncu teoretičnega dela je opisana teorija ocene kakovosti popolnega ortofota. V drugem, praktičnem delu je vse zgoraj naštet prikazano na konkretnem primeru. Poudarek je na postopku izdelave obeh digitalnih modelov površja. Izdelava ocene kakovosti končnih izdelkov ter njihova primerjava, kar je glavni namen naloge, je predstavljena na koncu diplomske naloge.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT****UDC: 528.7/.8:004.4(043.2)****Author: Marin Ridić****Supervisor: doc.dr. Mojca Kosmatin Fras****Cosupervisor: Zoran Posinković, mag.ing.geod., GEOFOTO Zagreb****Title: Generation and quality checking of True Orthophoto****Notes: 71 p., 8 tab., 66 fig., 10 eq.****Key words: true orthophoto, digital surface model, occluded areas, mosaicking, quality, positional accuracy****Abstract**

The thesis describes the process of true orthophoto generation. An important input in the generation process of true orthophoto is a digital surface model (DSM), which is made with the merger of the digital terrain model and digital building model. The thesis provides us with two different ways of creating a DSM, namely using the photogrammetric mapping data or the classified LIDAR data. The thesis is divided into theoretical and practical part. The first part presents the difference between classical and true orthophoto, describes the source data and their acquisition methods as well as the theoretical basis of true orthophoto creation steps. The end of the theoretical part describes the quality checking of true orthophoto. The second, practical part shows a concrete example of the above listed theory. Emphasis is placed on the process of creating both digital surface models. Quality checking of the final products and their comparison, which is the main purpose of the research, is presented at the end of the thesis.

## **ZAHVALA**

Za strokovno pomoč in nasvete pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorici doc.dr. Mojci Kosmatin Fras. Hvala tudi podjetju Geofoto in vsem sodelavcem podjetja za pridobljene podatke, strokovno pomoč in za možnost uporabe njihove strojne opreme.

Iskrena hvala mojim domačim, ki so mi nudili podporo, me vzpodbujali in zaupali vame skozi vsa študijska leta.

**KAZALO VSEBINE**

	<b>BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....</b>	<b>III</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT... </b>	<b>IV</b>
	<b>ZAHVALA .....</b>	<b>V</b>
	<b>KAZALO VSEBINE.....</b>	<b>VI</b>
	<b>KAZALO PREGLEDNIC .....</b>	<b>VIII</b>
	<b>KAZALO SLIK.....</b>	<b>IX</b>
	<b>KRATICE .....</b>	<b>XI</b>
<b>1</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ORTOFOTO .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Izdelava ortofota.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Princip izdelave .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Kakovost ortofota .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>Slabosti navadnega ortofota in prehod na popolni ortofoto .....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>DIGITALNI VIŠINSKI MODELI.....</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>IZDELAVA DIGITALNEGA MODELA POVRŠJA .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1</b>	<b>Zajem podatkov za digitalni model površja .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Fotogrametrični zajem podatkov .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1.1.1</b>	<b>Ročni zajem podatkov iz stereoparov .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1.1.2</b>	<b>Avtomatski zajem podatkov na stereoparih s slikovnim ujemanjem.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Aero lasersko skeniranje.....</b>	<b>20</b>
<b>4.2</b>	<b>Modeliranje digitalnega modela površja.....</b>	<b>23</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Nepravilna trikotniška mreža .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Kvadratna celična mreža .....</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>IZDELAVA POPOLNEGA ORTOFOTA .....</b>	<b>27</b>
<b>5.1</b>	<b>Ortorektifikacija posnetkov.....</b>	<b>27</b>
<b>5.2</b>	<b>Iskanje zakritih območij.....</b>	<b>28</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Z-bafer metoda in njene modifikacije.....</b>	<b>28</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Metoda sortiranega DMP .....</b>	<b>30</b>

5.2.3	Metoda primerjave kotov in metoda primerjave višin.....	31
5.2.4	Izpolnjevanje zakritih območij.....	33
5.3	Radiometrično ali barvno ujemanje .....	34
5.4	Mozaičenje .....	36
5.4.1	Iskanje najprimernejših pikslov .....	36
5.4.2	Iskanje optimalnih stičnih linij.....	38
5.4.3	Zabris stičnih linij .....	38
6	<b>ZAGOTAVLJANJE KAKOVOSTI.....</b>	<b>40</b>
6.1	Zahteve za zagotavljanje kakovosti .....	40
6.2	Kakovostni model.....	41
6.3	Položajna točnost .....	41
7	<b>PRAKTIČNI PRIMER IZDELAVE POPOLNEGA ORTOFOTA .....</b>	<b>43</b>
7.1	Vhodni podatki in njihova točnost.....	44
7.2	Izdelava popolnega ortofota na osnovi fotogrametričnega zajema.....	45
7.2.1	Izdelava digitalnega modela površja in ortorektifikacija.....	46
7.2.2	Zapolnitev zakritih območij in mozaičenje.....	47
7.3	Izdelava popolnega ortofota z uporabo lidarskih podatkov .....	48
7.3.1	Klasifikacija točk in izdelava digitalnih modelov .....	49
7.4	Rezultati ortorektifikacije in mozaičenja.....	53
7.4.1	Popolni ortofoto, izdelan na osnovi fotogrametričnega zajema.....	53
7.4.2	Popolni ortofoto, izdelan na osnovi lidarskih podatkov .....	56
8	<b>OCENA KAKOVOSTI REZULTATOV .....</b>	<b>59</b>
8.1	Absolutna točnost.....	59
8.2	Relativna točnost.....	62
9	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>68</b>
	<b>VIRI .....</b>	<b>69</b>



**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Koordinate merjenih točk na terenu. ....	60
Preglednica 2: Koordinate točk popolnega ortofota (fotogrametrični zajem) in njihova odstopanja od prave vrednosti.....	61
Preglednica 3: Koordinate točk popolnega ortofota (lidar) in njihova odstopanja od prave vrednosti .	61
Preglednica 4: Absolutna točnost pridobljenih popolnih ortopodob .....	61
Preglednica 5: Koordinate zajetih točk na vektorskemu sloju.....	66
Preglednica 6: Koordinate detajlnih točk na popolnem ortofotu (fotogrametrični zajem) in njihova odstopanja od prave vrednosti. ....	66
Preglednica 7: Koordinate detajlnih točk na popolnem ortofotu (lidar) in njihova odstopanja od prave vrednosti .....	67
Preglednica 8: Relativna točnost izdelanih popolnih ortopodob .....	67

## KAZALO SLIK

Slika 1: Problemi, ki nastanejo pri izdelavi digitalnega ortofota (Keinan in Doytsher, 2008: 2)	1
Slika 2: Lidarski sistem (Arizona State University)	2
Slika 3: Neposredni postopek preslikave	6
Slika 4: Posredni postopek preslikave	6
Slika 5: Vpliv natančnosti digitalnega modela višin na ortofoto (Hartman, 2008: 8)	9
Slika 6: Aeroposnetek v centralni projekciji (levo) in iz njega izdelan ortofoto (desno), ki prikazuje označene posledice dvojnega kartiranja (Kim, Ghanma in Habib, 2006: 4)	10
Slika 7: Kombinacija več posnetkov istega območja za popolno prekritje	11
Slika 8: Razlika med digitalnim modelom površja in digitalnim modelom reliefa (Wikipedia)	12
Slika 9: Digitalni model reliefa (Geofoto d.o.o.)	13
Slika 10: Digitalni model zgradb (Zavod za Fotogrametriju d.d.)	13
Slika 11: Digitalni model reliefa in digitalni model zgradb skupaj tvorita digitalni model površja	14
Slika 12: Tri stopnje prikaza detajlov (LOD) (Nielsen, 2004: 20)	14
Slika 13: Ortofoto izdelan na osnovi digitalnega modela reliefa; objekti so premaknjeni z njihove prave pozicije (Barazzetti, Brovelli in Scaioni, 2007: 27)	15
Slika 14: Združena digitalni model zgradb in digitalni model reliefa (Amhar, Jansa in Ries, 1998: 3)	16
Slika 15: Stereomodel kot rezultat pravilne orientacije stereopara (Li, Zhu in Gold, 2005: 38)	17
Slika 16: Digitalna fotogrametrična postaja Delta (INGEOCAD)	18
Slika 17: Aero lasersko skeniranje (Geofoto d.o.o.)	20
Slika 18: Barvno kodirani prvi (zgoraj) in zadnji (spodaj) odboj žarka (Günay, Arefi in Hahn, 2007: 2)	21
Slika 19: Slika jakosti prvega odboja žarka (levo) in slika jakosti zadnjega odboja žarka (desno) (Günay, Arefi in Hahn, 2007: 2)	22
Slika 20: Terestrični (levo) in vesoljski (desno) lidar (Geofoto d.o.o.)	23
Slika 21: Nepravilna trikotniška mreža (History Data Service)	24
Slika 22: Prečni prerez triangulacij preko enakih točk (Nielsen, 2004: 22)	24
Slika 23: Digitalni model površja na osnovi nepravilne trikotniške mreže (Schickler in Thorpe, 1998: 2)	25
Slika 24: Kvadratna celična mreža (Nielsen, 2004: 23)	25
Slika 25: Digitalni model površja na osnovi kvadratne celične mreže (Nielsen, 2004: 24)	26
Slika 26: Postopek po metodi Z-bafer (Habib et al., 2007: 27)	29
Slika 27: Problem M-deleža, ki vodi do napačne vidnosti (levo), ki jo minimiziramo z uvedbo psevdotočk (desno) (Habib et al., 2007: 29)	30
Slika 28: Metoda sortiranega digitalnega modela površja (Bang et al., 2007: 5)	31
Slika 29: Iskanje zakritih območij po metodi kotov (Bang et al., 2007: 4)	32
Slika 30: Spiralno iskanje zakritih območij (Habib et al., 2007: 32)	32
Slika 31: Princip metode primerjave višin (Bang et al., 2007: 7)	33
Slika 32: Izpolnjevanje zakritega območja (Braun, 2003: 207)	34

Slika 33: Vhodni posnetek (levo) in radiometrično popravljene posnetek (desno) (Gisbox)	35
Slika 34: Princip metode ujemanja histogramov (Nielsen, 2004: 62)	36
Slika 35: Princip kombinirane utežne funkcije (Nielsen, 2004: 74)	37
Slika 36: Optimalna stična linija (INPHO GmbH)	38
Slika 37: Filter velikosti 3 x 3 (levo) in filter velikosti 5 x 5 (desno) (Nielsen, 2004: 76)	39
Slika 38: Shema poteka praktičnega dela	44
Slika 39: Območje obravnave	45
Slika 40: Tlorisni pogled na digitalni model zgradb (levo) in 3D-prikaz detajla modela (desno)	46
Slika 41: Tlorisni pogled na digitalni model reliefa	46
Slika 42: Ortoobmočja (INPHO, 2010: 26)	47
Slika 43: Zakrita območja, označena z rdečo barvo (levo), in zapolnjena zakrita območja (desno)	48
Slika 44: Avtomatsko poiskane stične linije med ortoposnetki	48
Slika 45: Neklasificiran oblak točk za celotno območje (zgoraj) in en detajl (spodaj)	49
Slika 46: Klasificirane točke celotnega območja obravnave	50
Slika 47: Detajl klasificiranih točk (Geofoto d.o.o.)	50
Slika 48: Profil klasificiranih točk: na spodnjem delu slike vidimo točke, ki ležijo v profilu na označenem zgornjem delu slike (oranžna linija)	51
Slika 49: Klasificirane točke terena	52
Slika 50: Klasificirane točke stavb	52
Slika 51: Avtomatsko vektorizirana streha stavbe	53
Slika 52: Vektorizacija klasificiranih točk stavb z uporabo slabših parametrov	53
Slika 53: Popolni ortofoto, izdelan na osnovi fotogrametričnega zajema	54
Slika 54: Primer izreza iz obravnavanega območja na aeroposnetku (zgoraj) in istega območja na ortorektificirani podobi (spodaj), pridobljeni na osnovi fotogrametričnega zajema	55
Slika 55: Prikaz izreza obravnavanega območja na končnem popolnem ortofotu, izdelanem s pomočjo podatkov fotogrametričnega zajema	56
Slika 56: Popolni ortofoto, izdelan na osnovi lidarskih podatkov	57
Slika 57: Primer izreza obravnavanega območja za primerjavo na ortorektificirani podobi, pridobljeni na osnovi lidarskih točk	58
Slika 58: Prikaz izreza obravnavanega območja končnega popolnega ortofota, pridobljenega z uporabo lidarskih podatkov	58
Slika 59: Označeni položaj kontrolnih točk	60
Slika 60: Prikaz vektorskega sloja objektov (črtkano) na popolnem ortofotu	62
Slika 61: Detajl stavbe na ortofotu (rdeče) s prikazom vektorskega sloja (črtkano)	63
Slika 62: Prikaz večjih odstopanj med detajlom stavbe na ortofotu (rdeče) in vektorskim slojem (črtkano)	63
Slika 63: Odstopanje popolnega ortofota (lidar) od vektorskega sloja	64
Slika 64: Detajlne točke na digitalnemu modelu reliefa	64
Slika 65: Detajlne točke na digitalnemu modelu zgradb	65
Slika 66: Detajlne točke, prikazane na popolnem ortofotu	65

## KRATICE

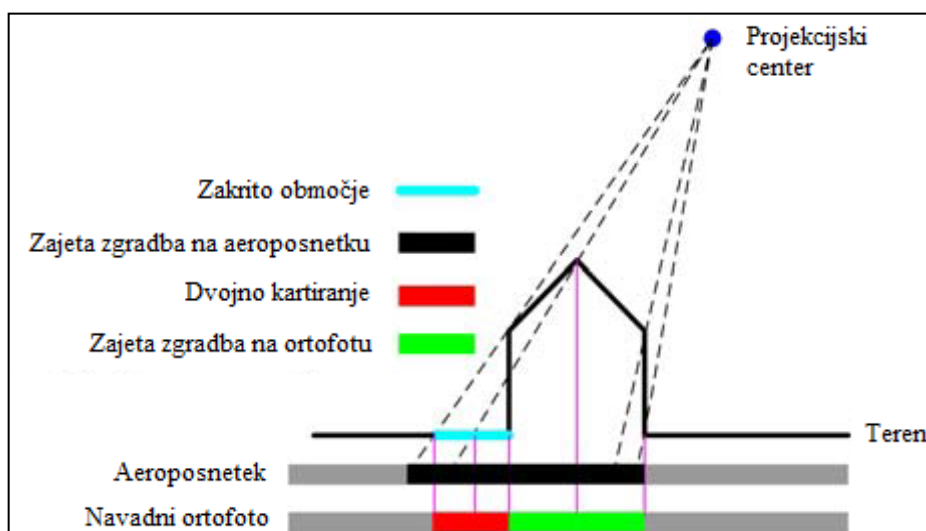
ALS	Airborne Laser Scanning, aero lasersko skeniranje
DBM	Digital Building Model
DEM	Digital Elevation Model
DFP	digitalna fotogrametrična postaja
DMP	digitalni model površja
DMR	digitalni model reliefa
DMV	digitalni model višin
DMZ	digitalni model zgradb
DOF	digitalni ortofoto
DSM	Digital Surface Model
DTI	dolžina talnega intervala (angl. GSD – Ground Sampling Distance)
DTM	Digital Terrain Model
GIS	geografski informacijski sistem
GNSS	Globalni navigacijski satelitski sistemi
GPS	sistem globalnega določanja položaja (angl. Global Positioning System)
INS	inercialni navigacijski sistem (angl. Inertial Navigation System)
ISO	Mednarodna organizacija za standardizacijo (angl. International Organization for Standardization)
LIDAR	lasersko skeniranje (angl. Light Detection And Ranging)
LOD	stopnja prikaza detajla (angl. Level of Detail)
PC	projekcijski center
RGB	rdeča, zelena, modra (angl. Red Green Blue)
RMSE	Root Mean Square Error
RTK	Real Time Kinematic
TIN	mreža nepravilnih trikotnikov (angl. Triangulated Irregular Network)



## 1 UVOD

Tehnološki razvoj digitalne fotogrametrije v veliki meri temelji na razvoju digitalnih slikovnih senzorjev, računalniške tehnologije in drugih zmogljivih orodij za digitalno obdelavo podob. Eden izmed pomembnih in zelo uporabnih izdelkov digitalne fotogrametrije je ortofoto, ki se lahko uporablja kot samostojni izdelek, v GIS-ih kot eden izmed vsebinskih slojev ali kot vizualizacijski pripomoček (npr. za izdelavo 3D realističnih modelov). Izdelava ortofota je cenejša in hitrejša kot izdelava klasičnih kart in vektorskih baz, vendar jih ortofoto ne more popolnoma nadomestiti, temveč jih lahko le dopolnjuje.

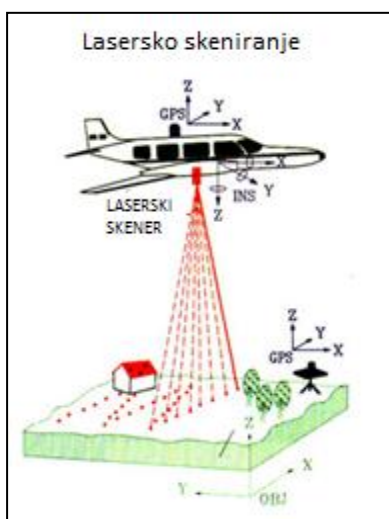
Digitalni ortofoto prikazuje topografijo posnetega območja v ortogonalni projekciji. To je geometrijsko popravljena fotografija v digitalni obliki, pridobljena kot rezultat transformacije digitalnih posnetkov iz centralne v ortogonalno projekcijo. Pri običajnih metodah se v procesu izdelave ortofota pojavljajo določene težave, kot so zakrita območja, dvojno kartiranje vsebine in geometrijske deformacije objektov nad reliefom, ki so največkrat stavbe in mostovi (slika 1). Z namenom, da bi se izognili tem težavam oziroma da jih zmanjšamo na najmanjšo možno mero, se uporablja postopek izdelave popolnega ortofota.



Slika 1: Problemi, ki nastanejo pri izdelavi digitalnega ortofota (Keinan in Doytsher, 2008: 2)

Danes termin popolni ortofoto (angl. true orthophoto) označuje nadgradnjo klasičnega ortofota, na katerem so tudi objekti, ki niso definirani z digitalnim modelom reliefa, predstavljeni v ortogonalni projekciji. Objekti torej niso projicirani na teren, ampak so pri ortorektifikaciji upoštevani podatki o njihovih višinah. Na ta način so objekti prostorsko pravilno prikazani: strehe objektov se nahajajo točno nad temeljem, brez prikazovanja bočnih sten in s tem brez prekrivanja okolice.

Popolni ortofoto ima kar nekaj prednosti pred navadnim (klasičnim), saj lahko na njem izvajamo planimetrične meritve, nanj se lahko položijo razni vektorski sloji (npr. komunalni vodi), uporabi pa se lahko tudi za prekritje 3D-modela. Popolni ortofoto se zato s pridom uporablja tako na področju aerofotogrametrije v urbanih središčih kot na področju terestrične fotogrametrije v arhitekturi in arheologiji (Hartman, 2008).



Slika 2: Lidarski sistem (Arizona State University)

Izdelava popolnega ortofota sledi osnovnemu konceptu, ki vsebuje nekaj korakov, ki jih je možno izvesti na različne načine, odvisno od uporabljene strojne opreme in algoritmov. Že na samem začetku, pri zajemu podatkov, imamo različne metode. V tej diplomski nalogi je predstavljena izdelava popolnega ortofota na osnovi dveh osnovnih metod neposrednega zajema podatkov, in sicer fotogrametričnega zajema ter podatkov, pridobljenih z laserskim skeniranjem oziroma lidarjem (angl. LIDAR).

V zadnjih nekaj letih je lidarska tehnologija postala uveljavljeno orodje za zajem in obdelavo prostorskih podatkov. Ta tehnologija zagotavlja gost in natančen 3D-oblak točk skeniranega območja. Lidarski sistem združuje tri podsisteme: laserski skener, globalni navigacijski satelitski sistem (GNSS) in inercialni navigacijski sistem (INS). Splošni koncept te tehnologije je natančno merjenje časa od oddaje laserskega impulza iz laserskega oddajnika do sprejema odbitega impulza. Njegova kombinacija s podsistemoma INS in GNSS omogoča natančno določanje prostorskega položaja objekta. GNSS določa položaj letala, medtem ko INS določa odnos kotov za korekcijo geometrijskih popravkov zračnega plovila, ki se giblje v prostoru, kot je prikazano na sliki 2. Iz lidarskega oblaka točk lahko izdelamo digitalni model površja (DMP; angl. digital surface model - DMS, ki omogoča izdelavo popolnega ortofota.

Izdelavo diplomske naloge mi je omogočilo podjetje Geofoto iz Zagreba, od katerega sem pridobil podatke in potrebno opremo za njihovo obdelavo. Pridobil sem aeroposnetke obravnavanega območja, ki se nahaja v centru Zagreba in so predstavljali vhodni podatek za obe metodi izdelave popolnega ortofota, ki sem ju uporabil v diplomski nalogi. Za prvo metodo, ki temelji na fotogrametričnem vektorskem zajemu, sem zaradi velike časovne zahtevnosti pridobil že končan digitalni model reliefa in digitalni model zgradb, ki sem jih uporabil v postopku ortorektifikacije. Izdelava popolnega ortofota po drugi metodi je bila izvedena samostojno od začetka obdelave »surovih« podatkov lidarskega snemanja za pridobitev digitalnih modelov do končnega izdelka, popolnega ortofota.

V zadnjem času se namreč v povezavi z lidarskimi podatki popolni ortofoto lahko izdelata dokaj enostavno, vendar pa je bilo doslej le malo raziskav v zvezi z njegovo kakovostjo. Zato je v diplomski nalogi kot glavni prispevek predstavljena ocena kakovosti končnih izdelkov. Kakovost je določena na osnovi enega elementa kakovosti, in sicer položajne točnosti, za katero so bile izvedene še dodatne GPS-meritve kontrolnih točk na terenu.

Naloga je razdeljena na teoretični in praktični del. V teoretičnem delu, ki šteje šest poglavij, sta na začetku v drugem poglavju predstavljena klasični in popolni ortofoto. V tretjem poglavju je opisan eden od najpomembnejših vhodnih podatkov za izdelavo ortofota, in sicer digitalni model višin oz. za naše potrebe pomembnejši digitalni model površja, ki predstavlja združitev digitalnega modela reliefa (DMR) in digitalnega modela zgradb (DMZ). Izdelava teh modelov je predstavljena v četrtem poglavju. Peto poglavje povzema osnovni princip izdelave popolnega ortofota, ki je opisan skozi postopke ortorektifikacije, iskanja zakritih območjih, barvnega ujemanja in mozaičenja. Teoretična osnova cilja naloge, ocene kakovosti, je podana v šestem poglavju, kjer so razloženi osnovni termini in standardi, povezani s kakovostjo ortofota. V sedmem poglavju, s katerim se začne praktični del, je opisan konkretni postopek izdelave popolnega ortofota na dva različna načina in končni izdelki. Osmo poglavje predstavlja rezultate ocene kakovosti, njihovo primerjavo in interpretacijo. Zadnje, deveto poglavje povzema opravljeno delo in predstavlja ugotovitve, do katerih smo prišli.



## 2 ORTOFOTO

Ortofoto zagotavlja dragocene prostorske in spektralne informacije za različne GIS in kartografske aplikacije. Geometrijsko pravilen prikaz vsebine in enotno merilo ortofota je uporabnikom omogočilo merjenje razdalj, izračun površine, geografsko lociranje in količinsko opredelitev sprememb. Fotografija predstavlja sliko sveta, projiciranega po načelih centralne projekcije skozi projekcijski center, v katerem se stikajo vsi svetlobni žarki, ki padejo na fotografijo. Pri upodobitvi predmetov iz 3D prostora na 2D sliko (fotografijo) pride do geometrijskih deformacij, ki so velike predvsem pri zelo razgibanem reliefu in visokih objektih. Tako so objekti, ki so bližje fotoaparatu, na posnetku prikazani večji kot objekti, ki so bolj oddaljeni. Na ortofotu so te pomanjkljivosti odpravljene, kar pomeni, da so vsi objekti prikazani v istem merilu ne glede na oddaljenost od projekcijskega centra. Izdelava ortofota je dokaj enostavna, zato se ga lahko hitreje posodablja kot vektorske karte, posamezne liste ortofota pa lahko združimo v ortofoto velikega območja.

### 2.1 Izdelava ortofota

Ortofoto (tudi ortofotografija, ortofotokarta) je fotogrametrični izdelek, ki ga dobimo s transformacijo fotografskega posnetka v ortogonalno projekcijo. Digitalni ortofoto izdelamo z digitalnimi postopki. Ker se danes uporablja izključno digitalna tehnologija, je pridevnik digitalni odveč (Kosmatin Fras, 2004). Zato je v diplomski nalogi večinoma uporabljen le termin ortofoto.

#### 2.1.1 Vhodni podatki

Za izdelavo ortofota je treba imeti digitalne posnetke in poznati teren, tj. digitalni model višin (DMV) oziroma digitalni model reliefa (DMR), kot tudi matematični model projekcije, to je pozicijo in orientacijo (elementi zunanje orientacije) v trenutku ekspozicije<sup>1</sup>.

Digitalne posnetke lahko pridobimo na dva načina: neposredno – z uporabo digitalnega fotoaparata ali senzorja, ali posredno – s skeniranjem analognih posnetkov. V postopku skeniranja se posnetek zapisuje kot dvodimenzionalna matrika  $G$ , ki vsebuje slikovne elemente  $g_{i,j}$  (piksel). Položaj vsakega piksla v slikovni matriki je definiran z zaporednim številom vrstice in stolpca, v katerem se piksel nahaja. Središču vsakega slikovnega elementa se dodelijo slikovne koordinate. Velikost piksla

---

<sup>1</sup> Ekspozicija predstavlja čas osvetlitve filma oziroma senzorja.

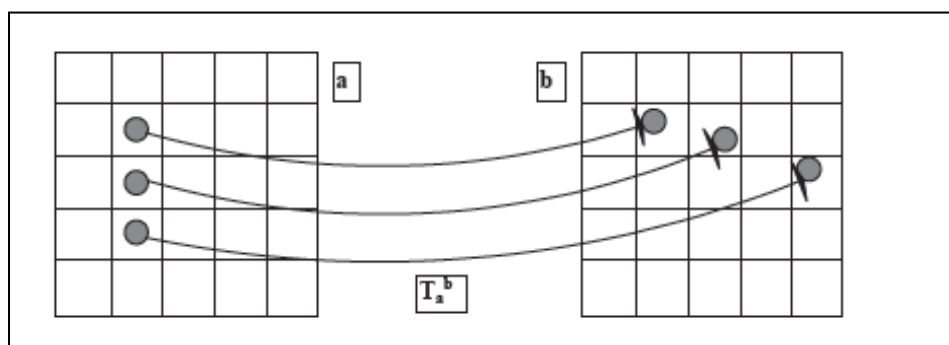
neposredno vpliva na kakovost in natančnost zapisa. Ker so v diplomski nalogi uporabljeni le neposredno zajeti posnetki, posredne metode ne bom podrobneje razlagal.

Glede digitalnega modela višin imamo dve možnosti. Če je DMV ustrezne kakovosti na razpolago, potem uporabimo tega, v nasprotnem primeru ga je treba zajeti. V procesu izdelave ortofota to lahko izvedemo z avtomatskimi postopki slikovnega ujemanja (angl. image matching). DMV je torej neke vrste dodatni izdelek v postopku izdelave ortofota. Postopki slikovnega ujemanja imajo sicer velike prednosti (predvsem velika hitrost zajema), vendar tudi pomembne slabosti, ki kvarijo končno kakovost DMV (Kosmatin Fras, 2004).

Podatke o fotoaparatu in fotografiji dobimo iz zunanje in notranje orientacije. Elemente zunanje orientacije, ki pomenijo položaj fotografije v prostoru v trenutku ekspozicije (trije premiki in trije zasuki slikovnega koordinatnega sistema glede na objektni koordinatni sistem), izračunamo z izravnavo v projektu aerotriangulacije. Notranja orientacija, ki se nanaša na fotoaparat (konstanta fotoaparata, položaj glavne točke na fotografiji) se rekonstruira s transformacijo merjenih slikovnih koordinat robnih mark na kalibrirane vrednosti iz kalibracijskega poročila. Dodatno se upoštevajo še podatki o radialni distorziji, da se odpravijo vplivi nepopolnosti objektiva (Kraus, 2007).

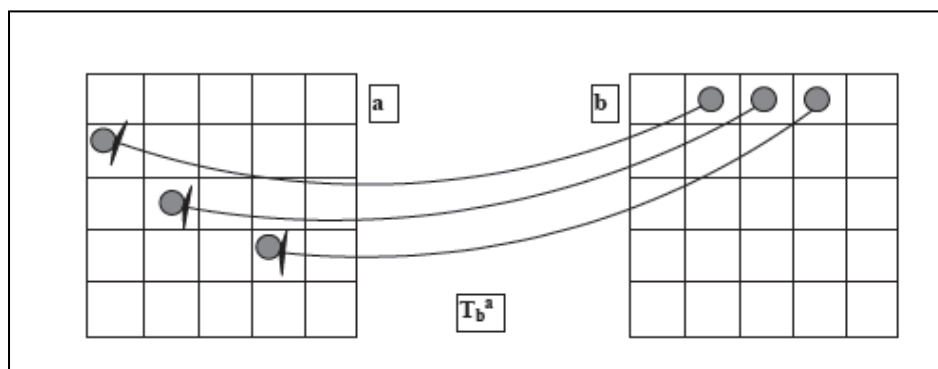
### **2.1.2 Princip izdelave**

Za izdelavo ortofota uporabimo zgoraj navedene vhodne podatke. Najprej moramo z orientacijo umestiti posnetke v prostor točno tako, kakor so bili v času ekspozicije. Proces izdelave ortofota se imenuje rektifikacija oziroma ortorektifikacija. Ortorektifikacija je pretvorba posnete podobe v njeno ortogonalno projekcijo, kar dosežemo s procesom zmanjšanja različnih geometrijskih napak, ki jih vsebuje izvorna podoba. Proces ortorektifikacije lahko poteka neposredno ali posredno. Neposredna metoda predstavlja preslikavo vhodnega (a) na izhodni (b) posnetek (slika 3) na način, da uporablja notranje in zunanje značilnosti sensorja za neposredno preslikavo vsebine posnetka na celice DMR. Točka preseka s terenom ( $X, Y, Z$ ) se nato shrani na ortofotu. Postopek se izvaja iterativno in lahko se zgodi, da nekatere celice DMR ne pridobijo nobene sive vrednosti. Zaradi tega te celice interpoliramo iz sosednjih.



Slika 3: Neposredni postopek preslikave

Postopek posredne transformacije, predstavlja preslikavo iz izhodnega ortoposnetka (b) na izvorni posnetek (a) (slika 4) oziroma se postopek rektifikacije začne s preslikavo robne točke celice DMR na ravnino izvirnega posnetka. Sive vrednosti preslikave se določijo z interpolacijo, vendar na izvornemu posnetku, kar je lažje za izvajanje in je interpolacija možna takoj za vsak izhodni piksel. Na ta način se na ortofoto preslikajo samo potrebni piksli.



Slika 4: Posredni postopek preslikave

Po končani preslikavi dobimo 3D-koordinate  $(X, Y, Z)$ , ki se pripišejo centru piksla, iz katerega izhaja žarek, in na ta način piksel ortorektificiramo. Koordinato  $Z$  izračunamo z interpolacijo vrednosti vogalnih višin celice DMR, znotraj katerega se nahaja presek slikovnega žarka. Po ortorektifikaciji je vsak piksel dobljene podobe »geometrično zanesljiv« (Marsetič in Oštir, 2006). To pomeni, da je vsaka meritev, ki se jo opravi na ortorektificirani podobi, praktično enaka meritvi, ki bi se jo opravilo na zemeljski površini (ob upoštevanju merila).

Drugi del izdelave ortofota je mozaičenje. Zaradi velike površine terena, ki jih ortoposnetki pokrivajo, se pri ortorektifikaciji ne obdeluje celotnega območja naenkrat. Obdela se nekaj posnetkov in na koncu se vsi ortorektificirani posnetki združijo. Prvi korak mozaičenja je določanje stičnih linij vzdolž področij, ki so na sosednjih ortoposnetkih podobni. Postopek določanja je lahko ročni ali avtomatski.

Ročno iskanje po navadi poteka vzdolž središčne linije ceste. V primeru avtomatskega iskanja lahko stične linije določimo vzdolž središča prekritja posnetkov ali pa odštejemo en posnetek od drugega in stične linije določimo vzdolž minimalne razlike med posnetkoma. Drugi korak mozaičenja je barvno ali radiometrično ujemanje, pri katerem se izenačita barva in svetloba ortoposnetkov v bližini stičnih linij, tako da se te linije prikrijejo. Preostale razlike se zbrisejo s tretjim korakom, tako da se naredi gladek rez, ki počasi zbledi.

### 2.1.3 Kakovost ortofota

Ortofoto je izdelek, ki je nastal kot posledica združevanja različnih virov in podatkov in je zato njegova kakovost odvisna od kakovosti prej naštetih vhodnih podatkov. Kakovost ortofota je torej odvisna od več različnih parametrov. Ti so:

- kakovost in ločljivost izvirnega posnetka,
- kakovost parametrov zunanje in notranje orientacije,
- kakovost digitalnega modela višin (DMR, DMP),
- uporabljene metode za geometrično in semantično transformacijo,
- časovna ažurnost vhodne slike.

Kakovostna fotografija je osnovni element pri izdelavi ortofota. Kakovost fotografije je odvisna od načina slikanja, karakteristike uporabljene opreme in operaterja. Sestavljena je iz najmanj petih komponent: kontrasta, zamegljenosti, šuma, distorzije in artefaktov, ki nastanejo zaradi pomanjkljivosti uporabljene programske opreme (angl. software). Zelo pomemben element fotografije, predvsem z vidika geometrije, je ločljivost, ki nam daje podatek o podrobnosti posnetka. Na ločljivost neposredno vpliva zbiralna površina objektiv. Večja kot je zbiralna površina, večja je ločilna sposobnost. Na ločljivost vpliva tudi kakovost optike in točnost izdelave. Navsezadnje pa na ločljivost pogosto vplivajo tudi razmere v ozračju in sposobnost opazovalčevega očesa. Vse pogoške, ki lahko vplivajo na kakovost izvirnega posnetka, skušamo zmanjšati na najmanjšo možno mero z uporabo različnih postopkov.

Natančnost parametrov oziroma sami elementi notranje orientacije so podani v kalibracijskem poročilu fotoaparata, ki ga izda proizvajalec. Čeprav so profesionalni fotoaparati za letalsko snemanje izdelani robustno, se s časom ti parametri spremenijo, zato je treba kalibracijo ponoviti v določenem časovnem obdobju (redno vsaj na vsake dve leti) (Kosmatin Fras, 2004).

Elemente zunanje orientacije lahko pridobimo iz postopka aerotriangulacije. Parametri za vsak posnetek (koordinate projekcijskega centra in koti zasukov) se pridobijo z izravnavo v projektu aerotriangulacije blokov in se skupaj z oceno natančnosti nahajajo v poročilu o aerotriangulaciji.

Natančnost parametrov se oceni na osnovi vnaprejšnje (apriori) ocene natančnosti oslonilnih točk, neodvisne primerjave med izračunanimi koordinatami in terensko izmerjenimi koordinatami na kontrolnih točkah (Kosmatin Fras, 2004).

Višinski model je pomemben vhodni podatek za rektifikacijo aeroposnetkov. Digitalni model višin (DMV) je po definiciji podatkovna zbirka, ki omogoča interpolacijo poljubne točke terena z vnaprej definirano višinsko natančnostjo (Kölbl, 2001). Za klasičen način rektifikacije posnetka je v uporabi model terena z vegetacijo ali brez nje (DMR). Na urbanih območjih pa je pomembno, da opredelimo tudi digitalni model zgradb, ki ga lahko uporabimo v kombinaciji z DMR na odprtem terenu. Ker takšen model predstavlja površje, kot ga vidimo iz zraka, se uporablja tudi izraz digitalni model površja (DMP). Ker bomo v naslednjem poglavju obdelali uporabo in vpliv modelov višin na izdelavo popolnega ortofota, bo zdaj predstavljena samo njegova natančnost.

Kot je že omenjeno, ima DMV velik vpliv na izdelavo ortofota, saj njegova natančnost neposredno vpliva na njegovo položajno točnost. Pogreški pri položajni točnosti so rezultat premika reliefa. Z uporabo geometrijske analize podobnih trikotnikov, prikazanih na sliki 5, izpeljemo enačbo (Kraus, 1993):

$$\Delta\rho = \Delta R \cdot \frac{c}{Z} = \Delta Z \cdot \frac{\rho}{Z} = \Delta Z \cdot \frac{\rho}{m \cdot c}, \quad (1)$$

kjer je:

$\Delta\rho$  ... radialni pogrešek na slikovni ravnini zaradi višinskega pogreška določene točke,

$\rho$  ... slikovna radialna razdalja med poljubno in glavno točko posnetka,

$\Delta R$  ... radialni pogrešek planimetričnih koordinat točke na terenu,

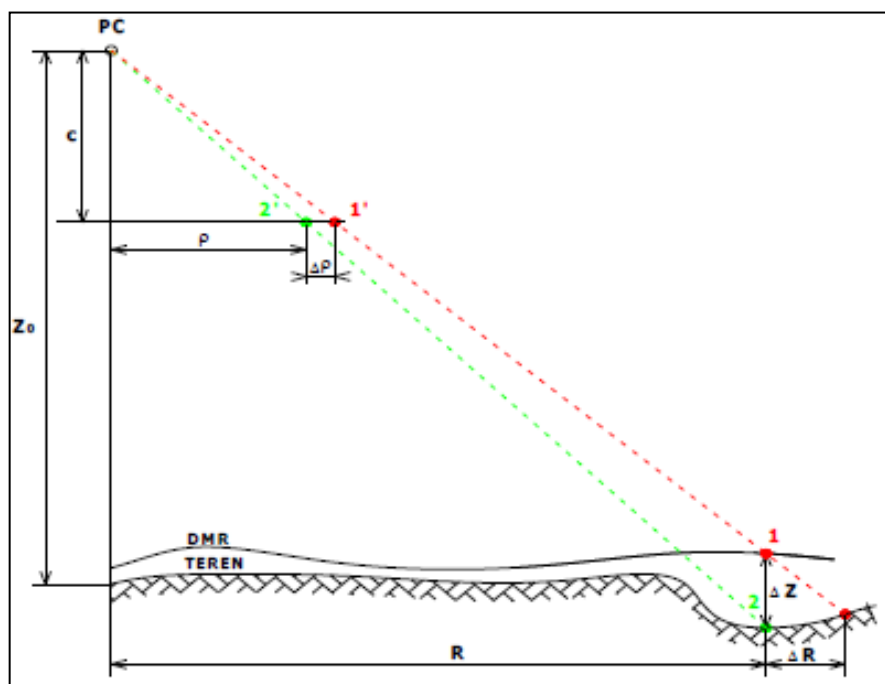
$\Delta Z$  ... vertikalni pogrešek točke,

$c$  ... goriščna razdalja (konstanta) fotoaparata,

$Z$  ... snemalna višina,

$m$  ... modul merila posnetka.

Iz enačbe (1) je razvidno, da se horizontalni pogreški ortofota zaradi pogreškov DMV večajo linearno z oddaljevanjem od središčne točke posnetka, z manjšanjem konstante fotoaparata in z manjšanjem snemalne višine (Hartman, 2008).



Slika 5: Vpliv natančnosti digitalnega modela višin na ortofoto (Hartman, 2008: 8)

Pri geometrični transformaciji, ki se natančno izvede z enačbo centralne projekcije posnetka, zaradi kompleksnosti izračuna izkoristimo poenostavitev z uporabo interpolacije med sidrnimi točkami. Za izračun slikovnih koordinat znotraj celic DMR se namesto enačbe centralne projekcije uporabi bilinearna transformacija. S tem v slikovnih koordinatah naredimo napako  $\delta$ , ki jo izračunamo po empirično določeni enačbi (Kraus, 2007):

$$\delta = \frac{s^2}{4 \cdot c} \cdot \tan \alpha, \quad (2)$$

kjer je:

- $\alpha$  ... naklonski kot terena,
- $c$  ... konstanta fotoaparata,
- $s$  ... velikost celice DMR v merilu fotografije.

Tudi pri ekstremnih vrednostih vhodnih podatkov (za primer:  $c = 150$  mm, višina leta = 3 km, stranica celice DMR = 50 m,  $\alpha = 50$  %) je napaka  $\delta$  zanemarljive velikosti  $5\mu\text{m}$ .

Pri določitvi radiometričnih vrednosti pikslov je pogosto uporabljena metoda najbližjega sosredstva. To je najenostavnejša metoda, ki deluje po principu izbire tiste radiometrične vrednosti piksla, katerega center je najbližji projicirani točki. Kot pravi Kosmatin Fras (2004), je glavni minus te metode precej velika interpretacijska napaka, ki je lahko za cel posnetek velika tudi do 30 % vsebine posnetka. Vendar tudi druge metode vsebujejo interpretacijsko napako. Veliko bolj primerna je metoda linearne interpolacije med štirimi piksli. Pri tej metodi je napaka interpolacije le nekaj odstotkov za cel posnetek. Druge metode predstavljajo transformacije višjih redov (bikubična, polinomska ...). Te

metode niso smiselne, saj se ob precej večji računski zahtevnosti interpretacijska napaka bistveno ne zmanjša (Hartman, 2008). Pomembna za natančnost ortofota je tudi njegova časovna ažurnost. Datum ortofota je datum letalskega snemanja in ne njegove izdelave. Pri prekrivanju podatkov ortofota s podatki iz drugih podatkovnih baz je treba upoštevati njihovo morebitno časovno neskladje (Kosmatin Fras, 2004).

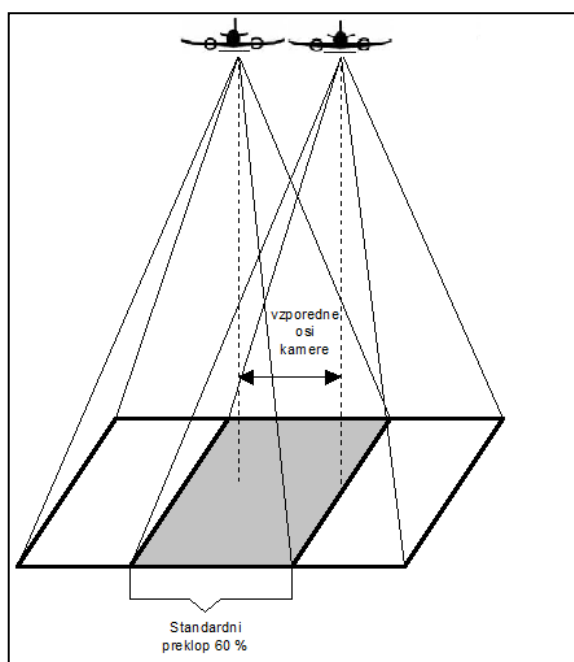
## 2.2 Slabosti navadnega ortofota in prehod na popolni ortofoto

Z namenom, da bi se izognili nelinearnim premikom reliefa, ki je problem centralne projekcije, se za izdelavo klasičnega ortofota uporablja digitalni model reliefa. Ta model običajno ne vsebuje podatkov o objektih, ki so nad površjem, kot so zgradbe in mostovi. To je razlog, zaradi katerega ti objekti pri izdelavi ortofota niso pravilno umeščeni v prostor; to pomeni, da se ne nahajajo na svojih pravih položajih. Ti objekti niso pravilno ortorektificirani. Posledica take nepravilnosti je nagnjenost visokih objektov, kot se zgradbe, ki tako zakrivajo okolico. Objekti, kot so mostovi, se na posnetku zdijo upognjeni navzdol zaradi sledenja terenu pod njimi. Dodatna slabost običajnih ortoposnetkov oziroma algoritmov za njihovo izdelavo je, da ne zaznajo zakritih območij in tako tudi njim pripišejo radiometrično vrednost, kar vodi do dvojnega kartiranja (slika 6). Na levi sliki vidimo običajni aeroposnetek v centralni projekciji, ki vsebuje pogrešek premika reliefa. Desna slika prikazuje ustrezeni ortofoto, na katerem je premik reliefa odstranjen, vendar pa so vidna območja dvojnega kartiranja, ki so označena s črno barvo. Navedene slabosti so vplivale na izdelavo boljše alternative, tj. popolnega ortofota.



Slika 6: Aeroposnetek v centralni projekciji (levo) in iz njega izdelan ortofoto (desno), ki prikazuje označene posledice dvojnega kartiranja (Kim, Ghanma in Habib, 2006: 4)

Termin popolni ortofoto pove, da tradicionalni ortofoto dejansko ne predstavlja pravičnega ortoposnetka. Danes pojem popolni ortofoto uporabljamo za ortoposnetke, ki vsebujejo površinske elemente (zgradbe, mostovi), ki niso del digitalnega modela reliefa in so pravilno rektificirani v ortogonalno projekcijo. V splošnem popolni ortofoto temelji na digitalnih modelih površja, ki vsebujejo samo teren, zgradbe in mostove. Ta model se uporablja za potrebe aerofotogrametrije.



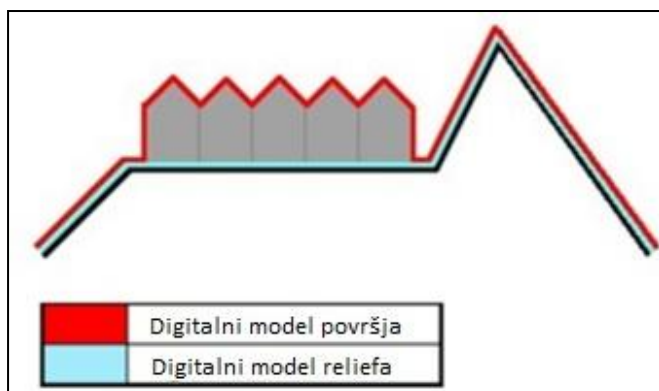
Slika 7: Kombinacija več posnetkov istega območja za popolno prekritje

Popolni ortofoto predstavlja tudi proces kompenzacije učinka dvojnega kartiranja, ki je posledica zakritih območij. Da bi se izognili tej napaki, je za ta območja treba določiti vrednost, kar je možno z uporabo posnetkov istega območja, posnetih iz različnih perspektiv (slika 7). Primer takih posnetkov so aeroposnetki z ustreznim preklpom, ki naj bi bil najmanj 60 % na vseh štirih straneh posnetka.



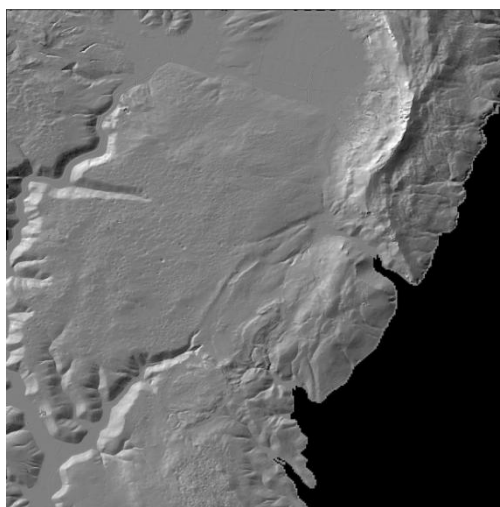
### 3 DIGITALNI VIŠINSKI MODELI

Preden začnemo govoriti o podrobnostih izdelave popolnega ortofota, je treba pojasniti enega od osnovnih vhodnih podatkov. Govorimo o digitalnem modelu višin (DMV) (angl. Digital Elevation Model – DEM) oziroma o digitalnem modelu reliefa (DMR) (angl. Digital Terrain Model – DTM) in digitalnem modelu površja (DMP) (angl. Digital Surface Model – DSM). O zgoraj naštetih pojmih DMV in DMR obstaja nekaj zmede. Pojem digitalni model višin je namreč pogosto uporabljen kot splošni izraz za digitalni model površja in digitalni model reliefa, ki prestavlja samo informacije o višinah brez dodatne razlage o površju (Peckham, R., Jordan, G., 2007, cit. po Wikipedia, 2011). Druge opredelitve izenačujejo pojma DMV in DMR (Podobnikar, 2001) ali pa definirajo DMV kot podskupino digitalnega modela reliefa, ki predstavlja tudi druge morfološke elemente (DIN standard 18079-1, cit. po Wikipedia, 2011). Obstajajo tudi definicije, ki izenačujejo pojma DMV in DMP (Graham, A., et al. 2007, cit. po Wikipedia, 2011). Na spletu lahko najdemo opredelitve, ki DMV definirajo kot digitalno pravilno razporejeni GRID in DMP kot realni trirazsežni model (TIN). V nadaljevanju je pojem DMV uporabljen kot splošni izraz za digitalni model reliefa in digitalni model površja (slika 8).



Slika 8: Razlika med digitalnim modelom površja in digitalnim modelom reliefa (Wikipedia)

Digitalni model reliefa je prikaz zemeljske oblike, ki ne vsebuje stavb in vegetacije. To je najpogostejša oblika višinskih modelov (slika 9). DMR vsebuje podatke o višinah terena v digitalni obliki, običajno prikazanega kot celična mreža. Vegetacija, stavbe in ostali zgrajeni objekti so digitalno odstranjeni. Digitalni model reliefa običajno povezujemo z rastrskim prikazom, ki vsebuje podatke o višinah in položaju, predstavljenih v kartezičnem koordinatnem sistemu, tj. kot koordinate X, Y in Z. Modeliranje reliefa terena z uporabo DMR je močno orodje GIS analize in vizualizacije.

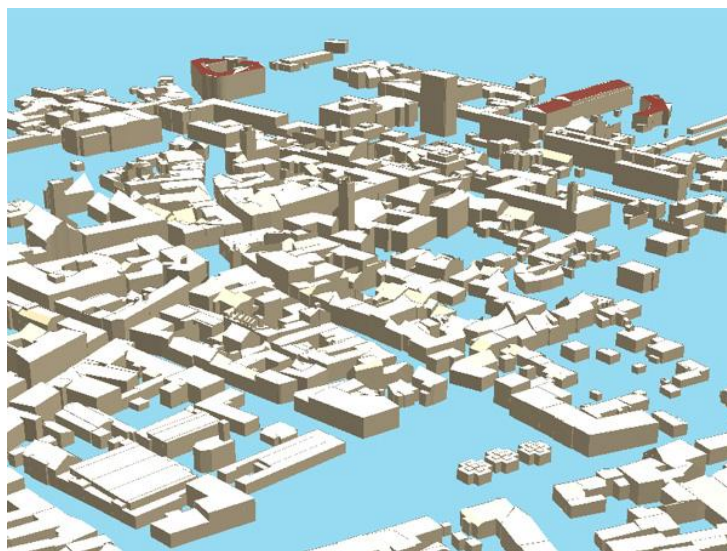


Slika 9: Digitalni model reliefa (Geofoto d.o.o.)

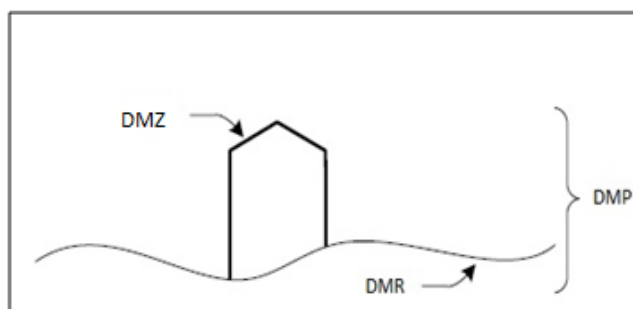
DMR je možno shraniti kot GIS bazo podatkov na več različnih načinov:

- z uporabo niza plastnic,
- kot pravilno celično mrežo ali kot
- nepravilno trikotniško mrežo (angl. Triangular Irregular Network, TIN).

Za razliko od DMR, bi digitalni model površja razen reliefa vseboval vse statične objekte na terenu, torej vegetacijo, stavbe in ostale zgrajene objekte. Ker je vegetacijo težko modelirati, vsebuje DMP po navadi samo podatke o reliefu in stavbah, kot je tudi v primeru moje diplomske naloge. Podatke o stavbah dobimo iz digitalnega modela zgradb DMZ (angl. Digital Building Model) (slika 10), ki skupaj z DMR tvorita digitalni model površja (slika 11).



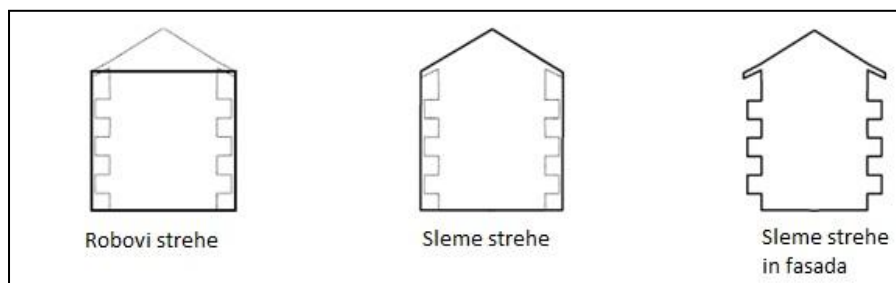
Slika 10: Digitalni model zgradb (Zavod za Fotogrametriju d.d.)



Slika 11: Digitalni model reliefa in digitalni model zgradb skupaj tvorita digitalni model površja

Digitalni model zgradb je lahko predstavljen v različni stopnjah prikazanih detajlov (angl. Level of Detail, LOD). DMZ, na katerem so prikazani le robovi strehe in ne cela konstrukcija, predstavlja prvo stopnjo detajla (LOD1). Večnapredni digitalni model zgradb vsebuje razen robov tudi slemena streh in tako bolj natančno ponazarja površino (LOD2).

Tretja stopnja detajla (LOD3) vsebuje še podatke o fasadi objekta, za kar potrebujemo terestrično fotogrametrijo (slika 12). DMZ s tako veliko količino detajlov je zelo drag in je za potrebe izdelave popolnega ortofota nepotreben. Dovolj je uporabiti DMZ z nižjo stopnjo prikaza detajla (LOD1 ali LOD2).



Slika 12: Tri stopnje prikaza detajlov (LOD) (Nielsen, 2004: 20)

Z uporabo DMR je postopek ortorektifikacije posnetka lahko geometrijsko nepravilen ali pa nedokončan, saj so objekti premaknjeni z njihove prave pozicije, ker niso modelirani v DMR (slika 13). Z uporabo digitalnega modela površja in z upoštevanjem zakritih območij je mogoče narediti popolni ortofoto, ki ne vsebuje zgoraj omenjenega problema, s čimer je omogočeno merjenje pravega položaja objekta na ortofotu.



Slika 13: Ortofoto izdelan na osnovi digitalnega modela reliefa; objekti so premaknjeni z njihove prave pozicije (Barazzetti, Brovelli in Scaioni, 2007: 27)

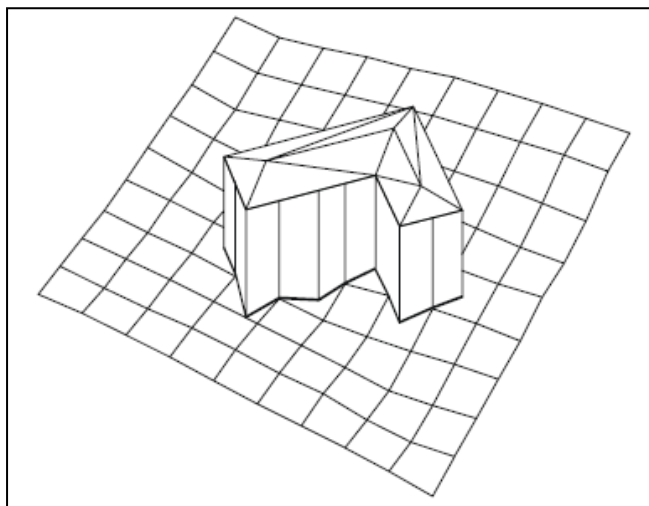
Čeprav je uporaba DMP namesto DMR ključ za izdelavo najnatančnejšega ortoposnetka, tudi ta povzroča naslednje težave:

- Zakrita območja, ki se pojavljajo na enem posnetku, je treba zapolniti z združevanjem več ortoposnetkov, ki se prekrivajo. Ker nimamo vedno na razpolago dovolj takih ortoposnetkov, se pogosto zgodi, da ne moremo zapolniti vseh zakritih območij.
- Strehe morajo biti pravilno modelirane, sicer so na ortoposnetku prikazane izkrivljeno ali pa imajo neostre robove. Natančno modeliranje različnih streh z vsakim detajlom je lahko zelo komplicirano, če je postopek avtomatski, ali pa časovno zamudno, če je merjenje interaktivno.

V diplomski nalogi je v postopku ortorektifikacije uporabljen DMP, ki je rezultat združitve digitalnega modela reliefa in digitalnega modela zgradb. DMR in DMZ sta v enem primeru pridobljena s postopkom fotogrametričnega vektorskega zajema in v drugem na osnovi klasifikacije oblaka lidarskih točk.

#### 4 IZDELAVA DIGITALNEGA MODELA POVRŠJA

Kot že rečeno, je digitalni model površja rezultat združevanja digitalnega modela reliefa in digitalnega modela zgradb (slika 14). Pomembno je torej, da najprej razložimo, kako zajemamo podatke za izdelavo teh modelov ter način njihovega modeliranja.



Slika 14: Združena digitalni model zgradb in digitalni model reliefa (Amhar, Jansa in Ries, 1998: 3)

##### 4.1 Zajem podatkov za digitalni model površja

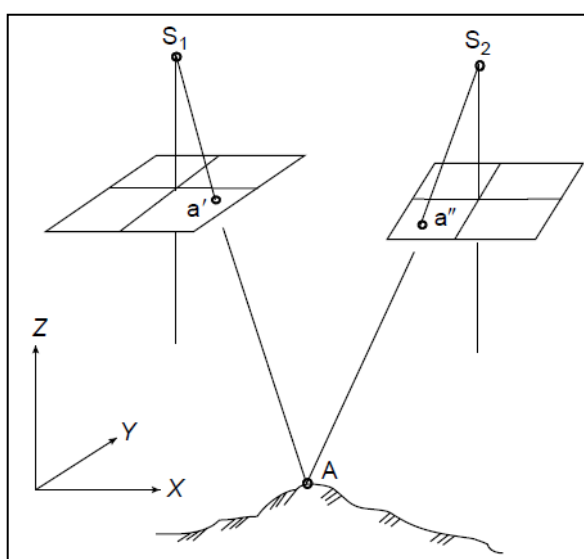
Digitalni modeli površja se lahko pripravijo na več načinov, vendar so pogosteje pridobljeni z daljinskim zaznavanjem kot z neposrednim opazovanjem na terenu. Učinkovita metoda izdelave DMP je uporaba aeroposnetkov (fotogrametrija). Za izdelavo DMP so najpomembnejši vhodni podatki, od katerih je tudi odvisna natančnost modela. Metode zajema podatkov za modeliranje reliefa so lahko neposredne, posredne ali kombinacija neposredne in posredne metode zajema. Vhodne podatke izmerimo z različnimi tehnikami, kot so na primer:

- terenska opazovanja z uporabo elektronskega tahimetra in RTK (angl. Real Time Kinematic);
- metoda GNSS za neposredno zajemanje podatkov na površini terena;
- fotogrametrija, kjer uporabljamo stereopare aero- (ali satelitske) posnetke in fotogrametrične inštrumente;
- kartografska digitalizacija že obstoječih topografskih kart za posreden zajem;
- aero lasersko skeniranje (lidar).

V praktičnem delu diplomske naloge sta bili uporabljeni fotogrametrična metoda in lidar, zato sta razloženi v nadaljevanju.

### 4.1.1 Fotogrametrični zajem podatkov

Osnovni princip fotogrametrične metode zajema podatkov za izdelavo digitalnega modela površine temelji na uporabi stereoparov aeroposnetkov. Princip temelji na vzpostavitvi stereomodela in nato na merjenju 3D-koordinat točk na stereomodelu. Stereopar predstavlja dva posnetka istega območja, ki sta posneta iz dveh različnih položajev, tako da imata določen odstotek prekrivanja vsebine. Rekonstrukcija objektov je možna edino na območju, kjer obstaja prekrivanje med posnetkoma (slika 15). Prekrivanje posnetkov v aerofotogrametriji po navadi znaša 60 % v smeri leta in 30 % med sosednjimi snemalnimi pasovi (Li, Zhu in Gold, 2005).



Slika 15: Stereomodel kot rezultat pravilne orientacije stereopara (Li, Zhu in Gold, 2005: 38)

Vsak posnetek je opisan s šestimi orientacijskimi elementi – tremi elementi zasukov in tremi elementi premika. Te elemente lahko določimo z uporabo naprav GNSS in INS v letalu ali z merjenjem oslonilnih točk na terenu in na posnetku.

V digitalni fotogrametriji se uporabljajo posnetki v digitalni obliki, zato so koordinate točke podane s položajem piksla v slikovni matriki. Če imamo točko podano na levem posnetku, lahko z uporabo metode slikovnega ujemanja avtomatsko poiščemo odgovarjajočo homologno točko na desnem posnetku. Sodobni računalniški programi za reševanje različnih fotogrametričnih nalog so danes integrirani v digitalnih fotogrametričnih postajah (DFP). Digitalne fotogrametrične postaje omogočajo avtomatizacijo številnih fotogrametričnih postopkov, med drugim uporabo različnih tehnik slikovnega ujemanja, s katerimi se lahko podatki za izdelavo DMP samodejno zajamejo. Za zajem DMP pa se lahko uporabijo tudi ročne metode fotogrametričnega zajema iz stereoparov.

#### 4.1.1.1 Ročni zajem podatkov iz stereoparov

Če merimo na stereoposnetkih, ki so relativno in absolutno orientirani v izbranem koordinatnem sistemu, merimo stereoskopsko paralakso (razliko slikovnih koordinat) točke, kar nam omogoča določitev višinske komponente te točke.



Slika 16: Digitalna fotogrametrična postaja Delta (INGEOCAD)

Vse stereoskopske naprave – analitični stereoploter, digitalna fotogrametrična postaja – uporabljajo princip premikajoče prostorske marke ali kurzorja. Stereoskopska paralaksa je vidna kot razlika med prostorsko marko na levem in desnem posnetku. Z združitvijo obeh mark v eno oziroma s »spuščanjem« prostorske marke na višino objekta obravnave določimo njegoovo višinsko koordinato in jo skupaj s položajnjima koordinatama shranimo. Za doseg stereo učinka na digitalni fotogrametrični postaji se uporabljajo različni principi, npr.: »crystal eyes«, polarizacijski princip, anaglifni princip itd. (Hartman, 2008) (slika 16). Večina teh DFP omogoča avtomatsko združevanje prostorske marke, ko se z miško sprehajamo po terenu. Ta postopek je osnova za avtomatsko ekstrakcijo podatkov DMP oz. za slikovno ujemanje.

Za razliko od individualnega merjenja 3D-položaja točk, razdalj, območja, volumna, kotov, naklonov nam digitalna fotogrametrična postaja omogoča neposredno zajemanje georektificiranih vektorskih podatkov v obliki točk, linij ali poligonov. Te podatke lahko uporabimo za nadaljnje izračune, analiziranje in vizualiziranje.

#### 4.1.1.2 Avtomatski zajem podatkov na stereoparih s slikovnim ujemanjem

Z razvojem digitalne fotogrametrije se je odprla možnost avtomatskega zajema podatkov na stereoparih z uporabo stereo korelacije ali slikovnega ujemanja. V fotogrametriji in daljinskem zaznavanju ujemanje (angl. matching) lahko opredelimo kot vzpostavitev skladnosti med različnimi podatkovnimi nizi (Potučkova, 2004, cit. po Kuveždić, 2006).

Ročno topografsko kartiranje iz stereoparov, ki ga izvaja operater, običajno izpolnjuje dve nalogi: postavljanje prostorske marke na objekt ali točko tako, da združi desni in levi posnetek objekta v stereoskopski pogled in interpretacija vsebine v različne razrede (npr.: drevo, cesta, stavba ali višinska točka). Prva naloga vključuje primerjavo dveh izsekov posnetka in ugotavljanje njihove podobnosti. Postopek se lahko izvaja avtomatsko z računalniško obdelavo. Druga naloga vključuje prepoznavanje, razlikovanje in interpretacijo individualnih objektov, kar izvaja človek, ker je še vedno bolj natančno, kot če bi to naredili avtomatsko, čeprav so tehnike razpoznavanja vzorcev in zajem pojavov še naprej pomembne teme raziskave (Bartels in Wei, 2007, cit. po Aber, Marzolff in Ries, 2010).

Na osnovi dveh osnovnih metod slikovnega ujemanja (ujemanje območij in ujemanje geometrijskih elementov) so razvite različne hibridne metode (Wolf in Dewitt, 2000, cit. po Aber, Marzolff in Ries, 2010). Vse se ukvarjajo s statističnim ugotavljanjem korespondence med dvema ali več območji ali pojavi na posnetku za identifikacijo homolognih slikovnih točk na drugi podobi. Kakovost in količina višinskih točk sta odvisna od vrste prekritja terena ter od karakteristike podobe, kot so šum in kontrast. Temna in osenčena območja imajo pogosto nizek korelacijski koeficient zaradi povečanega šuma, zaradi homogeno gladkega terena pa je možno, da nima dovolj teksture za uspešno slikovno ujemanje. Torej slikovno ujemanje predstavlja postopek, ki izbrani točki s pomočjo matematičnih in statističnih metod avtomatsko poišče najbolj verjetno homologno točko na drugi podobi (Hartman, 2008). Iskanje homolognih točk se lahko izvede v dveh dimenzijah, na primer v pravokotniku, ki je usmerjen vzdolž približnega epipolarnega žarka v primeru relativne orientacije stereopara. V primeru, ko so znani orientacijski parametri, je iskanje lahko omejeno na eno dimenzijo, in sicer neposredno na epipolarni žarek, kot se to dela pri izmeri DMR.

Ključna točka slikovnega ujemanja je izbira entitete za ujemanje (angl. matching entity) (preprost element, katerega primerjamo s preprostim elementom na drugi podobi) in stopnja podobnosti (številčna mera za vrednotenje ujemanja entitet).

Ločimo tri vrste slikovnega ujemanja:

- ujemanje območij (angl. area-based matching),

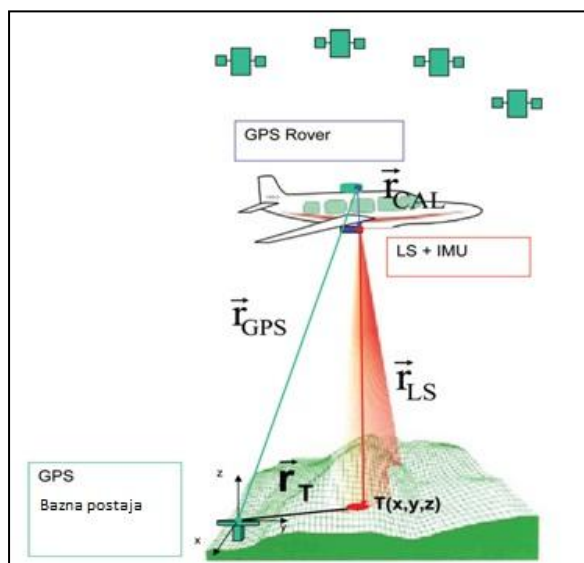


- ujemanje geometrijskih elementov (angl. feature-based matching),
- strukturno ujemanje (angl. structural matching).

Več o vsaki od naštetih metod slikovnega ujemanja je napisano v Peteraki (2000).

#### 4.1.2 Aero lasersko skeniranje

V predhodnem poglavju je opisana metoda avtomatskega zajema podatkov z uporabo stereo slikovnega ujemanja. Čeprav ta metoda prikazuje dobre rezultate za odprte terene, lahko pride do težav na območjih, kot so gozdovi, močvirja ter obalna in mestna območja. Tehnologija aero laserskega skeniranja pa se uspešno izkaže ravno v takšnih zahtevnih pogojih. Ta sistem zračnega laserskega skeniranja (ALS, angl. airborne laser scanning) po navadi imenujemo krajše tudi lidar, kar je kratica za Light Detection And Ranging (ang. LiDAR ali LIDAR).



Slika 17: Aero lasersko skeniranje (Geofoto d.o.o.)

Lasersko skeniranje se izvaja z merjenjem časa potovanja laserskega žarka od oddaje do prejema in odklona žarka glede na izhodiščno smer. Iz merjenih osnovnih podatkov se izračunajo 3D koordinate merjenih točk, ki predstavljajo oblak točk. Glavna sestavna dela laserske naprave sta laserski razdaljemer in naprava za odklon laserskega žarka. Laserska naprava je sestavni del integriranega sistema, ki vključuje GNSS (npr. GPS) ter inercialni navigacijski sistem INS (slika 17).

Postopek merjenja oddaljenosti poteka v naslednjih korakih:

- laser oddaja optični impulz (žarek);
- žarek se odbija od objekta in se vrne v sprejemnik naprave;

- natančna merska naprava meri čas med trenutkom oddaje in sprejemom signala;
- iz izmerjenega časa se izračuna oddaljenost od skenerja do točke na površju; tako dobimo polarne koordinate (odklon, razdalja), ki so osnova za izračun kartezičnih koordinat v referenčnem koordinatnem sistemu;
- za določevanje koordinat točk je treba poznati tudi položaj in orientacijo senzorja. Ta informacija se pridobi na osnovi GNSS/INS-opazovanj.

Enačba za izračun razdalje med lasersko napravo in točko na površju je (Li, Zhu, Gold, 2004):

$$R = c \cdot \frac{t}{2} \quad (3)$$

oziroma

$$\Delta R = c \cdot \frac{\Delta t}{2}, \quad (4)$$

pri čemer je:

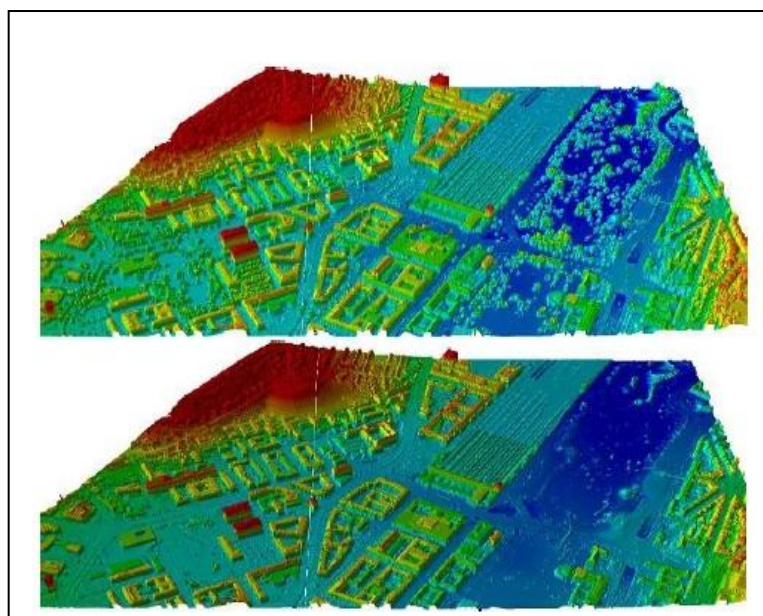
$R$  ... razdalja med senzorjem in objektom (m),

$\Delta R$  ... ločljivost merjenja razdalje (cm),

$t$  ... časovni interval med oddajo in sprejemom žarka (ns),

$\Delta t$  ... ločljivost merjenja časa (ns),

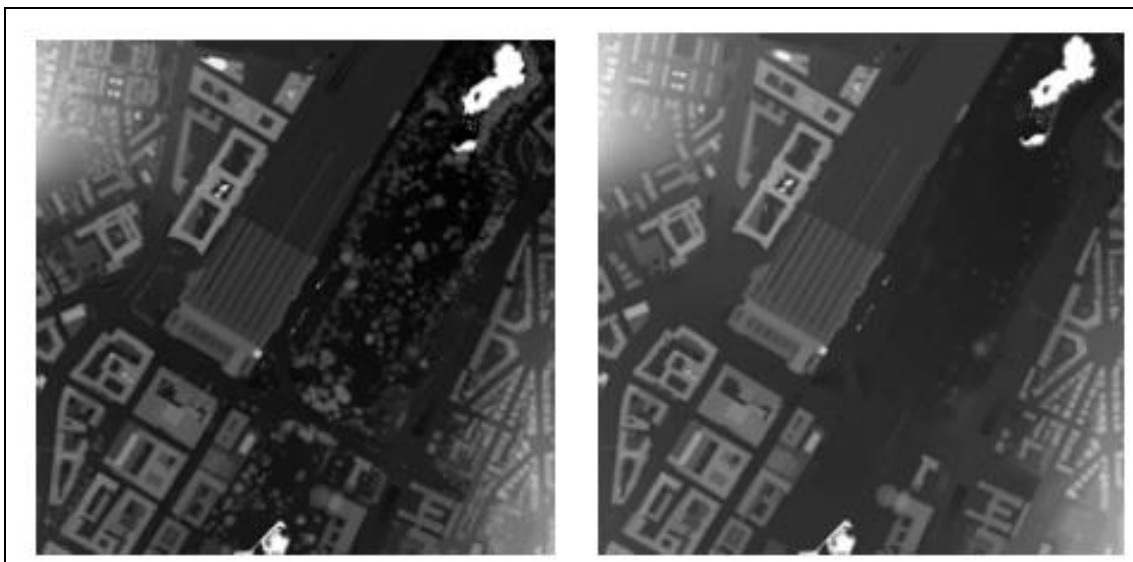
$c$  ... hitrost svetlobe ( $\approx 300.000$  km/s).



Slika 18: Barvno kodirani prvi (zgoraj) in zadnji (spodaj) odboj žarka (Günay, Arefi in Hahn, 2007: 2 )

Laserski žarek, ki se odbije na vegetacijskih območjih, ima običajno več odbojev. Najpomembnejša značilnost današnjih zračnih lidarskih sistemov je možnost razlikovanja med prvim in zadnjim odbojem žarka. Prvi odboj žarka se zgodi na površini krošnje, medtem ko zadnji odboj žarka najbolj

verjetno predstavlja površino terena pod drevesoma (slika 18). Lidar omogoča tudi beleženje jakosti odboja (slika 19). Odvisno od odbojne lastnosti talne površine, npr. dreves in zgradb, se intenziteta odboja lahko prikaže z različnimi odtenki sive barve. Popolnoma bela področja na sliki 19 predstavljajo vodne površine, od katerih se laserski žarki ne odbijajo ter ne dajo nobene informacije.



Slika 19: Slika jakosti prvega odboja žarka (levo) in slika jakosti zadnjega odboja žarka (desno) (Günay, Arefi in Hahn, 2007: 2)

Kot že omenjeno, je rezultat lidarskega opazovanja oblak 3D-točk. Cilj obdelave podatkov ALS oz. lidarskega skeniranja je odstranitev neželenih meritev (v obliki bodisi napačnih meritev bodisi objektov) ali modeliranje podatkov za določene modele terena, kot so DMP, pri čemer prej odstranimo stavbe in vegetacijo. V procesu pridobivanja končnih podatkov so vključeni različni postopki filtriranja, klasifikacije in modeliranja. Filtriranje oblaka točk se nanaša na odstranitev neželenih meritev, npr. za pridobitev talnega površja moramo odstraniti objekte in vegetacijo. Neželene meritve so tudi šum, zunaj ležeče točke (ubežniki) ali grobe napake. Klasifikacija pomeni razvrščanje lidarskih točk v izbrane razrede, npr. stavbe in vegetacija. Generalizacijo klasificiranih objektov predstavlja postopek modeliranja (npr. TIN, kvadratna celična mreža), ki je opisan v naslednjem poglavju. Osnova za izdelavo digitalnega modela površja s pomočjo te metode je ploskovna interpolacija in zanesljiva ekstrakcija robov, ki sta precej odvisni od gostote točk. Današnji laserski skenerji lahko zadovoljijo potrebe za natančno ekstrakcijo robov (npr. Riegl LMS – Q680 laserski skener, ki opazuje 1–10 točk/m<sup>2</sup>).

Natančnost metode je sestavljena iz višinske in položajne točnosti. Položajna točnost je odvisna od natančnosti GPS-pozicioniranja, INS-orientiranja in merjenja odklona laserskega žarka. Na višinsko točnost, vplivata natančnost merjene razdalje in z GPS določene višine ter deloma višina leta (vpliv atmosfere) (Hartman, 2008).



Slika 20: Terestrični (levo) in vesoljski (desno) lidar (Geofoto d.o.o.)

Prednost te tehnologije pred klasičnimi meritvami z elektronskim razdaljemerom je v hitrosti izvajanja meritev, kar zahteva manjši obseg terenskega dela, ter v večji količini opazovanih podatkov. Ker je bila v diplomski nalogi uporabljena le metoda aero laserskega skeniranja, je opisana samo ta. Sicer obstajajo še terestrično, mobilno in vesoljsko lasersko skeniranje (slika 20), ki se delno razlikujejo od ALS-sistemov.

## 4.2 Modeliranje digitalnega modela površja

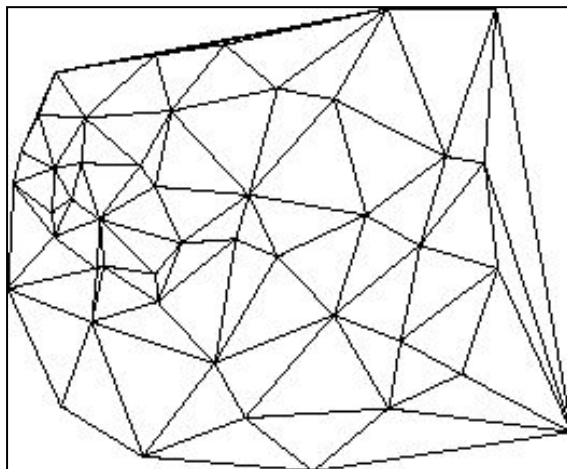
Obstaja več načinov za predstavitev oblike terena. Kot pravi Nielsen (2004), je najbolj znana metoda predstavitve višin s plastnicami na karti, kjer vsaka plastnica sledi določeni višini na terenu. Čim bližje so plastnice med seboj, tim bolj je teren hribovit.

Za namen obdelave podatkov za predstavitev površja je najbolj uporabna mrežna struktura podatkov. Najbolj uporabne oblike mreže za 3D-modeliranje so:

- nepravilna trikotniška mreža in
- kvadratna celična mreža.

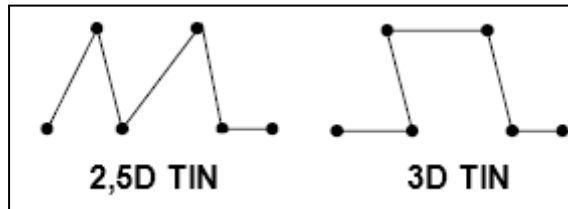
### 4.2.1 Nepravilna trikotniška mreža

Nepravilna trikotniška mreža (angl. Triangulated Irregular Network, TIN) je enostavna in natančna interpolacijska metoda za nepravilno razporejene točke. V modelu TIN so znane točke povezane z linijami tako, da oblikujejo niz trikotnikov (slika 21). Ker je znana vrednost vsakega vozlišča trikotnika in se razdalja med vozliščema lahko izračuna, lahko z uporabo preprostih enačb izračunamo interpolirane vrednosti za vsak položaj znotraj meje nepravilne trikotniške mreže.



Slika 21: Nepravilna trikotniška mreža (History Data Service)

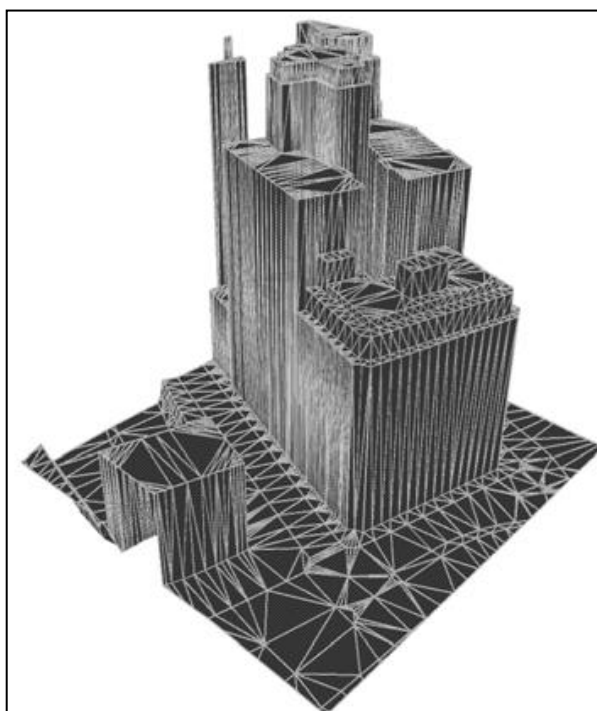
Za povezovanje točk v mrežo trikotnikov obstaja več načinov. Najbolj uporabna je Delaunayeva triangulacija, ki skuša povezati točke tako, da poveča minimalne kote vseh trikotnikov do maksimuma oz. kot pravilen trikotnik vzame samo tistega, katerega očrtan krog ne vsebuje nobene druge točke razen točk, namenjenih za konstrukcijo Delaunayeve triangulacije.



Slika 22: Prečni prerez triangulacij preko enakih točk (Nielsen, 2004: 22)

Ker je navadna triangulacija omejena na samo eno višino v isti točki (2,5 TIN), ni možno, da rekonstruira vertikalne objekte, ki potrebujejo več višin. Ta pomanjkljivost je problem za izdelavo DMP, ki vključuje stavbe, katerih sten in robov ni mogoče pravilno triangulirati. Zaradi tega je treba nadgraditi algoritem ravninske triangulacije, tako da omogoča konstruiranje trikotnikov preko vertikalnih in previsnih objektov (slika 22) (Nielsen, 2004).

Primer DMP na osnovi 3D nepravilne trikotniške mreže je prikazan na sliki 23.

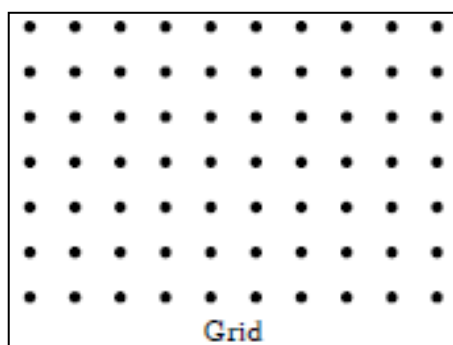


Slika 23: Digitalni model površja na osnovi nepravilne trikotniške mreže (Schickler in Thorpe, 1998: 2)

#### 4.2.2 Kvadratna celična mreža

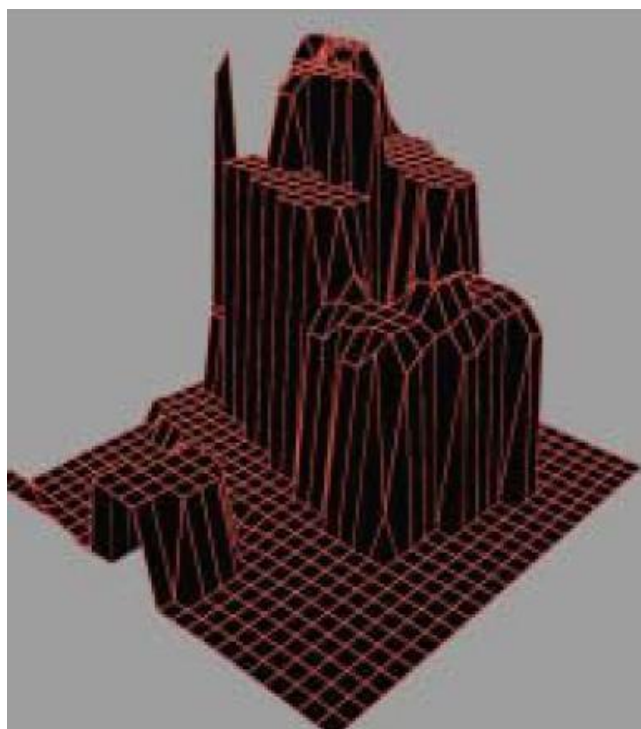
Kvadratna celična mreža je za razliko od TIN pravilna mreža točk (slika 24). Sestavljena je iz enakih kvadratnih celic, ki imajo v vogalih znane prostorske koordinate. Na osnovi vogalnih višin se z uporabo interpolacije izračuna višina poljubne točke znotraj posamezne celice. Točke (X, Y, Z) so v glavnem razporejene v niz vrstic in stolpcov oz. v dvorazsežno matriko. Kvadratna celična mreža se pridobi na osnovi drugih podatkovnih nizov, kot so TIN in plastnice.

Pomanjkljivost te metode je, da z njo dosegamo omejeno natančnost predstavitve terena oziroma površja. Ločljivost detajlov je odvisna od velikosti celice in tako lahko pride do izpuščanja detajlov, zato je ta mreža bolj primerna za predstavitev zveznih in gladkih ploskev.



Slika 24: Kvadratna celična mreža (Nielsen, 2004: 23)

Primer DMP na osnovi kvadratne celične mreže z velikimi celicami je prikazan na sliki 25.



Slika 25: Digitalni model površja na osnovi kvadratne celične mreže (Nielsen, 2004: 24)

## 5 IZDELAVA POPOLNEGA ORTOFOTA

Potem ko so bili posnetki zajeti s postopkom aerosnemanja in je bila izračunana zunanja orientacija posnetkov ter izdelan digitalni model površja, se projekt izdelave popolnega ortofota lahko začne.

Delo razdelimo v naslednje korake:

- ortorektifikacija posnetkov,
- iskanje zakritih območij,
- barvno usklajevanje med posnetki,
- mozaičenje in zabris stičnih linij.

### 5.1 Ortorektifikacija posnetkov

Ortorektifikacija je postopek transformiranja pikslov digitalne podobe v njihov pravilni položaj glede na izbran referenčni koordinatni sistem. Pri izdelavi popolnega ortofota za referenčno ploskev preslikave uporabimo digitalni model površja, ki za razliko od DMR vsebuje model zgradb. Z ortorektifikacijo iščemo presek slikovnih žarkov z DMP in njihovo projekcijo na izbrano horizontalno ravnino. Kot je omenjeno v podpoglavju 2.1.2, obstajata dva načina rektifikacije, in sicer posredni in neposredni. V praksi se največkrat uporablja posredna metoda, pri kateri se za vsak piksel ortofota računa položaj na posnetku in z interpolacijo sosednjih vrednosti (metoda najbližjega sosedja, bilinearna transformacija, kubična interpolacija ...) določi ustrezna radiometrična vrednost.

Da bi lahko transformirali središče posameznega piksla na ortofotu, ki je v referenčnem koordinatnem sistemu, v izvorno digitalno podobo s pomočjo enačbe centralne projekcije, je treba poznati orientacijske parametre posnetka (notranja in zunanja orientacija). Na osnovi notranje orientacije lahko rekonstruiramo žarkovje med projekcijskim centrom in slikovno ravnino. Ti parametri so pridobljeni v kalibracijskem poročilu kamere. Z zunanjo orientacijo posnetek postavimo in orientiramo v tak položaj, kot je bil v času snemanja. Parametre zunanje orientacije pridobimo za vsak posnetek posebej ali za več posnetkov hkrati iz aerotriangulacijskega poročila.

Odnos med slikovnimi koordinatami  $\xi$  in  $\eta$  obravnavane točke na podobi in koordinatami  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  objektne točke je matematično podan z enačbama:

$$\xi = \xi_0 - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} \quad \text{in} \quad (5)$$

$$\eta = \eta_0 - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)}, \quad (6)$$

pri čemer so:

$\xi, \eta$  ... slikovne koordinate obravnavane točke v slikovni ravnini,



$\xi_0, \eta_0$  ... koordinate glavne točke v slikovni ravnini,  
 $X, Y, Z$  ... koordinate obravnavane točke v objektnem koordinatnem sistemu,  
 $X_0, Y_0, Z_0$  ... koordinate projekcijskega centra v objektnem koordinatnem sistemu,  
 $r_{i,j}$  ... elementi rotacijske matrike,  
 $c$  ... konstanta kamere.

Ker tako projiciran žarek ne pade točno na sredino piksla podobe, se radiometrična vrednost izračuna z interpolacijo. Najpogosteje se uporablja bilinearna interpolacija štirih najbližjih pikslov (Kraus, 1993):

$$g_{\xi,\eta} = \left(1 - \frac{\xi}{\Delta} - \frac{\eta}{\Delta} + \frac{\xi \cdot \eta}{\Delta^2}\right) \cdot g_1 + \left(\frac{\xi}{\Delta} - \frac{\xi \cdot \eta}{\Delta^2}\right) \cdot g_2 + \left(\frac{\eta}{\Delta} - \frac{\xi \cdot \eta}{\Delta^2}\right) \cdot g_3 + \frac{\xi \cdot \eta}{\Delta^2} \cdot g_4, \quad (7)$$

pri čemer je/sta/so:

$g_{\xi,\eta}$  ... iskana radiometrična vrednost (na mestu preseka žarka s slikovno ravnino),  
 $\xi, \eta$  ... slikovni koordinati na mestu preseka žarka s slikovno ravnino,  
 $\Delta$  ... velikost piksla,  
 $g_1, g_2, g_3, g_4$  ... radiometrične vrednosti štirih najbližjih pikslov.

## 5.2 Iskanje zakritih območij

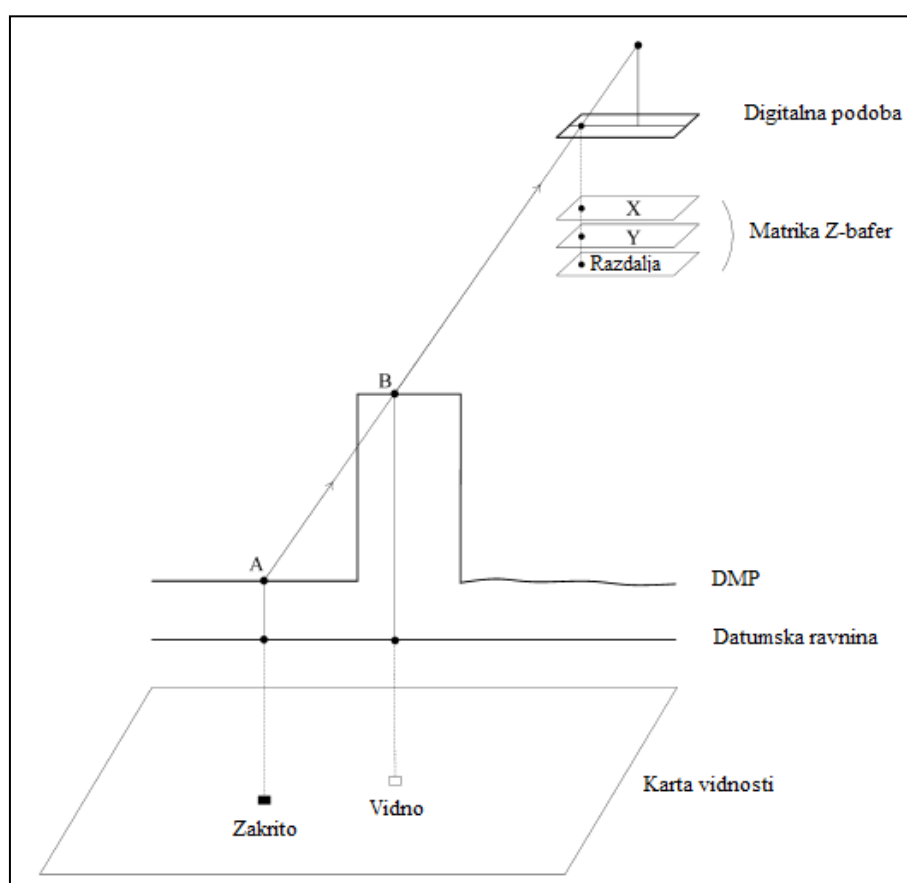
Problem pri izdelavi popolnega ortofota je, da območja, ki so zakrita z izgrajenimi ali drugimi objekti, na podobi niso vidna. Če se ta območja v postopku ortorektifikacije ne odkrijejo, jih aplikacija napolni z vsebino slike iz istega posnetka. Ta problem vodi do nepravilne vsebine na ortofotu. Da bi zaznali zakrita območja, se sočasno s posrednim postopkom ortorektifikacije izvaja ena od metod iskanja zakritih pikslov. Cilj je torej poiskati vse slikovne žarke, ki na svoji poti od površja do posnetka naletijo na drug objekt. Po končanem iskanju dobimo karto vidnosti (angl. visibility map). V diplomski nalogi so predstavljene osnovne metode iskanja zakritih območij.

### 5.2.1 Z-bafer metoda in njene modifikacije

Z-bafer (angl. Z-buffer) metoda identificira zakrita območja tako, da reši problem dvojnega kartiranja oz. dvoumnosti, ki izhajajo iz tega (več kot ena točka ali celica na DMP kandidira za isti piksel). Problem dvoumnosti rešuje z upoštevanjem razdalje med projekcijskim centrom (PC) in točko na objektu, ker velja, da so točke bližje PC na podobi vidne, medtem ko druge niso. Metoda temelji na sestavljanju treh 2D-nizov, ki skupaj tvorijo Z-bafer matriko z isto dimenzijo kot vhodna slika. Dva od treh nizov se uporabljata za shranjevanje koordinat X in Y celice DMP, ki odgovarja izbranemu

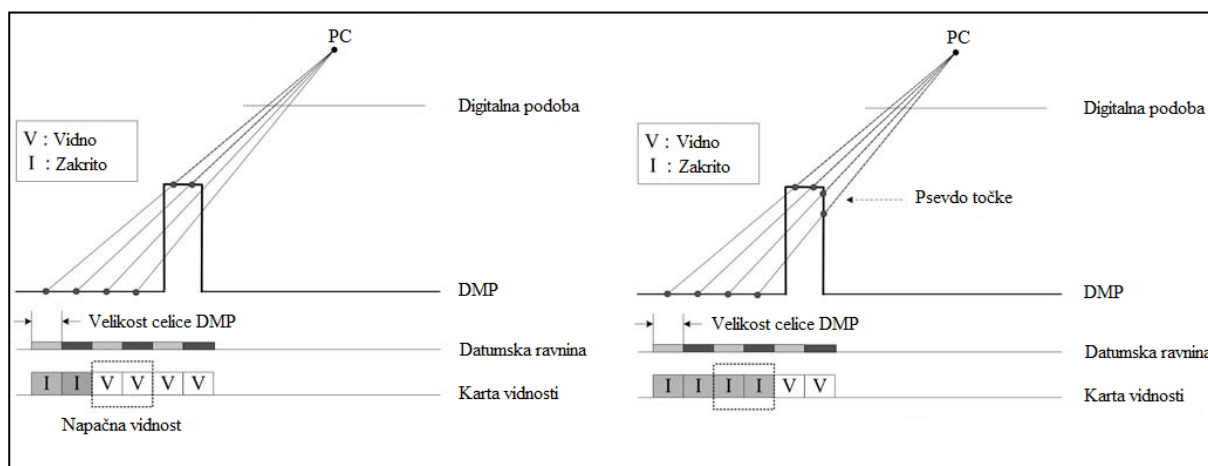
pikslu. V tretjem nizu se shrani razdalja med PC in ustrezno točko digitalnega modela površja. Karta vidnosti pokaže, ali je ustrezna celica DMP vidna v obravnavani podobi ali ne.

Postopek metode Z-bafer je po Habib et al. (2007) prikazan na sliki 26. Koordinate točke A ( $X_A$  in  $Y_A$ ) kot tudi razdalja  $d_A$  med projekcijskim centrom in točko A na objektu so zapisane v matriki Z-bafer. Hkrati karto vidnosti uporabimo za določevanje vidne točke na DMP. Pri obravnavi točke na DMP algoritem ugotovi, da je ustrezni piksel, ki ga hočemo pripisati točki B, že pripisan točki A. Za razrešitev, kateri od točk na DMP bo piksel dodeljen, izračunamo in primerjamo razdalje od PC do A in B ( $d_A$  in  $d_B$ ). Ker je razdalja med PC in B krajša, se piksel pripiše točki B, ki bo označena kot vidna. Točka A se označi kot zakrita in se v matriko Z-bafer namesto  $X_A, Y_A$  in  $d_A$  vpiše  $X_B, Y_B$  in  $d_B$ .



Slika 26: Postopek po metodi Z-bafer (Habib et al., 2007: 27)

Metoda je omejena, ker je natančnost odvisna od ločljivosti vhodnega posnetka. Druga pomanjkljivost metode Z-bafer je napačna vidnost (angl. false visibility), povezana z ozkimi vertikalnimi strukturami oz. z območji blizu hitrih skokov v višini (npr. stene zgradb). Ta problem je znan kot M-delež (angl. M-portion) in ga rešimo z dodajanjem psevdo točk vzdolž vertikalnih sten (slika 27).



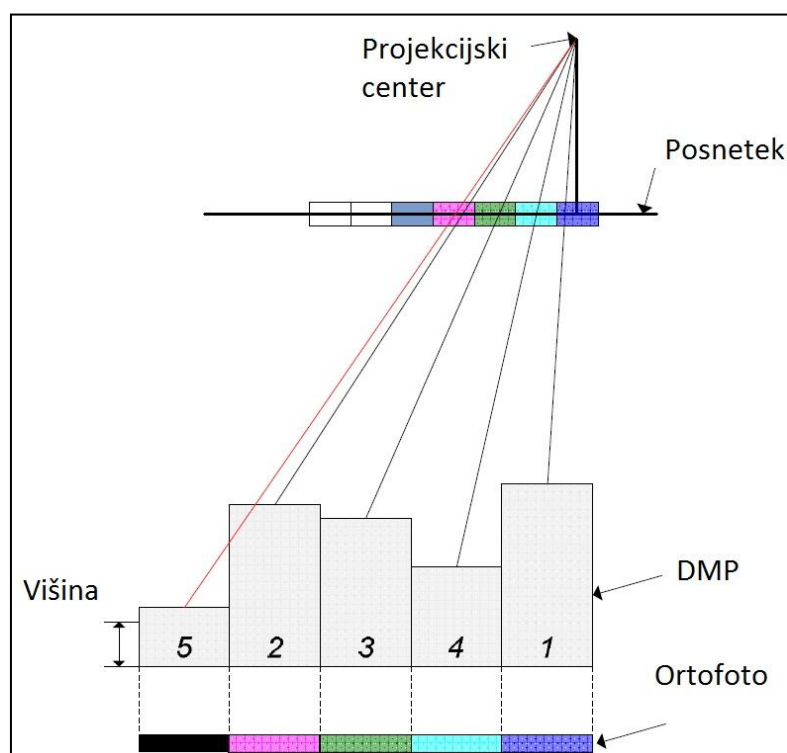
Slika 27: Problem M-deleža, ki vodi do napačne vidnosti (levo), ki jo minimiziramo z uvedbo psevdo točk (desno) (Habib et al., 2007: 29)

Ker je navadna metoda Z-bafer spominsko in računsko zelo zahtevna, jo lahko poenostavimo. V primeru aero- in satelitskih posnetkov, kjer so višji objekti bližje projekcijskemu centru, lahko namesto razdalje neposredno uporabimo višine točk na DMP. Ta modificirana različica metode Z-bafer se imenuje višinski bafer.

### 5.2.2 Metoda sortiranega DMP

Druga metoda iskanja zakritih območij, ki poteka hkrati s posredno metodo ortorektifikacije, je uporaba sortiranega digitalnega modela površja. Za to metodo je pomembno, da je model razvrščen glede na višinske vrednosti. Rezultat je enak kot pri uporabi metode Z-bafer (Bang et al., 2007). Piksli ortofota so zapolnjeni v vrstnem redu glede na pripadajočo višino in vsak piksel je v vhodnem posnetku samo enkrat dostopen. Ker je samo vidnim točkam na DMP dodeljena vrednost piksla, je za to metodo potrebno manj spomina kot za navadno metodo Z-bafer.

Na sliki 28 je predstavljenih pet celic DMP, ki so razvrščene glede na višino. Po istem vrstnem redu poteka posredna ortorektifikacija celic. Točka 5 pridobi isto vrednost piksla kot točka 2 in točka 5 je zaradi tega označena kot zakrita. Piksle, ki so že dodeljeni, lahko zapišemo v matriko iste velikosti kot je izvorni posnetek, ki šteje točke na DMP, katerim je že dodeljena vrednost piksla.



Slika 28: Metoda sortiranega digitalnega modela površja (Bang et al., 2007: 5)

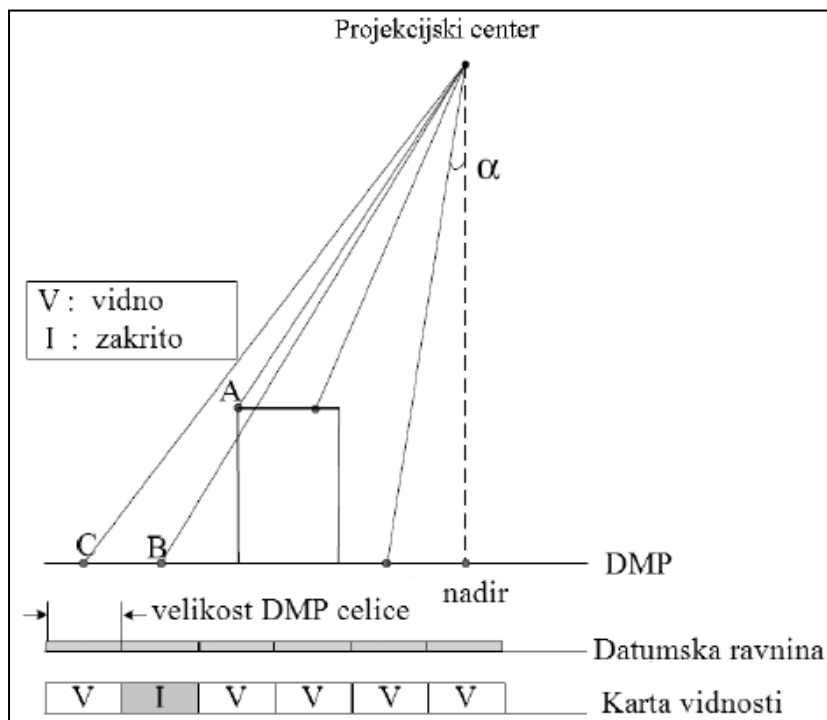
Metoda je, razen postopka razvrščanja višin DMP, zelo hitra in učinkovita. Njena pomanjkljivost je enaka kot pri metodi Z-bafer, in sicer M-delež, zato so za odpravo tega problema potrebne psevdo točke.

### 5.2.3 Metoda primerjave kotov in metoda primerjave višin

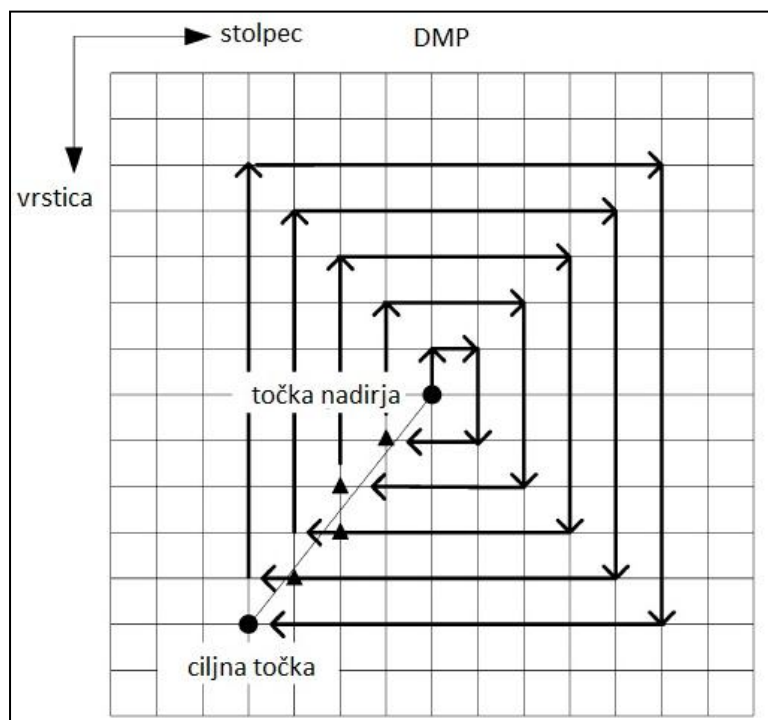
Metoda, ki jo predlagajo Habib et al. (2007), temelji na merjenju kota (angl. angle based method) med smerjo proti nadirni točki in žarkom, ki povezuje projekcijski center s točko na DMP (slika 29).-Izvajata se lahko na dva načina, odvisno od oblike poti iskanja, in sicer kot:

- prilagodljivo radialno iskanje (angl. adaptive radial sweep) in
- spiralno iskanje (angl. spiral sweep).

Prvi način dela po principu merjenja kota  $\alpha$ , ko se z žarkom radialno oddaljujemo od točke nadirja. Če se kot  $\alpha$  stalno povečuje vemo, da na poti nismo prešli nobenega zakritega območja. Zakrito območje lahko pričakujemo če se kot  $\alpha$  ob radialnem premikanju naenkrat zmanjša. Razlika drugega načina je v obliki iskalne poti, ki se začne iz točke nadirja in se spiralno premika do ciljne točke (slika 30). Kot  $\alpha$  primerjamo s kotom zadnje vidne točke vzdolž radialne smeri do točke nadirja. Če je kot  $\alpha$  obravnavane točke večji od kota  $\alpha$  zadnje vidne točke vzdolž iste radialne smeri, potem se ta točka šteje kot vidna.



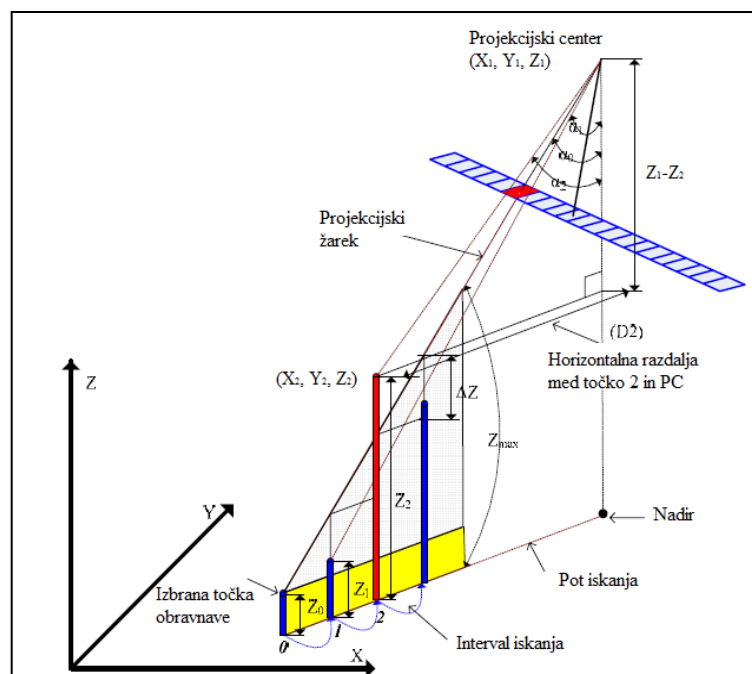
Slika 29: Iskanje zakritih območij po metodi kotov (Bang et al., 2007: 4)



Slika 30: Spiralno iskanje zakritih območij (Habib et al., 2007: 32)

Pri metodi primerjave višin (angl. height based method) je za vsak piksel projekcijski žarek na ortoposnetek predstavljen kot pot iskanja (od točke nadirja do piksla na ortofoto ravnini). Princip metode temelji na primerjavi višine žarka z višino nekaj točk vzdolž iskalne poti v določenih intervalih. Če je najdena vsaj ena točka, ki ima večjo višino od višine žarka, potem je obravnavana

točka zakrita (slika 31). Višina žarka se določi z uporabo višine projekcijskega centra  $Z_0$  in višinske razlike  $\Delta Z$ , pridobljene na osnovi odklona projekcijskega žarka in danega intervala med točkami vzdolž poti iskanja.

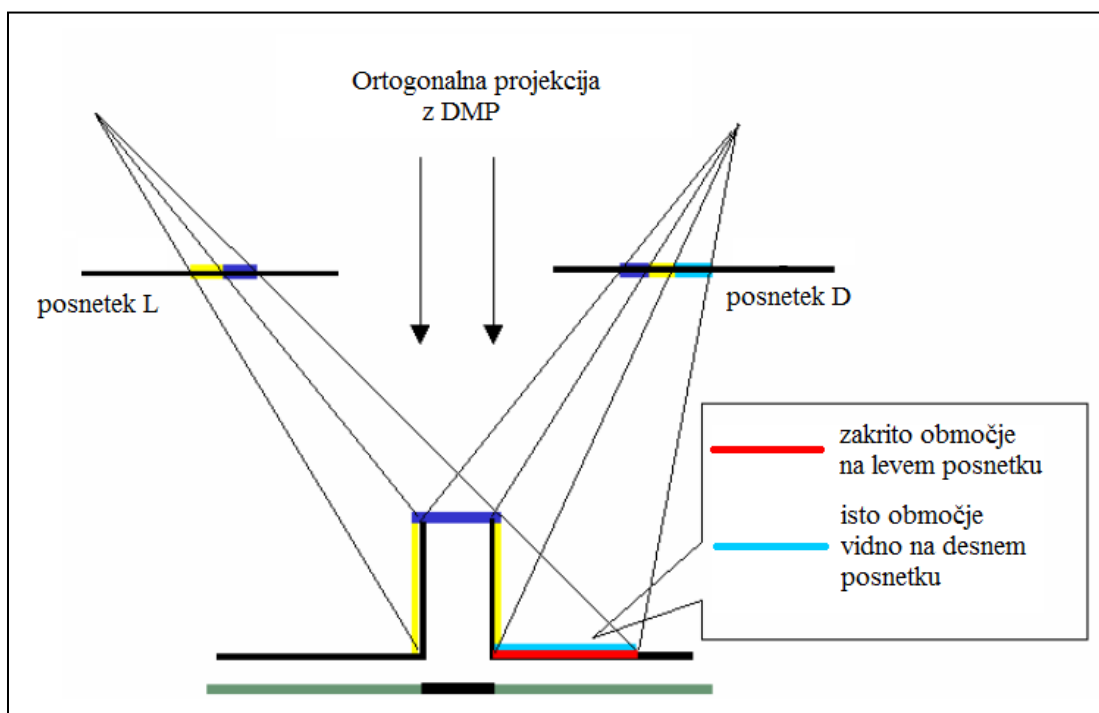


Slika 31: Princip metode primerjave višin (Bang et al., 2007: 7)

Za razliko od metode Z-bafer, metoda primerjave višin in metoda primerjave kotov nista odvisni od ločljivosti vhodnega posnetka. Za iskanje zakritih območij sta uporabljena edino projekcijski center in točka na terenu. Zaradi tega podaja ta metoda, čeprav je računsko zelo zahtevna, zakrita območja z jasno določenimi mejami ter napačnimi vidnimi točkami.

#### 5.2.4 Izpolnjevanje zakritih območij

S kombinacijo slikovnih informacij iz več različnih vhodnih posnetkov lahko izpolnimo oz. nadomestimo (angl. recover) zakrita območja (slika 32). Združitev različnih posnetkov mora biti izdelana pazljivo, saj se morajo upoštevati vse podobe z njihovimi različnimi radiometričnimi vrednostmi in avtomatsko izbrane stične linije ne smejo biti vidne. Da bi bile podobe v radiometričnem smislu usklajene (npr. ni prevelikih razlik v svetlosti podob), izvajamo postopek barvnega ujemanja, po katerem sledi postopek mozaičenja, kjer se podobe združujejo. Z namenom, da avtomatsko poiskane stične linije ne bi bile vidne, se na koncu izvaja še postopek zabrisa stičnih linij. Ti trije postopki so opisani v nadaljevanju.



Slika 32: Izpolnjevanje zakritega območja (Braun, 2003: 207)

### 5.3 Radiometrično ali barvno ujemanje

Zakrita območja se izpolnijo z ustrežno vsebino iz sosednjih ortorektificiranih podob, med katerimi obstaja prekrivanje. Podobe se na območju prekrivanja lahko razlikujejo v radiometričnih vrednostih, npr. zaradi različne vidnosti senc (slika 33). To pomeni, da se morajo podobe, ki jih kombiniramo, dobro radiometrično ujemanje, drugače bi pridobili vizualno nehomogen mozaik popolnega ortofota. Radiometrično ali barvno ujemanje torej predstavlja niz prilagoditev, ki kompenzirajo vizualne učinke, kot so vinjetiranje<sup>2</sup> objektiva, posledično temu svetlobna žarišča (angl. hot spots) in druga neskladja med sosednjimi slikami za mozaičenje. Svetlobno žariščni učinek in učinek vinjetiranja sta rezultat:

- snemalnega kota,
- dnevnega časa snemanja,
- položaja sonca v času snemanja,
- neprimernih filtrov fotoaparata glede na okoliške vplive.

Drugi učinki neskladja med posnetki so posledica:

- različnih smeri leta med dvema zaporednima nizoma,

<sup>2</sup> Vinjetiranje (franc. vignette) v fotografiji predstavlja redukcijo osvetlitve podobe. Beseda se uporablja za fotografski portret, ki je oster v centru, na robovih pa zbledi (Wikipedia, 2011).

- različnega dnevnega časa snemanja,
- različnega obdobja v tednu, mesecu ali letu za snemanje istega območja,
- različnih atmosferskih pogojev med večkratnim snemanjem istega območja.



Slika 33: Vhodni posnetek (levo) in radiometrično popravljen posnetek (desno) (Gisbox)

Pomemben dejavnik postopka radiometričnega ujemanja je kakovost vhodnega posnetka. Slikovna presvetljenost ali temne sence, barvno razlivanje in mavrični učinek so škodljivi za končno radiometrično točnost popolnega ortofota. Pred radiometričnim usklajevanjem je treba vsakemu posnetku določiti radiometrične lastnosti. Za opis barve v posameznem pikslu je najbolj uporabljen opis v RGB prostoru, kjer se vsaka barva lahko predstavi kot kombinacija rdeče, zelene in modre barve. Radiometrične lastnosti posnetka opišemo s histogrami posameznih barvnih komponent. Ta postopek barvnega ujemanja imenujemo ujemanje histogramov posnetkov.

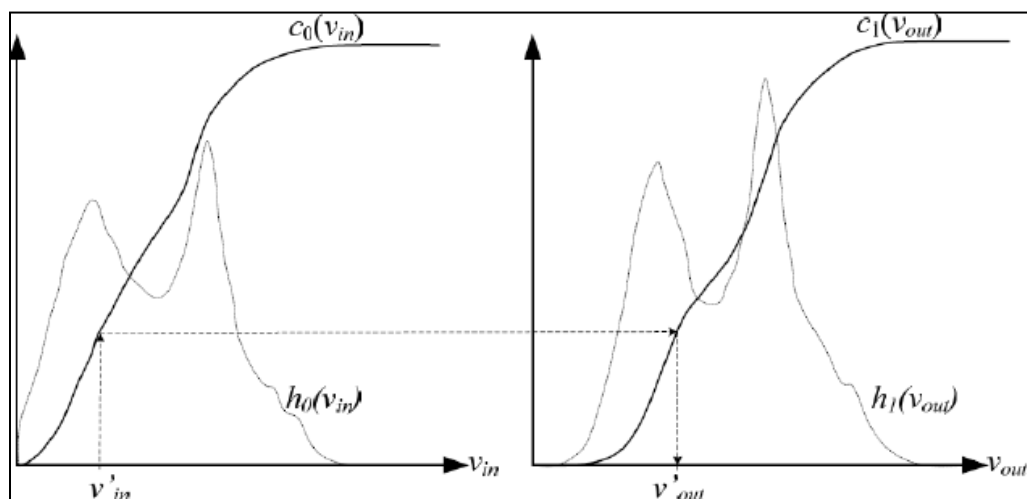
Metoda ujemanja histogramov poskuša transformirati vhodni histogram ( $h_0(v_{in})$ ) tako, da ga usklajuje z referenčnim histogramom ( $h_1(v_{out})$ ), kjer je  $v$  dana vrednost v histogramu (slika 34). Povezavo med tema dvema histogramoma opišemo kot (Nielsen, 2004):

$$c_1(v_{out}) = c_0(v_{in}), \quad (8)$$

pri čemer je  $c$  kumulativni histogram. Iz zgornje enačbe lahko izvedemo enačbo za ujemanje histogramov (Niblack, 1985, cit. po Nielsen, 2004):

$$v_{out} = c_1^{-1} \cdot (c_0(v_{in})). \quad (9)$$





Slika 34: Princip metode ujemanja histogramov (Nielsen, 2004: 62)

## 5.4 Mozaičenje

Tehnično najzahtevnejši del postopka izdelave popolnega ortofota je mozaičenje oziroma združevanje več posnetkov za sestavo ortofoto karte večjega formata in brez zakritih območij. Kot je bilo zapisano v podpoglavju 5.2.4, po procesu iskanja zakritih območij, ki poteka hkratio s postopkom posredne ortorektifikacije, moramo najdena zakrita območja izpolniti s pomočjo mozaičenja, radiometrično popravljenih in ortorektificiranih podob. Sosednje slike so po navadi združene vzdolž stičnih linij, ki jih poiščemo avtomatsko ali ročno.

### 5.4.1 Iskanje najprimernejših pikslov

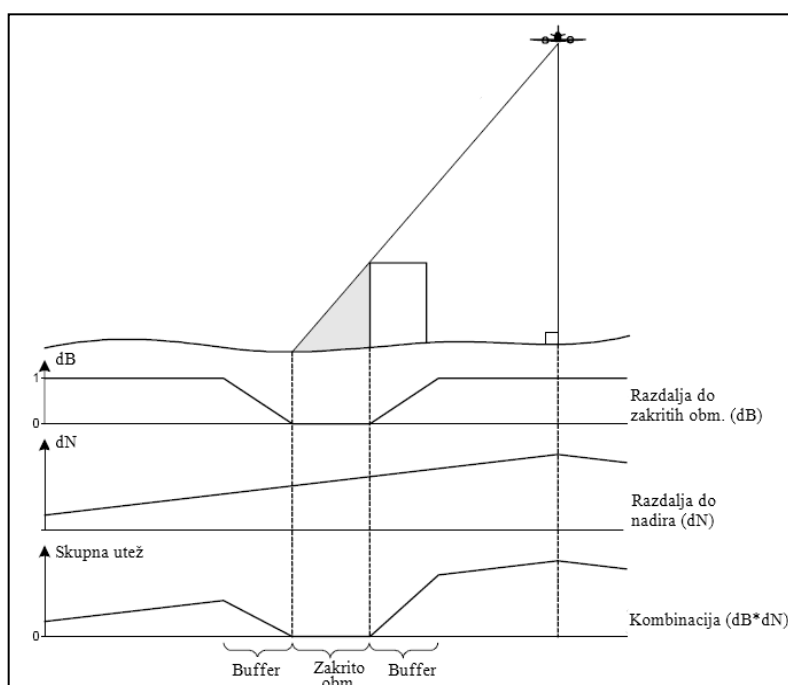
Problem mozaičenja ni samo združevanje posnetkov, ampak tudi izbira najprimernejših pikslov za iskanje stičnih linij. Zaradi prekrivanja, ki obstaja med posnetki, se isti piksel lahko nahaja na več vhodnih ortopodobah. Za izbiro najprimernejših pikslov uporabimo različna merila, na osnovi katerih vsakemu pikslu na vhodnih ortopodobah izračunamo uteži. Piksel z največjo utežjo je najprimernejši. Schickler in Thorpe (1998) za računanje uteži priporočata kombinacijo naslednjih meril:

- bližina nadirja,
- relativna orientacija površine terena do vsake slikovne ravnine,
- oddaljenost od zakritega območja.

Nielsen (2004) pa opisuje določevanje najprimernejšega piksla kot kombinacijo samo prvega in tretjega merila. Drugo merilo, pri katerem se utež določa na osnovi kota med smerjo gledanja in normalnega vektorja TIN-plohe, izpusti.

Mozaičenje po prvi metodi je najenostavnejše. Piksli, ki so na svojem posnetku bliže nadirni točki, imajo večjo utež. Če je piksel blizu nadirja, so premiki reliefa manjši in možnost za pojav zakritega območja je manjša. V primeru, da je piksel zakrit, se izbira drugi najbližji nadirni točki. Metoda je hitra in enostavna, ampak ima pomanjkljivost, da je zelo odvisna od natančnosti DMP.

Mozaičenje z uporabo merila oddaljenosti do zakritega območja je v primeru nenatančnega DMP bolj uporabno od prejšnje metode. Čim bližje je piksel zakritemu območju, tem manjšo utež pridobi. Posledica tega je, da bodo stične linije potekale med zakritim območjem. Mozaiki, nastali po tej metodi, so bolj razdrobljeni kot pri prvi metodi. Slabost metode je tudi občasen potek stičnih linij čez premikajoče se objekte, ki jih odreže.



Slika 35: Princip kombinirane utežne funkcije (Nielsen, 2004: 74)

Zato je za izbiro najprimernejših pikslov najbolj uporabna kombinacija opisanih metod. Implementacijo obeh metod pridobimo z nujnim množenjem utežnih funkcij obeh metod (slika 35). Rezultat merila bližine nadirja je utežna funkcija, ki se ji vrednost linearno povečuje proti nadirni točki. Za drugo metodo okoli zakritih območij tvorimo vmesna območja (angl. buffer zones), znotraj katerih utežna funkcija s približevanjem proti zakritemu območju pada. Za vmesna območja je zelo pomembno, da niso prevelika ali pa premajhna. V prvem primeru, če je območje preveliko, lahko prekrije celotni mozaik in je utežna funkcija nadirne bližine nepomembna. Vmesno območje mora biti dovolj široko, da lahko določa dobro razdaljo do zakritih območij in omogoča dodaten zbris stičnih linij. S testiranjem je pokazano, da območje, široko 5 m, izpolnjuje zahtevane pogoje (Nielsen, 2004).

Ker metoda izkorišča prednosti prej naštetih meril, je najmanj občutljiva na nenatančnosti digitalnega modela površja in je mozaik, ki nastane, najmanj razdrobljen.

#### 5.4.2 Iskanje optimalnih stičnih linij

Rezultat iskanja najprimernejših pikslov so začetne stične linije. Te temeljijo na geometrijskih lastnostih posnetka in površini terena in niso odvisne od radiometričnih vrednosti podobe. Lahko jih uporabimo za združitev nastalih ortopodob v en skupni ortofoto ali pa jih uporabimo kot izhodišče za postopek optimizacije stičnih linij za pridobitev novih in boljših stičnih linij (slika 36), ki upoštevajo tudi radiometrične lastnosti ortopodob za mozaičenje.



Slika 36: Optimalna stična linija (INPHO GmbH)

Postopek optimizacije temelji na algoritmu, ki na osnovi grafa utežne funkcije išče optimalne stične linije vzdolž poti, kjer so posnetki najbolj podobni. Območje iskanja je omejeno z določeno oddaljenostjo od začetne stične linije.

#### 5.4.3 Zabris stičnih linij

Za zabris stičnih linij mozaika, ki so še vedno vidne na popolnem ortofotu, uporabimo filter povprečenja oziroma matriko velikosti  $n \times n$  (slika 37). Filter se premika po stičnih linijah in s povprečenjem pikslov izvaja glajenje podobe na obravnavanem območju. Filter odstrani piksele, ki ne pripadejo temu območju, na osnovi barvne vrednosti sosednjih pikslov. Za zabris lahko matriko filtra povečujemo ali pa jo večkrat uporabimo na istem območju.

			$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$
$1/9$	$1/9$	$1/9$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$
$1/9$	$1/9$	$1/9$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$
$1/9$	$1/9$	$1/9$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$
			$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$

Slika 37: Filter velikosti 3 x 3 (levo) in filter velikosti 5 x 5 (desno) (Nielsen, 2004: 76)

## 6 ZAGOTAVLJANJE KAKOVOSTI

Dejansko oceno kakovosti izdelamo po dokončani izdelavi popolnega ortofota s primerjavo med terensko izmero ali drugim kakovostnim virom in podatki na ortofotu. Glede na obsežnost izdelka je razumljivo, da popolna kontrola ni mogoča in jo zato nadomestimo z vzorčno kontrolo (Petrovič, 2006). Metode zagotavljanja kakovosti, opisane v tem poglavju, temeljijo na modelu kakovosti, ki je definiran v standardu ISO 19114 (ISO/TC 211, 2001b).

Mednarodna organizacija za standardizacijo (ISO) opredeljuje kakovost kot zbirko značilnosti in lastnosti izdelka ali usluge, ki podpirajo njeno sposobnost, da pri uporabniku zadovolji izražene ali pričakovane potrebe. Kakovost podatkov opredeljujejo elementi kakovosti, ki sestavljajo kakovostni model. Poleg opredelitve kakovostnega modela je pomembna še izbira metodologije za določitev kakovosti geografskih podatkov. Pri izbiri so pomembne tri faze (Šumrada, 2005):

- razvoj in opredelitev ustreznega standardnega niza kriterijev oziroma pokazateljev za opredelitev kakovosti geografskih podatkov (standardni kakovostni model),
- razvoj in opredelitev ustreznih metod za testiranje in opredelitev geografskih podatkov in povezav med njimi (metodologija) ter
- opredelitev primernih metod za predstavitev in upodobitev kakovosti geografskih podatkov (standardno poročilo) ter grafična ponazoritev elementov kakovosti.

### 6.1 Zahteve za zagotavljanje kakovosti

Po smernicah Evropske komisije (EC) za preverjanje kakovosti ortoposnetkov (JRC et al., 2008) predstavlja zagotavljanje kakovosti (angl. quality assurance) niz zavestno uporabljenih pristopov, ki skupaj vodijo do zadovoljivih rezultatov določenega procesa. Zagotavljanje kakovosti, ki temelji na teh smernicah, se ukvarja z dokumentiranimi postopki, obrazci in preverjanjem v točno določenih točkah. Kontrola kakovosti (angl. quality control) in nadzor kakovosti (angl. quality audits) predstavljata dva pomembna elementa zagotavljanja kakovosti. Prvi element kvantitativnih lastnosti izdelka je jasno definiran postopek, s katerim preverimo vse izdelke ali le izbrani vzorec. Preverjanje vključuje poročilo, nadzor ali kvantitativne meritve, ki imajo jasno definirane pogoje za sprejem oz. zavrnitev kriterijev, ki jih postavljajo smernice. Drugi element, nadzor kakovosti, predstavlja kvalitativni pregled, ki pokriva področje obravnave kot celoto. Gre za primerjavo dejanske prakse s primerno zagotovljeno kakovostjo, ki jo zagotavljajo smernice. Informacije, uporabljene v nadzoru kakovosti, so zagotovljene s poročanjem o kontroli kakovosti, ki jo izvajajo zaposleni med delom samim.

## 6.2 Kakovostni model

Kakovostni model vsebuje opredelitive kriterije, po katerih ocenjujemo kakovost določenega izdelka (Petrovič, 2006). Vsebuje kakovostne elemente in podelemente, ki opisujejo določen vidik podatkov za kontrolo. Podelementi podrobneje opredeljujejo uporabnost elementov kakovosti in uporabnost obeh mora biti ugotovljena tako, da lahko oceni, kako dobro niz podatkov izpolnjuje zahteve, določene v specifikacijah proizvoda. Elementi kakovosti v modelu se delijo na tri kvalitativne elemente kakovosti, ki so (Petrovič, 2006):

- namen,
- uporaba in
- poreklo;

ter na pet osnovnih (kvantitativnih) elementov kakovosti:

- položajna točnost,
- tematska ali pomenska točnost,
- časovna točnost,
- celovitost in
- logična skladnost.

V diplomski nalogi je ocena ortofota izdelana le za en element kakovosti, to je položajno točnost. Le-to določimo s primerjavo in analizo točnosti položaja elementov na podobi in elementov na terenu, ki so opazovani z višjo natančnostjo. Element, ki podaja zanesljivost klasifikacije ter točnost količinskih in pravilnost pomenskih atributov je tematska ali pomenska točnost. Opredeljena je kot razlika med opisnimi podatki nekega objekta v podatkovni bazi in opisnimi podatki istega objekta na terenu. Časovna točnost se uporablja za podajanje točnosti časovnih atributov in časovnih odnosov med objekti. Logična skladnost ali konsistentnost podaja stopnjo upoštevanja logičnih pravil strukture podatkov, atributov in odnosov. Celovitost ali popolnost je element, ki podaja prisotnost ali odsotnost objektov, atributov ali relacij v podatkovnem nizu.

## 6.3 Položajna točnost

Kot je omenjeno v predhodnem podpoglavju, smo v diplomski nalogi položajno točnost uporabili kot element za oceno kakovosti izdelanega popolnega ortofota. Točnost položaja vsebuje tri podelemente, ki so:

- absolutna ali zunanja točnost, na osnovi katere ugotavljamo ujemanje izmerjenih vrednosti koordinat z vrednostmi, ki so prave ali se štejejo kot prave vrednosti;

- relativna ali notranja točnost, ki določa ujemanje relativnega položaja objekta iz podatkovnega niza z ustreznim relativnim položajem, ki je pravi ali se šteje kot pravi položaj;
- položajna točnost rastrskih podatkov, ki ugotavlja ujemanje vrednosti položaja podatkov, ki so podani v rastrski obliki z vrednostmi, ki so prave ali se štejejo kot prave vrednosti.

Običajna mera za vrednotenje položajne točnosti je RMSE (angl. root mean square error). To je kratica za koren srednjega kvadratnega odklona. Metoda zunanega preverjanje poteka tako, da operater identificira in izmeri položaj kontrolnih točk na podobi in jih skupaj s pravimi (terensko določenimi) koordinatami vnese v tabelo. Razlika koordinat ( $d$ ) za posamezno koordinatno os ( $x$  ali  $y$ ) se izračuna za vsako kontrolno točko. RMSE po osi  $x$  oziroma po osi  $y$  za celoten niz podatkov izračunamo po enačbi 10:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_1^n d_n^2}, \quad (10)$$

pri čemer je:

$d_n$  ... odstopanje koordinat po osi  $x$  oziroma  $y$ .

Izračunane vrednosti nato primerjamo z dovoljenimi odstopanji izdelka in izdelek na tej osnovi sprejmemo oz. zavrnemo. Zavrnemo ga v primeru, če so izračunane vrednosti RMSE večje kot v projektu dovoljene vrednosti RMSE; običajno je to opredeljeno v razpisu ali pogodbi. Maksimalno dovoljeno odstopanje je običajno definirano kot trikratnik izračunanega RMSE. Točka, ki presega maksimalno dovoljeno odstopanje, se lahko smatra kot grobo pogrešena in odločitev za eliminacijo takšne točke mora biti dokumentirana (Kosmatin Fras, 2006).

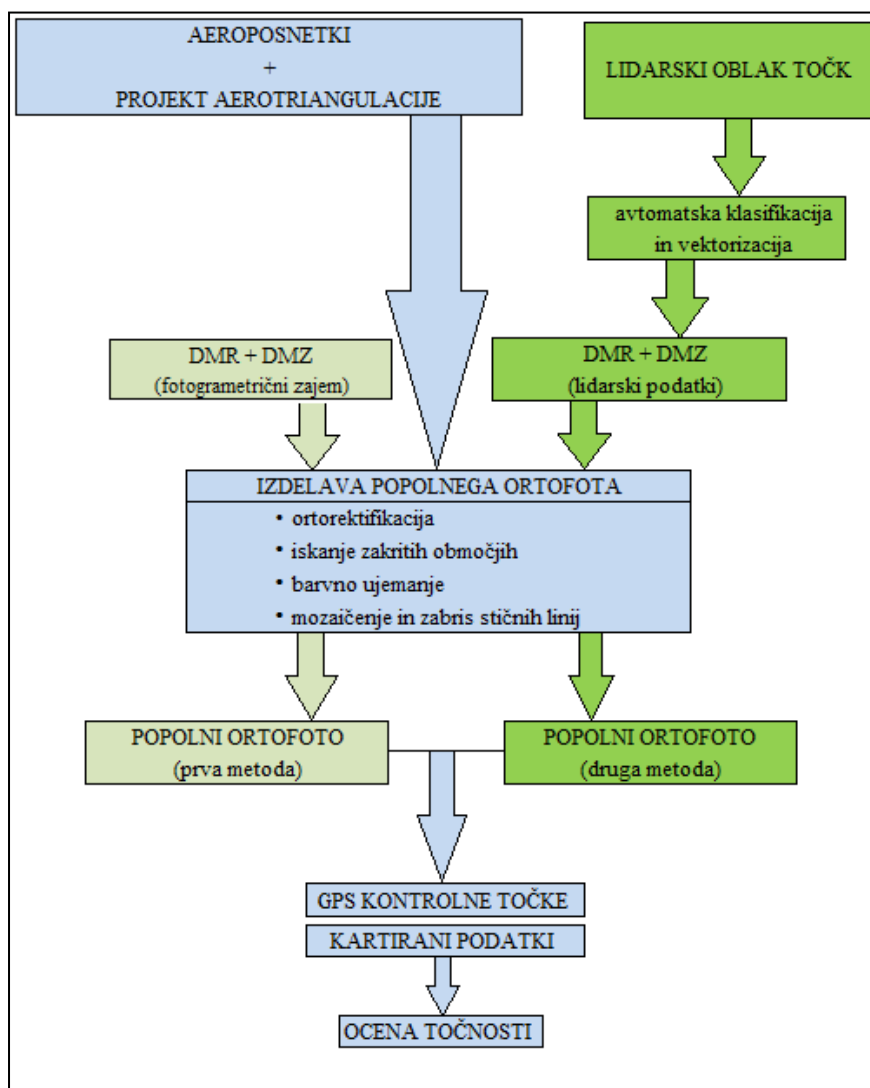
## 7 PRAKTIČNI PRIMER IZDELAVE POPOLNEGA ORTOFOTA

Praktični del diplomske naloge je sestavljen iz izdelave popolnega ortofota na dva različna načina ter ocene kakovosti obeh končnih izdelkov in njune primerjave.

Izdelava v obeh primera poteka po splošnih korakih, razlika pa je pri vhodnih podatkih ter digitalnem modelu reliefa in digitalnem modelu zgradb, ki se združena v digitalni model površja uporabljata v postopku ortorektifikacije. Praktični del sem začel z izdelavo popolnega ortofota, ki temelji na uporabi omenjenih modelov, pridobljenih s fotogrametričnim zajemom. Ker sem od Geofota pridobil oba že narejena digitalna modela, mi ni bilo treba izvesti zajema podatkov, ki je časovno zelo zahteven postopek, in sem lahko nadaljeval z izdelavo popolnega ortofota. Izdelava je potekala v programskem orodju podjetja INPHO GmbH po korakih, opisanih v poglavju 5. Končni izdelek sem shranil in nadaljeval z izdelavo popolnega ortofota po drugi metodi. Ta metoda temelji na uporabi enakih digitalnih modelov, vendar pridobljenih iz avtomatsko klasificiranih lidarskih točk. Oba digitalna modela (DMR in DMZ) je bilo treba najprej izdelati, ker sem v tem primeru od Geofota pridobil le neklasificiran oblak točk. Po opravljeni avtomatski klasifikaciji in vektorizaciji točk sem izdelal digitalni model reliefa in digitalni model zgradb, ki sem ju, kot v prvem primeru, združil v digitalni model površja. Postopek izdelave končnega popolnega ortofota je enak kot pri prvi metodi.

Izdelavi obeh primerov popolnega ortofota je sledila ocena točnosti na osnovi elementa kakovosti, položajne točnosti, za katero sem s pomočjo GPS-a opazoval kontrolne točke na terenu ter jih primerjal z istimi točkami na ortofotu. Kot dodatno oceno sem primerjal oba izdelka z vektorskimi podatki, ki so rezultat fotogrametričnega zajema istega območja za namen prve metode. Ocena točnosti in primerjava končnih izdelkov sta opisana v poglavju 8 te diplomske naloge. Cel postopek je predstavljen v shemi na sliki 38, kjer modra barva predstavlja skupne podatke in korake za obe metodi, svetlo zelena predstavlja podatke in korake za prvo metodo, zelena pa opisuje drugo metodo izdelave popolnega ortofota.





Slika 38: Shema poteka praktičnega dela

## 7.1 Vhodni podatki in njihova točnost

Vhodne podatke za izdelavo popolnega ortofota za območje Zagreba sem pridobil od podjetja Geofoto, ki ima sedež v Zagrebu. Osnovni vhodni podatek, ki je uporabljen v obeh primerih, so aeroposnetki za obravnavano območje. Ti posnetki so zajeti z digitalno kamero VEXCEL UltraCam X, ki istočasno zajema pankromatski, rdeči, zeleni, modri in bližnji infrardeči kanal. Razmerje ločljivosti 1 : 3 med pankromatskim senzorjem in tistim v barvi omogoča izdelavo t. i. pan-izostrenih (angl. pan-sharpened) izdelkov visoke ločljivosti, ki so zelo uporabni za fotogrametrično in daljinsko zaznavanje. Posnetki so zajeti z višine 1300 m z ločljivostjo 8 cm dolžine talnega intervala DTI (angl. GSD – ground sample distance) in vzdolžnim/prečnim preklpom od 80/60%.

Drugi pomemben vhodni podatek, ki je uporabljen v obeh primerih, je rezultat projekta aerotriangulacije, za katero je uporabljen RMS od 0,1 m za XYZ. Izdelava popolnega ortofota temelji na uporabi digitalnega modela površja, ki predstavlja združitev digitalnega modela reliefa in digitalnega modela zgradb. Za prvo metodo sem uporabil pridobljeni DMR in DMZ kot rezultat fotogrametričnega zajema, ki je imel točnost okrog 0,2 m. Za drugo metodo sem potreboval DMR in DMZ, ki sta pridobljena iz lidarskih podatkov, tj. lasersko zajetega oblaka točk. Oblak točk gostote 5 točk/m<sup>2</sup>, ki je bil zajet s sistemom za skeniranje IGI LiteMapper 6800-400 in sem ga pridobil od Geofota, ima enako ocenjeno točnost 0,2 m.

Vse našteje točnosti so v skladu s specifikacijam izdelka, ki jih določa Državna Geodetska Uprava na Hrvaškem. Te specifikacije so določene na podlagi ISO standardov.

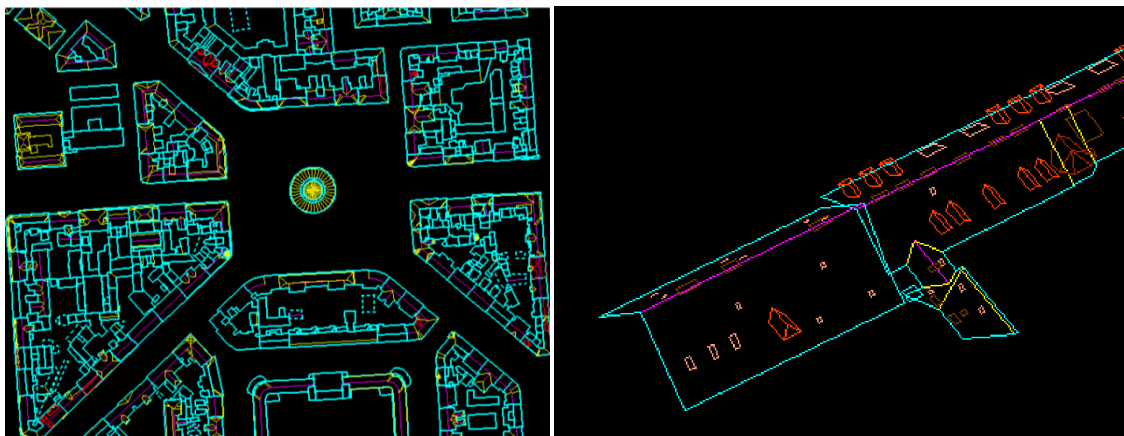
## 7.2 Izdelava popolnega ortofota na osnovi fotogrametričnega zajema

Izdelavo popolnega ortofota sem začel z izbiro območja obravnave. Območje se nahaja v centru Zagreba in ima površino 0,41 km<sup>2</sup> (slika 39). Zaradi boljše predstavitve prednosti popolnega ortofota pred klasičnim ortofotom je območje obravnave bolj urbane narave z veliko stavbami.



Slika 39: Območje obravnave

Glede na izbrano območje obravnave sem od podjetja Geofoto pridobil ustrezne aeroposnetke in končan projekt aerotriangulacije. Zaradi časovne zahtevnosti fotogrametričnega zajema sem pridobil tudi 3D vektorske podatke objektov (slika 40) in digitalni model reliefa (slika 41), ki sta rezultat fotogrametričnega zajema na digitalni fotogrametrični postaji Intergraph Image Z/I. Projekt aerotriangulacije, aeroposnetki, digitalni model zgradb in digitalni model reliefa predstavljajo vhodne podatke za naslednji korak izdelave popolnega ortofota, to je ortorektifikacijo.



Slika 40: Tlorisni pogled na digitalni model zgradb (levo) in 3D-prikaz detajla modela (desno)

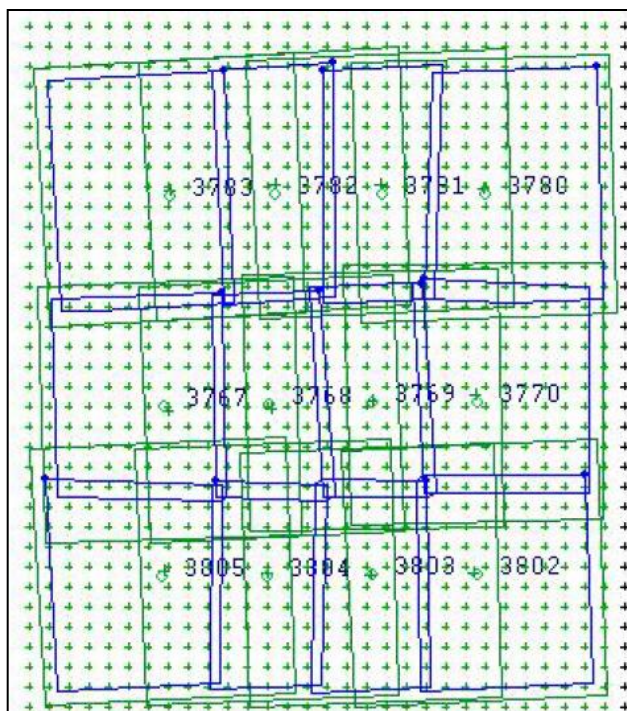


Slika 41: Tlorisni pogled na digitalni model reliefa

### 7.2.1 Izdelava digitalnega modela površja in ortorektifikacija

Preden sem začel izvajati postopek ortorektifikacije, je bilo potrebno pridobljeni projekt aerotriangulacije skupaj z elementi zunanje in notranje orientacije in aeroposnetki prenesti v projekt, ustrezen za aplikacijo OrthoMaster podjetja Inpho. V programu se izvede združitev DMR-ja in 3D-podatkov o objektih v digitalni model površja (DMP), ki se potem uporabi za iskanje zakritih območij za ustrezni premik objektov, ki niso del DMR (stavbe), in za odpravo napak dvojnega kartiranja v postopku ortorektifikacije. Aplikacija OrthoMaster na osnovi definiranih parametrov avtomatsko poišče ortoobmočja na posnetkih (angl. ortho-areas) (slika 42), znotraj katerih izvaja vizualno analizo

tako, da išče zakrite piksele oz. območja. Zakrite piksele označi z ustrežno barvo, ki jo program OrthoVista v koraku mozaičenja zazna. Rezultat so ortorektificirani aerosposnetki, orientirani proti severu, ki so del območja obravnave.



Slika 42: Ortoobmočja (INPHO, 2010: 26)

### 7.2.2 Zapolnitev zakritih območij in mozaičenje

Zakrita območja zapolnimo na osnovi kombinacije slikovnih informacij vhodnih posnetkov, to je z njihovim mozaičenjem. Program OrthoVista zapolni zakrita območja, odkrita v predhodnem koraku, ki so bila označena z ustrežno barvo na omenjeni način (slika 43). Za mozaičenje najprej avtomatsko (ali ročno) poišče optimalne stične linije (slika 44) in vzdolž njih združi ortoposnetke, ki so rezultat obdelave v aplikaciji OrthoMaster, ter jih radiometrično popravi.



Slika 43: Zakrita območja, označena z rdečo barvo (levo), in zapolnjena zakrita območja (desno)



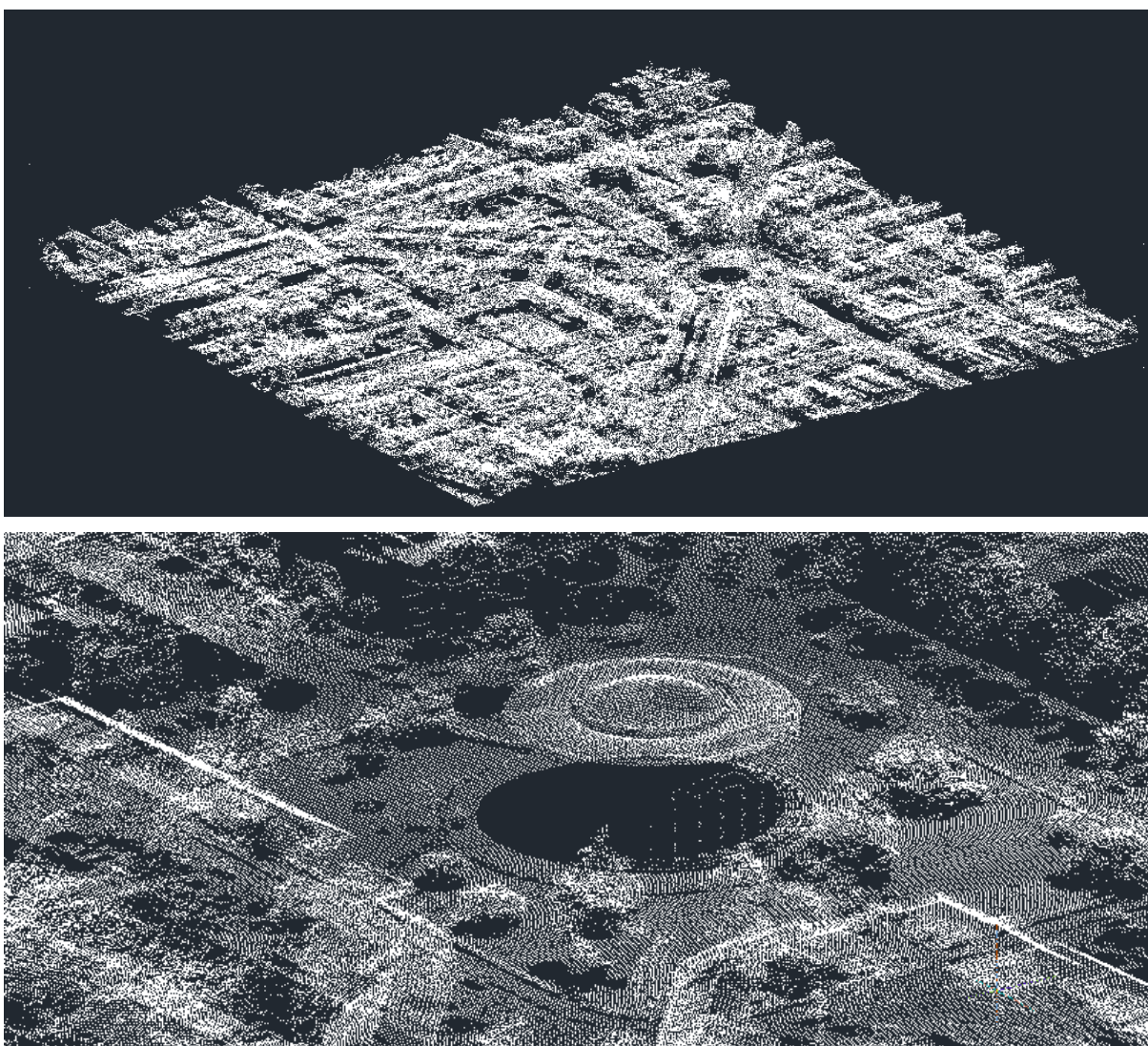
Slika 44: Avtomatsko poiskane stične linije med ortoposnetki

### 7.3 Izdelava popolnega ortofota z uporabo lidarskih podatkov

Postopek izdelave popolnega ortofota z uporabo oblaka točk laserskega skeniranja poteka po istem principu kot v prejšnjem primeru. Razlika je v načinu izdelave digitalnega modela reliefa in digitalnega modela zgradb, ki ju uporabimo za izdelavo DMP pred ortorektifikacijo v programu OrthoMaster. Postopka ortorektifikacije in mozaičenja sta enaka kot pri izdelavi popolnega ortofota na osnovi fotogrametričnega zajema in zaradi tega ne bosta še enkrat opisana.

### 7.3.1 Klasifikacija točk in izdelava digitalnih modelov

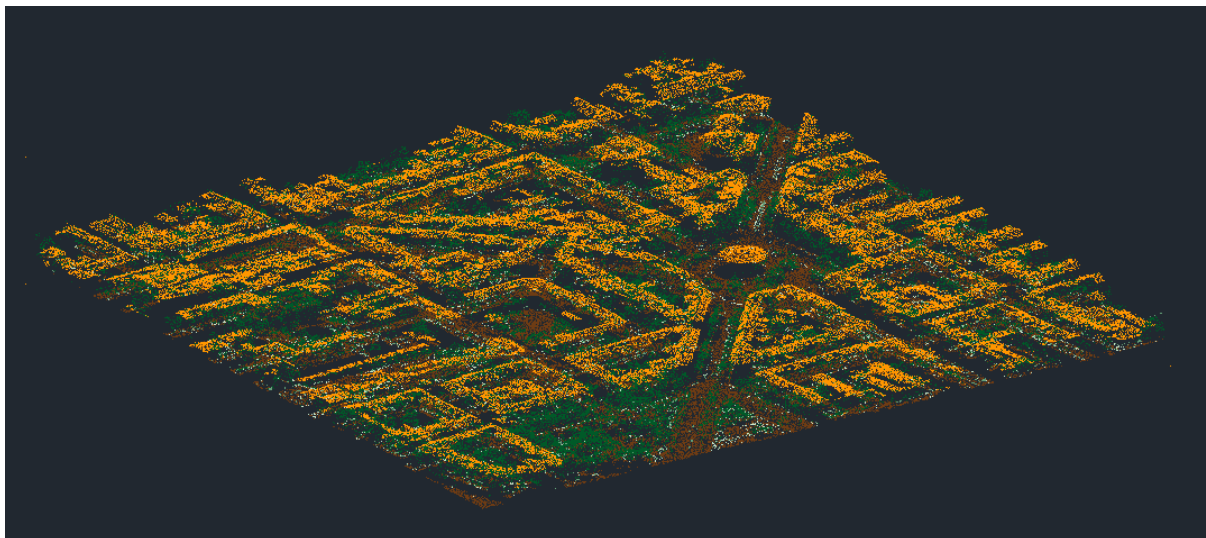
Za razliko od predhodne metode izdelave popolnega ortofota, kjer sem uporabil že gotove in pridobljene digitalne modele reliefa in zgradb, sem za to metodo omenjene digitalne modele izdelal sam. Podatke za izdelavo, tj. oblak točk in trajektorije kot tudi transformacijske parametre in model geoida za obravnavano območje, sem pridobil od podjetja Geofoto. Pridobljeni oblak je bil neobdelan in vse točke (5 točk/m<sup>2</sup>) so predstavljale isti razred (slika 45).



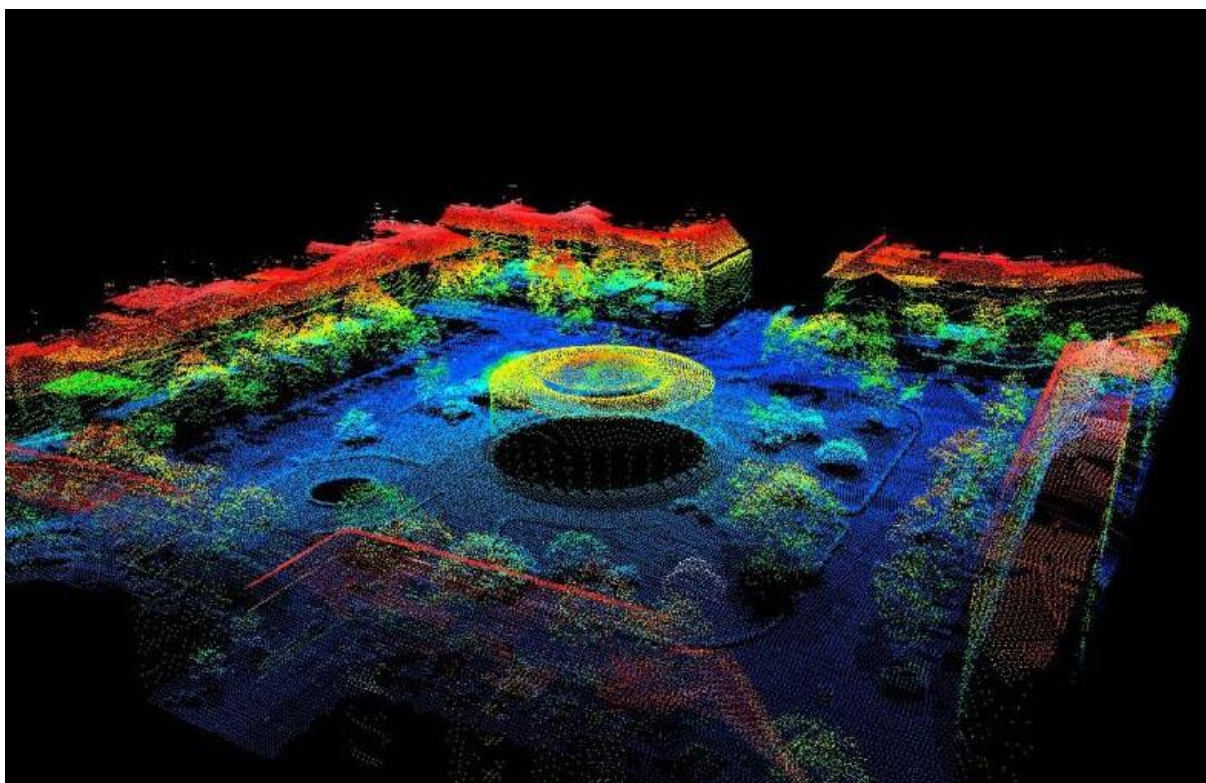
Slika 45: Neklasificiran oblak točk za celotno območje (zgoraj) in en detajl (spodaj)

Za izdelavo DMR in DMZ je bilo treba točke klasificirati v različne razrede, ki smo jih glede na potrebe naloge sami določili. Klasifikacija točk je potekala v programu Terrascan, ki se uporablja kot dodatek za Microstation. Klasifikacija je bila izvedena avtomatsko, in sicer sem za to uporabil različne programske funkcije, ki določajo ustrezne parametre za avtomatsko klasifikacijo. V prvem koraku sem

s programom naredil grobo klasifikacijo, ki točke razvrsti v osnovne razrede točk, kot so teren, vegetacija, stavbe, voda in drugo (slika 46). Na sliki 47 vidimo detajl klasificiranih točk.



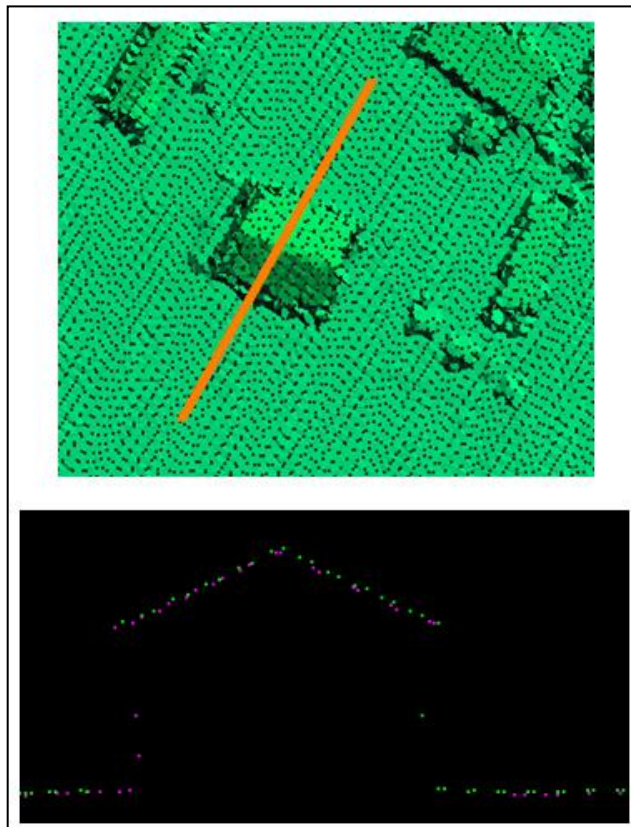
Slika 46: Klasificirane točke celotnega območja obravnave



Slika 47: Detajl klasificiranih točk (Geofoto d.o.o.)

Naslednja klasifikacija je bila natančnejša, ker sem uporabil parametre, ki natančneje definirajo pogoje za klasifikacijo točk v ustrezni razred. Za moje potrebe sta bila najpomembnejša razred terena ter razred stavb in drugih zgrajenih objektov. Točke je bilo možno klasificirati tudi ročno, kar je natančnejše, ampak tudi časovno zahtevnejše. Moral sem pregledati, ali so bile klasificirane točke

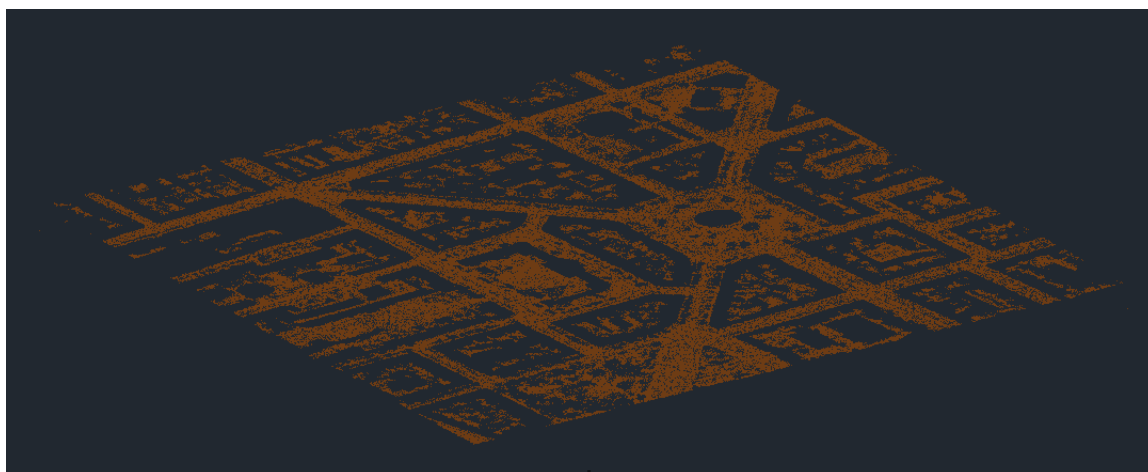
razvrščene v pravi razred. Za pregled sem uporabljal različne poglede po profilih in ploskvah (slika 48), ki nam jasno pokažejo, kjer je prišlo do napačne klasifikacije. Napačno klasificirane točke ročno popravimo.



Slika 48: Profil klasificiranih točk: na spodnjem delu slike vidimo točke, ki ležijo v profilu na označenem zgornjem delu slike (oranžna linija)

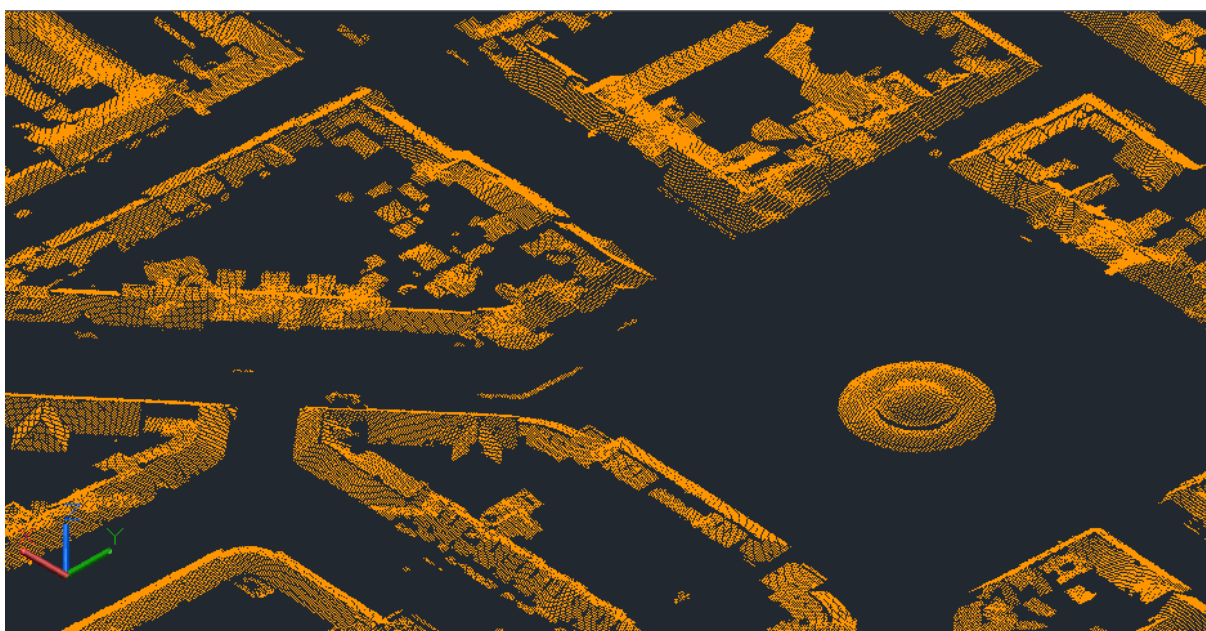
Pregledu je sledila izdelava digitalnega modela reliefa, za kar so bile potrebne le točke, klasificirane v razred terena (slika 49). S pomočjo programa TerraModeler, ki je tako kot TerraScan dodatek za Microstation, sem točke, ki opisujejo teren, izvozil kot t. i. lattice model (mrežni model), ki ima obliko tekstualne datoteke, v kateri so zapisane višine točk terena. To datoteko sem kasneje kot DMR uvozil v OrthoMaster. Velikost celice mrežnega modela je bila 0,2 m, kar je bilo možno zaradi velike gostote oblaka točk zajetih laserskim skeniranjem.





Slika 49: Klasificirane točke terena

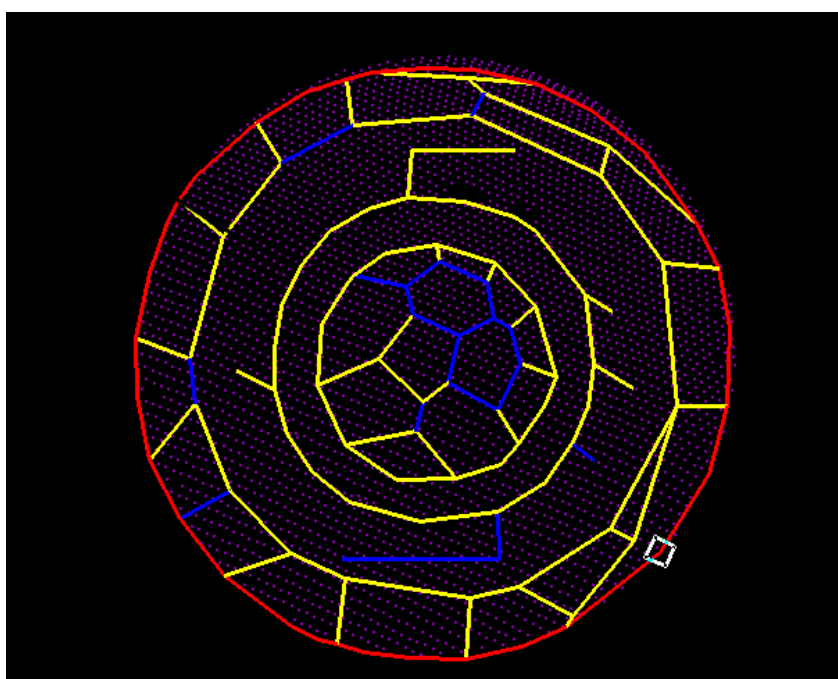
Za izdelavo digitalnega modela zgradb uporabimo točke iz razreda stavb (slika 50). V program vgrajeni algoritem nam omogoča vektorizacijo teh točk in izdelavo digitalnega modela zgradb z nižjo stopnjo prikaza detajla (LOD2) (slika 51 in slika 52). Tudi za vektorizacijo je bilo treba določiti takšne parametre, ki omogočajo najnatančnejšo vektorizacijo. Za določevanje teh parametrov sem moral postopek izvajati večkrat. Rezultat vektorizacije shranimo v datoteko v vektorski obliki, ki je berljiva v programu OrthoMaster, za združitev DMR in DMZ v digitalni model površja. Izdelavi digitalnih modelov je sledila ortorektifikacija in postopek mozaičenja, ki sem ju izvedel na enak način kot pri prvi metodi.



Slika 50: Klasificirane točke stavb



Slika 51: Avtomatsko vektorizirana streha stavbe



Slika 52: Vektorizacija klasificiranih točk stavb z uporabo slabših parametrov

## 7.4 Rezultati ortorektifikacije in mozaičenja

### 7.4.1 Popolni ortofoto, izdelan na osnovi fotogrametričnega zajema

V postopku ortorektifikacije so bili uporabljeni pridobljeni DMR, 3D vektorski podatki streh objektov kot rezultat fotogrametričnega zajema in aeroposnetki območja obravnave. Za vsak aeroposnetek je bila izdelana njegova ortorektificirana podoba, in to brez deformacije, znane kot premik reliefa, na kateri so objekti, ki niso del DMR, na osnovi izdelanega digitalnega modela površja rektificirani v pravilno ortogonalno projekcijo in orientirani proti severu. Ortorektificirane podobe so nato združene v eno podobo oz. popolni ortofoto, na katerem so zapolnjena zakrita območja in izbrisane stične linije,

potrebne za mozaičenje. Slika 53 prikazuje končni popolni ortofoto celotnega območja, ki je izdelan na osnovi fotogrametričnega zajema.



Slika 53: Popolni ortofoto, izdelan na osnovi fotogrametričnega zajema

Zaradi boljše predstavitve razlike med geometrijsko nepopravljenim aerosnetkom in ortorektificirano podobo je za primerjavo prikazan le del celotnega območja v večjemu merilu (slika 54).

Na sliki 54 (spodaj), ki prikazuje ortorektificirano podobo istega območja kot na aerosnetku (slika 54, zgoraj), vidimo, da je ta drugače orientirana, to je proti severu. Na primeru stavbe v centru podob opazimo, da je na rektificirani podobi stavba pravilno ortogonalno projicirana ter deli fasade niso več vidni. Rektificirana podoba prikazuje tudi ortoobmočja, označena s črnimi linijami, znotraj katerih so

bila v procesu najdena zakrita območja. Slikovne informacije teh območij so poiskane na sosednjih posnetkih v postopku mozaičenja.



Slika 54: Primer izreza iz obravnavanega območja na aeroposnetku (zgoraj) in istega območja na ortorektificirani podobi (spodaj), pridobljeni na osnovi fotogrametričnega zajema

Slika 55 prikazuje isto območje kot predhodni sliki, vendar je na njej prikazan del končnega popolnega ortofota, ki je rezultat združitve vseh ortorektificiranih podob vzdolž stičnih linij, ki niso več vidne. Zakrita območja, najdena znotraj avtomatsko definiranih ortoobmočij, so zapolnjena na osnovi sosednjih posnetkov.



Slika 55: Prikaz izreza obravnavanega območja na končnem popolnem ortofotu, izdelanem s pomočjo podatkov fotogrametričnega zajema

#### **7.4.2 Popolni ortofoto, izdelan na osnovi lidarskih podatkov**

Pri izdelavi popolnega ortofota na osnovi oblaka točk, ki je pridobljen z laserskim skeniranjem, so rezultati podobni klasični metodi izdelave popolnega ortofota. Zaradi majhnega merila prikaza popolnega ortofota za celotno območje obravnave težko opazimo kakšno vizualno razliko med popolnim ortofotom, izdelanim na klasičen način (slika 53), in popolnim ortofotom, ki je pridobljen na osnovi DMP-ja iz lidarskih točk (slika 56). Lahko pa opazimo, da imata oba popolna ortofota večje deformacije na robovih oz. z oddaljevanjem od centra, kar je posledica premajhnega preklopa med posnetki in slabše izdelave ortoobmočij na teh delih.



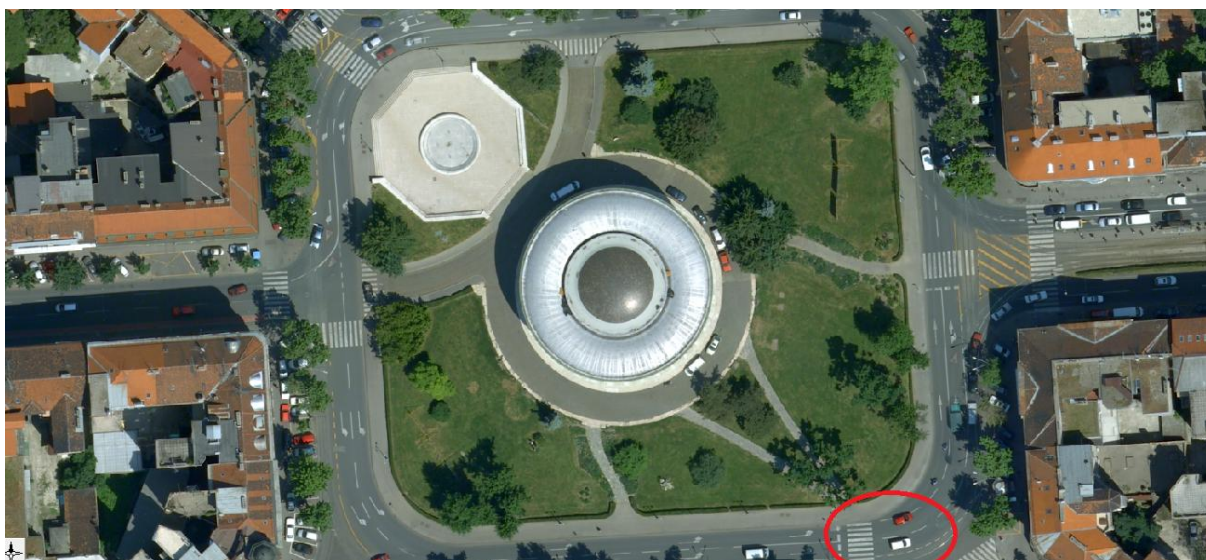
Slika 56: Popolni ortofoto, izdelan na osnovi lidarskih podatkov

Če povečamo merilo in prikažemo le območje ortorektificirane podobe, pridobljene na osnovi lidarskih točk (slika 57), ni vidne razlike med njim in istim območjem na ortorektificirani podobi, prikazani na sliki 54 (spodaj).



Slika 57: Primer izreza obravnavanega območja za primerjavo na ortorektificirani podobi, pridobljeni na osnovi lidarskih točk

Tudi na tem primeru (slika 57) ne opazimo vidne kakovostne razlike na izrezu območja v primerjavi s prejšnjim postopkom (slika 55). Opazimo pa, da so v postopku mozaičenja uporabljene različne sosednje podobe, ki so posnete z majhnim časovnim odstopanjem. Ta razlika je vidna v območju, označenem z rdečo barvo, na sliki 58. Avta v rdečem območju na sliki 58 sta bolj oddaljena od prehoda za pešce kot na sliki 55, kar je posledica časovne razlike snemanja.



Slika 58: Prikaz izreza obravnavanega območja končnega popolnega ortofota, pridobljenega z uporabo lidarskih podatkov

## 8 OCENA KAKOVOSTI REZULTATOV

Kot je navedeno v podpoglavju 6.2, je v diplomski nalogi za oceno kakovosti uporabljen osnovni element kakovosti, položajna točnost, ki je določena s primerjavo in analizo natančnosti položaja elementov na podobi in elementov na terenu, ki so opazovani z višjo natančnostjo. Tako so za absolutno točnost, ki predstavlja podelement položajne točnosti, izbrane kontrolne točke na podobi, ki smo jih z metodo RTK GPS opazovali tudi na terenu. Relativna točnost kot drugi podelement pozicijske točnosti je določena s primerjavo med končnim izdelkom in vektorskim slojem fotogrametričnega zajema, pridobljenim od Geofota. Izdelal sem tudi primerjavo med oba končnima izdelkoma, to je med popolnima ortopodobama, izdelanima na dva različna načina.

Državna geodetska uprava Republike Hrvaške za potrebe izdelave uradnih državnih kart ne izdeluje popolnega ortofota, ampak le ortofoto karte ekvivalenta meril 1 : 2000 in manjših. Enaka situacija je v Sloveniji, kjer se izdeluje ortofotokarta ekvivalenta merila 1 : 5000. Posledično temu ni uradnih specifikacij in predpisov za ta popolni ortofoto, ki se izdeluje le v posebnih primerih ter so njegove specifikacije določene v pogodbi, s strani investitorja ali izvajalca. Podjetje Geofoto je za potrebe izdelave 3D modela Mestne Občine Zagreb izdelalo popolni ortofoto, ki je razdeljen na liste v merilu 1 : 1000 in ima prostorsko ločljivostjo 0,10 m, kot je predpisano v pogodbi. Glede na to, da sem v konkretnem primeru izdelave popolnega ortofota v diplomski nalogi uporabil iste vhodne podatke kot podjetje Geofoto, sem prevzel tudi iste zahtevane specifikacije izdelka.

### 8.1 Absolutna točnost

Koncept največjega dovoljenega odstopanja po standardih temelji na trikratniku izračunanega RMSE-ja za vsako točko. Točka, ki presega maksimalno dovoljeno odstopanje, se smatra kot groba napaka, če nadaljnji pregled točke razkrije, da je odločitev utemeljena (JRC et Al., 2008). Kontrolne točke torej morajo biti določene z najmanj trikrat večjo natančnostjo od natančnosti končnega popolnega ortofota, npr. v primeru, da ima končni izdelek 2,5 m RMSE, naj bi potem vrednost RMSE-ja kontrolnih točk znašala 0,8 m ali manj. Dopustno odstopanje za popolni ortofoto v ekvivalentu merila 1 : 1000 je 0,1 m, tako da kontrolne točke, opazovane z instrumentom Trimble GPS 5800 s horizontalno natančnostjo  $\pm 1\text{cm} + 1\text{ppm RMS}$ , zadovoljijo zahtevani pogoj. Vertikalna natančnost je bila  $\pm 2\text{cm} + 1\text{ppm RMS}$ , vendar ta za ortofoto ni pomembna, saj lahko kontroliramo le planimetrične koordinate. Rezultati merjenja in primerjave so prikazani v naslednjih preglednicah.

Preglednica 1 prikazuje merjene vrednosti koordinat na terenu za pet opazovanih kontrolnih točk, ki so vzete kot prave vrednosti (slika 59).



Preglednica 1: Koordinate merjenih točk na terenu.

Točka	X[m]	Y[m]
1	5577039,56	5074295,19
2	5577127,70	5074400,17
3	5577173,09	5074462,32
4	5577056,95	5074467,23
5	5576942,18	5074555,89



Slika 59: Označeni položaj kontrolnih točk

V preglednici 2 so prikazane koordinate kontrolnih točk, ki sem jih zajel na popolnemu ortofotu, pridobljenem na osnovi fotogrametričnega zajema, ter njihova odstopanja od prave vrednosti (terensko izmerjenih koordinat).

Preglednica 2: Koordinate točk popolnega ortofota (fotogrametrični zajem) in njihova odstopanja od prave vrednosti

Točka	Popolni ortofoto (fotogrametrični zajem)		Odstopanje koordinat	
	X[m]	Y[m]	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]
1	5577039,57	5074295,21	0,01	0,02
2	5577127,70	5074400,17	0,00	0,00
3	5577173,00	5074462,41	0,09	0,09
4	5577056,91	5074467,24	0,04	0,01
5	5576942,16	5074555,96	0,02	0,07

V preglednici 3 so prikazane koordinate točk popolnega ortofota, ki je rezultat druge metode izdelave, ter njihova odstopanja od prave vrednosti.

Preglednica 3: Koordinate točk popolnega ortofota (lidar) in njihova odstopanja od prave vrednosti

Točka	Popolni ortofoto (lidar)		Odstopanje koordinat	
	X[m]	Y[m]	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]
1	5577039,60	5074295,26	0,04	0,07
2	5577127,66	5074400,22	0,04	0,05
3	5577172,98	5074462,41	0,11	0,09
4	5577056,91	5074467,27	0,04	0,04
5	5576942,13	5074555,96	0,05	0,07

Na osnovi zgornjih podatkov sem izračunal oceno kakovosti izdelanih popolnih ortopodob z uporabo mere za vrednotenje RMSE (enačba 10). Rezultati so prikazani v preglednici 4.

Preglednica 4: Absolutna točnost pridobljenih popolnih ortopodob

Metoda izdelave popolnega ortofota	RMSE <sub>X</sub> [m]	RMSE <sub>Y</sub> [m]
Ortofoto na osnovi podatkov fotogrametričnega zajema	0,05	0,05
Ortofoto na osnovi lidarskih podatkov	0,06	0,07

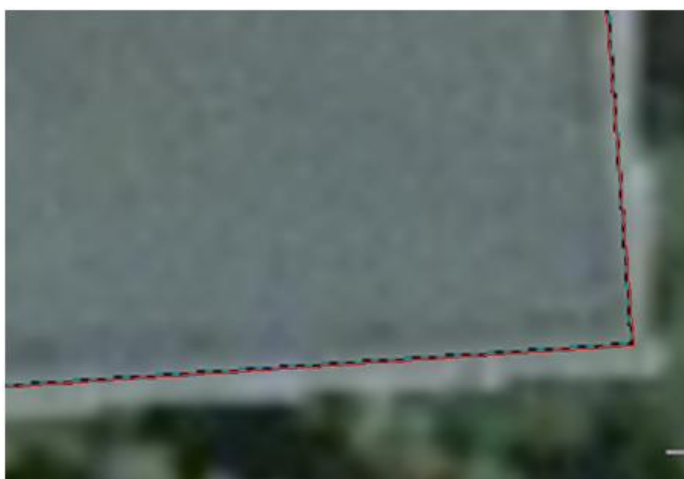
V preglednici 4 vidimo, da oba pridobljena ortofota zadostujeta pogoju o zahtevani natančnosti, vendar bi za zanesljivejšo oceno morali upoštevati več kontrolnih točk, ki naj bi bile razporejene po celotnem območju obdelave. Razlike RMSE med obema metodama izdelave nakazujejo na to, da je popolni ortofoto, pridobljen na osnovi podatkov fotogrametričnega zajema, nekoliko točnejši, kot je popolni ortofoto, pridobljen na osnovi lidarskih točk. To razliko bi lahko razložili kot posledico tega, da je natančnost ročnega zajema na stereoparih večja od avtomatske izdelave digitalnega modela reliefa in avtomatske vektorizacije lidarskih točk. Kljub temu pa je razlika izračunanih vrednosti RMSE med obema izdelkoma zelo majhna, tako da je lahko tudi slučajna.

## 8.2 Relativna točnost

Ker sem imel za oceno položajne točnosti izdelka na razpolago zelo majhno število kontrolnih točk, sem se odločil, da izdelam še relativno (vizualno) oceno položajne točnosti ortofota glede na rezultate fotogrametričnega zajema. Podatke fotogrametričnega zajema smo uporabili v prvi metodi izdelave popolnega ortofota (za določitev digitalnega modela), zato je pričakovano, da med objekti na popolnem ortofotu in vektorsko zajetimi objekti ni večjih odstopanj, kar lahko vidimo tudi na sliki 60.



Slika 60: Prikaz vektorskega sloja objektov (črtkano) na popolnem ortofotu



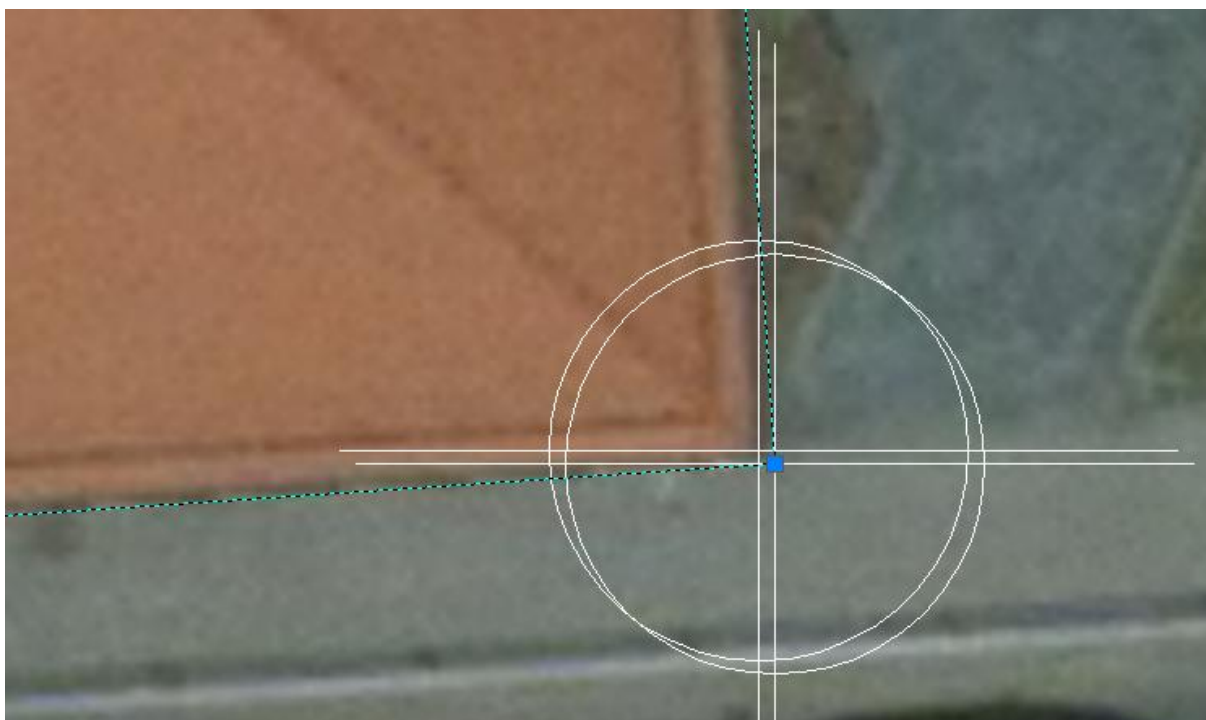
Slika 61: Detajl stavbe na ortofotu (rdeče) s prikazom vektorskega sloja (črtkano)

Vidimo, da rastrski in vektorski sloj zelo dobro sovpadata (slika 61). Do večjih odstopanj med objekti je prišlo na robnih območjih (slika 62), kar je posledica premajhnega preklopa med posnetki.



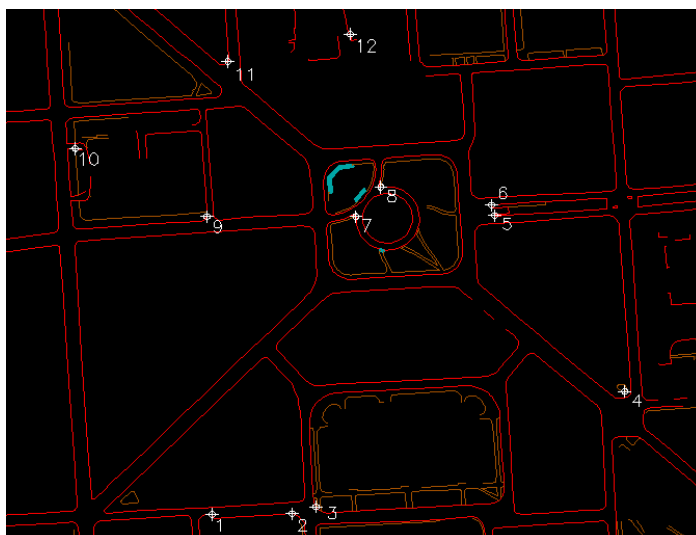
Slika 62: Prikaz večjih odstopanj med detajlom stavbe na ortofotu (rdeče) in vektorskim slojem (črtkano)

Pri primerjavi istega vektorskega sloja s popolnim ortofotom, pridobljenim na osnovi lidarskih podatkov, opazimo nekoliko večja odstopanja tudi v centru območja obravnave, kar je bilo pričakovano (slika 63). Za izdelavo tega popolnega ortofota je uporabljen drugačen digitalni model površja, ki je, po rezultatih iz prejšnjega podpoglavja, slabše natančnosti.

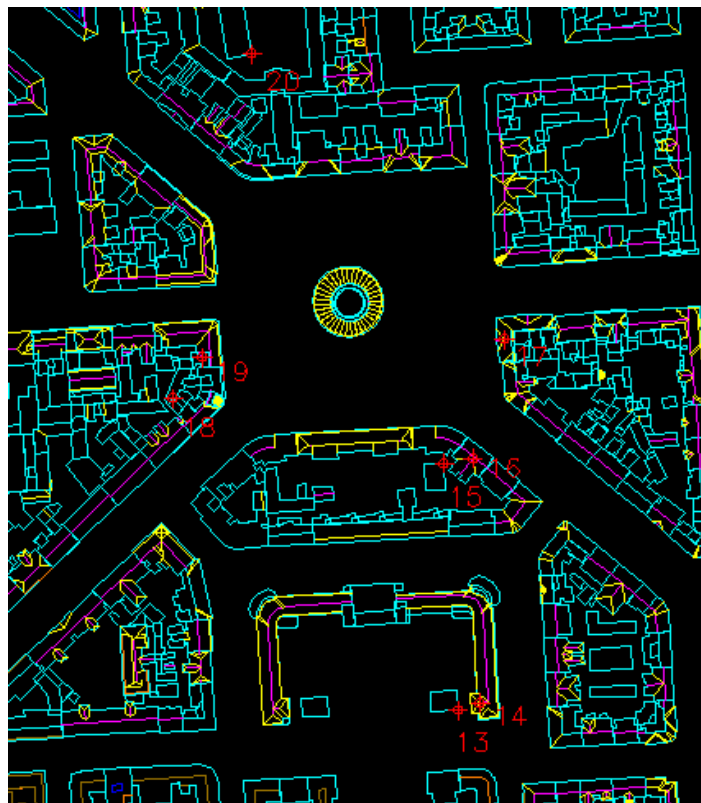


Slika 63: Odstopanje popolnega ortofota (lidar) od vektorskega sloja

Za določitev relativne točnosti je uporabljena ista mera kakovosti RMSE kot za absolutno točnost, vendar jo izračunamo na osnovi razlike med točkami, določenimi na popolnem ortofotu, in točkami, ki jih določimo na vektorskem sloju. Prvih 12 detajlnih točk sem izbral na digitalnemu modelu reliefa (slika 64) in drugih 8 točk na digitalnemu modelu zgradb (slika 65).



Slika 64: Detajlne točke na digitalnem modelu reliefa



Slika 65: Detajlne točke na digitalnem modelu zgradb

Iste točke so zaradi lažje predstavitve razporeditve po območju obravnave prikazane na popolnem ortofotu (slika 66).



Slika 66: Detajlne točke, prikazane na popolnem ortofotu

Koordinate detajlnih točk, ki so vzete kot prave vrednosti (iz vektorskega sloja), so predstavljene v preglednici 5. Koordinate istih točk, zajetih na popolnem ortofotu, izdelanem po prvi metodi, in njihova odstopanja od detajlnih točk, ki so vzete kot prave vrednosti, vidimo v preglednici 6.

Preglednica 5: Koordinate zajetih točk na vektorskemu sloju

Točka	X[m]	Y[m]	Točka	X[m]	Y[m]
1	5576946,32	5074196,49	11	5576959,61	5074576,68
2	5577013,55	5074197,16	12	5577060,75	5074605,84
3	5577033,54	5074203,08	13	5577152,61	5074223,31
4	5577292,64	5074299,85	14	5577164,80	5074227,59
5	5577183,37	5074447,45	15	5577145,06	5074357,68
6	5577180,86	5074456,06	16	5577160,62	5074360,23
7	5577066,99	5074446,53	17	5577177,89	5074425,13
8	5577087,93	5074471,32	18	5576997,91	5074393,00
9	5576941,93	5074446,43	19	5577013,81	5074415,15
10	5576831,49	5074503,66	20	5577040,75	5074580,22

Preglednica 6: Koordinate detajlnih točk na popolnem ortofotu (fotogrametrični zajem) in njihova odstopanja od prave vrednosti.

Točka	X[m]	Y[m]	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	Točka	X[m]	Y[m]	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]
1	5576946,45	5074196,58	0,13	0,09	11	5576959,66	5074576,75	0,05	0,07
2	5577013,44	5074197,07	0,11	0,09	12	5577060,78	5074605,87	0,03	0,03
3	5577033,62	5074203,19	0,08	0,11	13	5577152,56	5074223,23	0,05	0,08
4	5577292,66	5074299,88	0,02	0,03	14	5577164,84	5074227,61	0,04	0,02
5	5577183,39	5074447,43	0,02	0,02	15	5577145,05	5074357,65	0,01	0,03
6	5577180,82	5074456,05	0,04	0,01	16	5577160,64	5074360,26	0,02	0,03
7	5577066,96	5074446,50	0,03	0,03	17	5577177,93	5074425,18	0,04	0,05
8	5577087,95	5074471,33	0,02	0,01	18	5576997,87	5074392,96	0,04	0,04
9	5576941,96	5074446,50	0,03	0,07	19	5577013,90	5074415,24	0,08	0,09
10	5576831,53	5074503,61	0,04	0,05	20	5577040,82	5074580,33	0,07	0,11

V preglednici 7 pa so prikazane koordinate zajetih detajlnih točk na popolnemu ortofotu, izdelanem po drugi metodi, in njihova odstopanja od prave vrednosti.

Preglednica 7: Koordinate detajlnih točk na popolnemu ortofotu (lidar) in njihova odstopanja od prave vrednosti

Točka	X[m]	Y[m]	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	Točka	X[m]	Y[m]	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]
1	5576946,47	5074196,65	0,15	0,16	11	5576959,50	5074576,83	0,11	0,15
2	5577013,67	5074197,07	0,12	0,09	12	5577060,63	5074605,76	0,12	0,08
3	5577033,66	5074203,19	0,12	0,11	13	5577152,72	5074223,42	0,11	0,11
4	5577292,57	5074299,80	0,07	0,05	14	5577164,70	5074227,68	0,10	0,09
5	5577183,45	5074447,36	0,08	0,09	15	5577144,99	5074357,64	0,07	0,04
6	5577180,79	5074456,08	0,07	0,02	16	5577160,67	5074360,28	0,05	0,05
7	5577066,93	5074446,45	0,06	0,08	17	5577177,83	5074425,20	0,06	0,07
8	5577087,84	5074471,23	0,09	0,09	18	5576997,99	5074393,06	0,08	0,06
9	5576941,86	5074446,52	0,06	0,09	19	5577013,89	5074415,27	0,08	0,12
10	5576831,62	5074503,79	0,13	0,13	20	5577040,85	5074580,37	0,10	0,15

Kot že povedano, da so vidna odstopanja največja na robovih območja, tudi odstopanja detajlnih točk od prave vrednosti to dokazujejo. Ko primerjamo sliko 66, na kateri je prikazan razpored detajlnih točk in obe preglednici, ki vsebujejo koordinate točk, ki so zajete na popolnih ortopodobah (preglednica 6 in preglednica 7), vidimo, da imajo točke, ki so bolj oddaljene od središča, odstopanje večje od 10 cm, kar preseže dopustno odstopanje.

Preglednica 8: Relativna točnost izdelanih popolnih ortopodob

Metoda izdelave popolnega ortofota	RMSE <sub>X</sub> [m]	RMSE <sub>Y</sub> [m]
Uporaba podatkov fotogrametričnega zajema	0,06	0,06
Uporaba lidarskih podatkov	0,10	0,10

Rezultati, prikazani v preglednici 8, kažejo, da je tudi v primeru relativne točnosti popolni ortofoto, izdelan z uporabo podatkov iz fotogrametričnega zajema, natančnejši, kar pač ni zanesljiva ocena, ker je isti vektorski sloj, uporabljen za relativno oceno, uporabljen tudi za izdelavo DMP istega popolnega ortofota. Ne glede na slabšo natančnost oba popolna ortofota ne presežeta dopustnega odstopanja in ju tako lahko sprejmemo.



## 9 ZAKLJUČEK

Popolni ortofoto je ortofoto, na katerem so v ortogonalni projekciji pravilno prikazani tudi grajeni objekti, ki se dvigajo nad terenom. Za razliko od klasičnega ortofota, na katerem je pravilno prikazana le vsebina, ki se nahaja na višini terena. Ti objekti se na popolnem ortofotu nahajajo nad svojimi temelji in ne zakrivajo ostalih objektov in terena v njihovi senci. Za izdelavo popolnega ortofota zato potrebujemo digitalni model površja, ki poleg digitalnega modela reliefa na odprtem terenu vsebuje tudi digitalni model zgradb na pozidanih zemljiščih.

Zaradi vse večjega povpraševanja po popolnem ortofotu je pomembno, da njegova izdelava postane hitra in čim bolj poceni. Danes obstajajo programska orodja, ki omogočajo avtomatsko izdelavo popolnega ortofota, če imamo ustrezno pripravljene vhodne podatke. Uporabljeni so algoritmi, ki omogočajo avtomatski zajem ortoobmočij znotraj katerih se izvaja vizualna analiza. Vizualna analiza ali iskanje zakritih območij, ki poteka po metodi Z-buffer, je za računalnik zelo zahtevna. Danes so v uporabi tudi druge metode, ki omogočajo iskanje neodvisno od ločljivosti vhodnih posnetkov in so za računalnik manj zahtevne. Tak primer sta metoda primerjave kotov in metoda primerjave višin, ki sta odvisni od natančnosti DMP-ja. Postopek mozaičenja uporablja algoritem, ki za izbiro najprimernejših pikselov za iskanje stičnih linij upošteva implementacijo merila bližine nadirja in zakritega območja ter je najmanj občutljiv na nenatančnosti DMP-ja. Ta postopek poteka tudi avtomatsko tako, da je najbolj zahteven del izdelave popolnega ortofota priprava vhodnega podatka - digitalnega modela površja oziroma njegovih podmodelov – DMR-ja in DMZ-ja. Klasično metodo izdelave DMP-ja, fotogrametrični zajem iz stereoparov, ki je zelo natančna, ampak tudi časovno zelo zahtevna, so z razvojem nadomestile metode slikovnega ujemanja, ki omogočajo avtomatizacijo postopka in so zato cenejše in veliko hitrejšje. Z uporabo še novejšje tehnologije zajema podatkov za izdelavo DMP-ja, aero laserskega skeniranja, lahko tudi za ogromna območja v še krajšem času izdelamo dovolj dober digitalni model površja, z gostoto 10 točk/m<sup>2</sup> in več. Da bi pokazali, da je tudi ta metoda dovolj točna, je v praktičnem delu diplomske naloge poleg popolnega ortofota, pridobljenega na podlagi fotogrametričnega zajema DMP, izdelan tudi popolni ortofoto, ki uporablja DMP, izdelan iz lidarskih podatkov. Z določanjem ocene kakovosti za element položajne točnosti pridobljenih izdelkov, ki je potekala po standardih, ki jih pripisuje ISO, in njihovo primerjavo, smo ugotovili, da tudi popolni ortofoto, izdelan po drugi metodi, zagotavlja zahtevane specifikacije določene v pogodbi med investitorjem in izvajalcem. Ker se popolni ortofoto za enkrat izdeluje le v posebnih primerih, še ne obstajajo uradni pravilniki in tehnične specifikacije tega izdelka.

## VIRI

Aber, J. S., Marzolf, I., Ries, J. B. 2010. Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications. Amsterdam, Elsevier: str. 36, 36, 37.

<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780444532602> (Pridobljeno 12. 9. 2011.)

Amhar F., Jansa J., Ries C. 1998. The generation of true orthophotos using a 3D building model in conjunction with conventional DTM. V: ISPRS Commission IV Symposium on GIS- Between Visions and Applications 32/4, Stuttgart: 16-22.

<http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/jansa57.pdf> (Pridobljeno 18. 4. 2011.)

Ayhan, E., Erden, Ö., Atay, G., Tunç, E. 2006. Digital Orthophoto Generation with Aerial Photos and Satellite Images And Analyzing of Factors which Affect Accuracy. V: XXIII FIG Congress - Shaping the Change. Munich, Germany.

[http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ps05\\_08/ps05\\_08\\_02\\_ayhan\\_et\\_al\\_0552.pdf](http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ps05_08/ps05_08_02_ayhan_et_al_0552.pdf)

(Pridobljeno 20. 11. 2011.)

Bang, K.I., Habib, A.F., Shin, S.W., Kim, K.O. 2007. Comparative Analysis Of Alternative Methodologies For True Ortho-Photo Generation From High Resolution Satellite Imagery. V: ASPRS 2007 Annual Conference. Tampa, Florida.

<http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/tampa2007/0004.pdf> (Pridobljeno 18. 4. 2011.)

Barazzetti, L., Brovelli, M., Scaioni, M. 2007. Generation of True-Orthophotos with Lidar High Resolution Digital Surface Models. Photogrammetric Journal of Finland 21, 1: 26-36.

[http://www.foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf\\_e/2008/Barazzetti\\_et\\_al\\_2008\\_PJF.pdf](http://www.foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2008/Barazzetti_et_al_2008_PJF.pdf)

(Pridobljeno 24. 5. 2011.)

Braun, J. 2003. Aspects on True-Orthophoto Production. IFP (Institut für Photogrammetrie), Universität Stuttgart: 205–214.

<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo03/braun.pdf> (Pridobljeno 20. 5. 2011.)

Günay, A., Arefi, H., Hahn, M. 2007: True Orthophoto Production by Using LIDAR Data. V: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 36, Part 4/W45, 5 str.

[http://www.geovisualisierung.net/isprs2007/docs/02\\_G%81nay.pdf](http://www.geovisualisierung.net/isprs2007/docs/02_G%81nay.pdf) (Pridobljeno 18. 4. 2011.)

Habib, A.F., Kim, E.M., Kim, C.J. 2007. New Methodologies for True Orthophoto Generation. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 73/1: 25-36.

[http://www.asprs.org/a/publications/pers/2007journal/january/2007\\_jan\\_25-36.pdf](http://www.asprs.org/a/publications/pers/2007journal/january/2007_jan_25-36.pdf)

(Pridobljeno 19. 5. 2011.)

Hartman, J. 2008. Različni pristopi k izdelavi popolnega ortofota. Diplomaska naloga. Ljubljana, UL FGG: 61 str.

INPHO GmbH. 2010. OrthoMaster Tutorial for Version 5.3 and higher. Inpho GmbH. 52 str.

Kapnias, D., Milenov, P., Kay, S. 2008. Guidelines for Best Practice and Quality Checking of Ortho Imagery, Issue 3.0.

<http://www.marine.ie/NR/ronlyres/57770D8F-9854-4012-B3CD-B2ADEB7551DA/0/OrthoImageryGuidelinesITT1132.pdf> (Pridobljeno 20. 10. 2011.)

Keinan, E., Doytsher, Y. 2008. Automatic Methods Toward Generating Digital True Orthophoto By Using Dense Lidar Data. V: ASPRS 2008 Annual Conference. Portland, Oregon.  
<http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/portland08/0039.pdf> (Pridobljeno 18. 4. 2011.)

Kim, C., Ghanma, M., Habib, A. 2006. Integration of Photogrammetric and LIDAR Data for Realistic 3D Model Generation. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII - B2. Beijing 2008.  
[http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/2\\_pdf/5\\_WG-II-5/02.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/2_pdf/5_WG-II-5/02.pdf)  
(Pridobljeno 20. 5. 2011.)

Kölbl, O. 2001. Technical Specifications for the Elaboration of Digital Elevation Models. EPFL, Lausanne, Švica: 57 str.  
[http://pub.corila.it/DocumentiPubblici/GIS4EU/GIS4EURepository/Reserved/03\\_Meetings/20080919\\_ConferenceCall/04\\_Slides/DTM16I\\_Specific\\_Apr01.pdf](http://pub.corila.it/DocumentiPubblici/GIS4EU/GIS4EURepository/Reserved/03_Meetings/20080919_ConferenceCall/04_Slides/DTM16I_Specific_Apr01.pdf) (Pridobljeno 23. 5. 2011.)

Kosmatin Fras, M. 2006. Kontrola ortofota. Primer elaborata, ki upošteva standarde ISO. Študijsko gradivo. Ljubljana, UL FGG

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

Kraus, K., Harley, I., Kyle, S. (prev) 2007. Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans, Volume 2. Berlin, Walter de Gruyter: 459 str.

Kraus, K., Waldhäusl, P., Stewardson, P. (prev.) 1993. Photogrammetry: Fundamentals and Standard Processes, Volume 1. Bonn, Dümmler Verlag: 397 str.

Kuveždić, A. 2006. Primjene fotorealističnih 3D modela u dokumentiranju arheoloških Istraživanja. Diplomski naloga. Zagreb, Geodetski fakultet: 77 str.  
[www.kartografija.hr/old\\_hkd/obrazovanje/diplomski/kuvezdic/diplomski/AKuvezdic-diplomski.pdf](http://www.kartografija.hr/old_hkd/obrazovanje/diplomski/kuvezdic/diplomski/AKuvezdic-diplomski.pdf)  
(Pridobljeno 16. 5. 2011.)

Li, Z., Zhu, Q., Gold, C. 2004. Digital terrain modeling: principles and methodology. CRC Press, Boca Raton, Florida: 307 str.  
<http://www.mediafire.com/?andedzk4j3m> (Pridobljeno 13.10.2011.)

Marsetič, A., Oštir, K. 2007. Uporaba satelitskih posnetkov spot za izdelavo ortopodob. Geodetski vestnik 51, 1: 69-84.

Nielsen Odegaard, M. 2004. True orthophoto generation. Master Thesis. Kgs. Lyngby, Technical University of Denmark, Informatics and Mathematical Modelling: 126 str.  
[http://www.iter.dk/projects/docs/imm-thesis-2004-50\\_web.pdf](http://www.iter.dk/projects/docs/imm-thesis-2004-50_web.pdf) (Pridobljeno 11. 4. 2011.)

Pateraki M. 2000. Matching methods for automatic DTM generation. V: Geodaetisches

Seminar SS/2000 – Internal report IGP (Institut für Geodäsie und Photogrammetrie). Zürich, Switzerland.

<http://www.geo.u-szeged.hu/~joe/fotogrammetria/matching.pdf> (Pridobljeno 2. 10. 2011.)

Petrovič, D. 2006. Ocena kakovosti državne topografske karte v merilu 1 : 50000. Geodetski vestnik 50, 2: 187-200.

Podobnikar, T. 2008. Digitalni model reliefa iz geodetskih podatkov različne kakovosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, UL FGG: 337 str.

Schickler, W., Thorpe, A. 1998. Operational Procedure For Automatic True Orthophoto Generation. V: Fritsch, D., English, M., Sester, M. (ur.). ISPRS Commission IV Symposium on GIS- Between Visions and Applications, Vol. 32/4, Stuttgart: 527–532.

<http://www.isprs.org/proceedings/XXXII/part4/schickler58.pdf> (Pridobljeno 18. 4. 2011.)

Šumrada, R. 2005. Strukture podatkov in prostorske analize. Ljubljana, UL FGG.

Standardi:

ISO 19114:2003 Geographic information -- Quality evaluation procedures

Arizona State University. 2011

[http://www.asu.edu/courses/art345/pike\\_b/terrainmapping/lidar\\_files/image001.jpg\[/img\]](http://www.asu.edu/courses/art345/pike_b/terrainmapping/lidar_files/image001.jpg[/img])  
(Pridobljeno 10. 5. 2011)

Geofoto d.o.o. 2011

<http://www.geofoto.hr/index.php/hr/digitalni-modeli-reljefa.html> (Pridobljeno 18. 8. 2011.)

<http://www.geofoto.hr/index.php/hr/lidar.html> (Pridobljeno 15. 12. 2011.)

GISBOX. 2011.

<http://www.gisbox.ro> (Pridobljeno 17. 6. 2011.)

History Data Service. 2011.

<http://hds.essex.ac.uk/g2gp/gis/sect25.asp> (Pridobljeno 17. 6. 2011.)

INGEOCAD. 2011.

<http://www.ingecad.md/index.php?chapter=8&ln=en> (Pridobljeno 17. 6. 2011.)

INPHO GmbH. 2011.

[http://www.inpho.de/index.php?seite=orthovista\\_seamline&root=165&kanal=html](http://www.inpho.de/index.php?seite=orthovista_seamline&root=165&kanal=html)  
(Pridobljeno 11. 12. 2011.)

Wikipedia. 2011.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_elevation\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_elevation_model) (Pridobljeno 3. 8. 2011.)

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:DTM\\_DSM.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:DTM_DSM.png) (Pridobljeno 3. 8. 2011.)

<http://en.wikipedia.org/wiki/Vignetting> (Pridobljeno 13. 10. 2011.)

Zavod za Fotogrametriju. 2011.

[http://www.zzf.hr/popup.htm?pix\\_fix/tdof\\_5.jpg](http://www.zzf.hr/popup.htm?pix_fix/tdof_5.jpg) (Pridobljeno 15. 11. 2011.)