

Christian Sommer

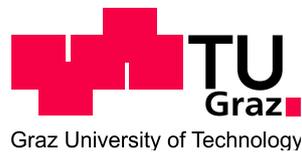
**Ableitung eines Aufnahmekonzepts für die Erstellung von
digitalen Oberflächenmodellen aus hoch redundanten
Luftbildern im Forstbereich**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science



Technische Universität Graz

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr. Mathias Schardt

Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie

Graz, September 2012

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

Kurzfassung

Hochauflösende digitale Oberflächenmodelle von Kronendächern im Forstbereich sind für die Durchführung von Waldinventuren von sehr hoher Bedeutung. Bis dato werden diese Modelle aus ALS (Airborne Laser Scanning) Befliegungen erzeugt. Jedoch ist die Akquisition solcher Fernerkundungsdaten kosten- und zeitintensiv. Deshalb werden derzeit photogrammetrische Alternativen gesucht, um für diesen Zweck digitale Oberflächenmodelle aus Luftbildern zu berechnen. Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, ein Konzept für die optimale Aufnahmegeometrie von Luftbildern im Forstbereich abzuleiten, um damit das Kronendach bestmöglich rekonstruieren zu können. Dieses Konzept soll in weiterer Folge für Befliegungen forstrelevanter Gebiete mit der Flugplattform ADAM des Institutes DIGITAL (Jonneum Research) Anwendung finden. Für die Durchführung der Untersuchungen wurde ein hoch redundanter Bilddatensatz mit einem Bildüberlappungsbereich in Flugrichtung von 93% von einem geeigneten bewaldeten Testgebiet erstellt. Ausgehend von diesen Daten wurden Testszenarien mit unterschiedlichen Aufnahmekonstellationen definiert. Für jedes Szenario wurde im Anschluss ein digitales Oberflächenmodell des zugrundeliegenden Kronendaches berechnet. Im Validierungsschritt wurden die einzelnen Modelle anhand von unabhängigen Referenzmessungen, einer visuellen Interpretation und mit Hilfe eines modellbasierten Ansatzes beurteilt. Zusätzlich wurden die photogrammetrischen Modelle mit einem digitalen Oberflächenmodell aus einer ALS-Befliegung verglichen. Aus den Erkenntnissen des Validierungsschrittes und aus den hardwarespezifischen Vorgaben der Flugaufnahmeplattform wurde im letzten Arbeitsschritt ein Konzept für die optimale Aufnahmegeometrie von Luftbildbefliegungen von Forstgebieten erstellt.

Abstract

For the execution of forest inventory high-resolution digital surface models of the forest canopy are of great importance. Up to now these models have been generated out of Airborne Laser Scanning Missions. However, the acquisition of these remote sensing data is both cost- and time-consuming. Due to this fact alternatives for the generation of digital canopy models are being sought. This is where photogrammetry comes in. The ambition of this study is to derive a concept for an ideal set-up for the imaging geometry for generating digital surface models in forests. This concept is to be used for further aerial photo missions with Airborne Data Acquisition Module (ADAM) developed at the Institute DIGITAL (Joanneum Research). For the execution of the investigations tasks in connection with this thesis a high redundant image data set with an image overlap (in flight direction) of 93% was generated above a qualified test site. Based on the aerial images different test scenarios for the possible exposure geometries were defined. For each scenario a digital surface model of the forest canopy was generated. The next step was the validation of all generated digital surface models based on reference measurements, a visual interpretation and a model-based approach. In addition, the photogrammetric canopy models were compared with a canopy model generated out of an ALS-Mission. On the basis of the knowledge gained in the validation step and the hardware specifications of the airborne data acquisition module the concept for the ideal exposure geometry for aerial photo missions for forest applications was defined.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem Betreuer, Herrn Univ. Prof. Dr. Mathias Schardt, für die Bereitstellung des sehr interessante Themas dieser Masterarbeit und für die Möglichkeit zur Durchführung dieser Arbeit am Institut DIGITAL (Joanneum Research) bedanken. Seine positive Einstellung während den fachlichen Diskussionen und Anregungen waren stets eine Hilfestellung und Motivation zum Verfassen dieser Masterarbeit.

Ebenso möchte ich mich bei meinen Arbeitskollegen Dr. Karlheinz Gutjahr, Dr. Roland Perko, Dr. Hannes Raggam und Dipl. Ing. Roland Wack für die Hilfestellungen und die konstruktiven technischen, aber auch für die abseits der Masterarbeitsthematik geführten Diskussionen bedanken.

Mein weiterer besonderer Dank gilt Dr. Christoph Straub von der bayrischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, welcher mich bei der Validierung der erzielten Ergebnisse tatkräftig unterstützte.

Ich möchte mich bei meinem Vater für die gesamte fachliche und mentale Unterstützung sowie für die vielen konstruktiven studienbezogenen Diskussionen während meiner gesamten Universitätslaufbahn bedanken. Ebenso möchte ich meiner Mutter für die ständige Begleitung und Hilfe danken. Vielen herzlichen Dank, dass ihr mir mein Studium an der technischen Universität in jeglicher Hinsicht ermöglicht habt!

Zum Schluss möchte ich noch meinen Geschwistern, allen meinen Freunden und meiner Freundin für alle jene Momente danken, welche wir gemeinsam während meiner Zeit in Graz erleben durften.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	PROBLEMDEFINITION	2
1.2	STAND DES WISSENS	3
1.2.1	<i>Historischer Hintergrund</i>	3
1.2.2	<i>„State of the art“ Software- und Hardwareprodukte</i>	4
1.3	STRUKTUR DER ARBEIT	6
2	PHOTOGRAMMETRISCHE GRUNDLAGEN	7
2.1	KALIBRIERUNG DER MESSKAMERA – INNERE ORIENTIERUNG	7
2.1.1	<i>Geometrische Kalibrierung</i>	7
2.1.2	<i>Vignettierung und Lichtabfall</i>	10
2.2	DAS STRAHLENBÜNDEL	11
2.3	GRUNDGLEICHUNGEN DER PHOTOGRAMMETRIE	13
2.4	ÄUßERE ORIENTIERUNG	14
2.4.1	<i>Räumlicher Rückwärtsschnitt</i>	14
2.4.2	<i>Bündelblockausgleichung</i>	16
2.5	MATCHING	19
2.5.1	<i>Parallaxe</i>	22
2.5.2	<i>Epipolare Geometrie</i>	24
2.5.3	<i>Relative Orientierung mittels projektiver Geometrie</i>	24
2.5.4	<i>SURF Algorithmus</i>	27
2.5.5	<i>Semi-global Matching</i>	30
2.6	RÄUMLICHER VORWÄRTSSCHNITT – GENERIERUNG EINES DOM	32
3	DATENGRUNDLAGEN	34
3.1	TESTGEBIET	34
3.2	LUFTBILDAUFNAHME	35
3.3	GPS UND IMU	38
3.4	ALS DATEN	40
3.5	PASSPUNKTE	42
3.5.1	<i>Polygonzug</i>	42
3.5.2	<i>Koordinatentransformation</i>	43
3.5.3	<i>Geoidundulation</i>	45
4	DURCHFÜHRUNG	47
4.1	DEFINITION DER TESTSZENARIEN	47
4.2	ARBEITSFLUSS	50
4.3	DATENVORVERARBEITUNG	50
4.3.1	<i>Bayer Pattern</i>	50
4.3.2	<i>Datenimport RSG & Verzeichnungskorrektur</i>	52
4.3.3	<i>Korrektur der Vignettierung</i>	53
4.4	VERKNÜPFUNGSPUNKTE	55
4.5	EINMESSEN DER PASSPUNKTE	59
4.6	BÜNDELBLOCKAUSGLEICH	60
4.7	MATCHING	63
4.7.1	<i>Sequentielles Matching</i>	64
4.7.2	<i>Multibaseline Matching</i>	68
4.8	DIGITALES OBERFLÄCHENMODELL	69
5	VALIDIERUNG	71
5.1	REFERENZMESSUNG	71
5.2	MODELLBASIERTER ANSATZ	78

5.2.1	<i>Oberflächenrauigkeit</i>	80
5.2.2	<i>Arbeitsschritte zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit</i>	83
5.2.3	<i>Ergebnis</i>	85
6	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	87
6.1	BAUMWEISE REFERENZMESSUNG.....	87
6.2	VISUELLE INTERPRETATION	90
6.3	OBERFLÄCHENRAUIGKEIT	90
6.4	SCHLUSSFOLGERUNG	95
7	ABLEITUNG DES AUFNAHMEKONZEPTS	96
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	101
9	LITERATURVERZEICHNIS	103

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2.1: VERZEICHNUNG, QUELLE: (KAUFMANN, 2011) KAPITEL 3	8
ABBILDUNG 2.2: VERZEICHNUNGSKURVE PROSILICA GE4900C	9
ABBILDUNG 2.3: RELATIVER LICHTABFALL ZUM BILDRAND, QUELLE: (LUHMANN, 2010) KAPITEL 3.1.3.6	11
ABBILDUNG 2.4: STRAHLENBÜNDEL IM PHOTOGRAMMETRISCHEN NORMALFALL, QUELLE: (KAUFMANN, 2011) KAPITEL 2.3	12
ABBILDUNG 2.5: RÄUMLICHER RÜCKWÄRTSSCHNITT, QUELLE: (KAUFMANN, 2011) KAPITEL 4.3.1	15
ABBILDUNG 2.6: BÜNDELBLOCKAUSGLEICHUNG, QUELLE: (KAUFMANN, 2011) KAPITEL 6.2.2	17
ABBILDUNG 2.7: DATENFLUSS BÜNDELBLOCKAUSGLEICHUNG, QUELLE: (LUHMANN, 2010) 4.4.1.3	18
ABBILDUNG 2.8: WORKFLOW MATCHING RSG	20
ABBILDUNG 2.9: BILD PYRAMIDEN, QUELLE: JOANNEUM RESEARCH	21
ABBILDUNG 2.10: EINTRÄGE DES „FEATURE VECTORS“ IM REFERENZBILD (LINKS) UND IM SUCHBILD (RECHTS), QUELLE: JOANNEUM RESEARCH	21
ABBILDUNG 2.11: PRINZIP DES BACKMATCHINGS, QUELLE: JOANNEUM RESEARCH	22
ABBILDUNG 2.12: NORMALFALL DER STEREOGRAMMETRIE, QUELLE: (KAUFMANN, 2011) KAPITEL 5.2.1	23
ABBILDUNG 2.13: PARALLAXE IN X-RICHTUNG, QUELLE: (KAUFMANN, 2011) KAPITEL 5.2.1	23
ABBILDUNG 2.14: KERNEBENE	24
ABBILDUNG 2.15: FILTERGRÖßEN IN UNTERSCHIEDLICHEN OKTAVEN, QUELLE: (BAY ET AL. 2008)	29
ABBILDUNG 2.16: ORIENTIERUNG DES VEKTORS, QUELLE: (BAY ET AL. 2008)	29
ABBILDUNG 2.17: QUADRAT UM DEN INTEREST POINT, QUELLE: (BAY ET AL. 2008)	30
ABBILDUNG 2.18: KOSTENAGGREGATION ENTLANG DER PFADE, QUELLE: (HIRSCHMÜLLER, 2008)	32
ABBILDUNG 2.19: QUELLE ETH ZÜRICH, QUELLE: <a href="http://www.igp.ethz.ch/photogrammetry/education/lehrveranstaltungen/photogrammetryfs11/cou
rsematerial/photo-fs2011-07-triang.pdf">HTTP://WWW.IGP.ETHZ.CH/PHOTOGRAMMETRY/EDUCATION/LEHRVERANSTALTUNGEN/PHOTOGRAMMETRYFS11/COU RSEMATERIAL/PHOTO-FS2011-07-TRIANG.PDF	33
ABBILDUNG 3.1: LAGE ST. MARGARETHEN AN DER RAAB, QUELLE: GOOGLE EARTH	34
ABBILDUNG 3.2: TESTGEBIET, QUELLE: GOOGLE EARTH	35
ABBILDUNG 3.3: ADAM AUFNAHMEPLATTFORM	36
ABBILDUNG 3.4: BESTIMMUNG DER FLUGHÖHE AUS FORMEL 3.1	37
ABBILDUNG 3.5: ROBINSON R44 RAVEN II	38
ABBILDUNG 3.6: FLUGTRAJektorIE ÜBER TESTGEBIET, QUELLE: GOOGLE EARTH	39
ABBILDUNG 3.7: SHADED RELIEF DES ALS-DOMS OBEN UND DES ALS-DGMs UNTEN	41
ABBILDUNG 3.8: LAGE DER FESTPUNKTE, QUELLE: GIS STEIERMARK	43
ABBILDUNG 3.9: LAGEDARSTELLUNG DER PASS- UND POLYGONPUNKTE	46
ABBILDUNG 4.1: PROJEKTIONSSTRAHLEN ZUR OBERFLÄCHENREKONSTRUKTION, QUELLE: (HIRSCHMUGL, 2008)	47
ABBILDUNG 4.2: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER AUFNAHMEGEOMETRIEN DER TESTSZENARIEN	48
ABBILDUNG 4.3: BEISPIEL EINES 7 x 7 BAYER PATTERN MIT 50% GRÜNEN UND JEWEILS 25% ROT UND BLAUEN PIXELN AM CCD, QUELLE: (PERKO, 2004)	51
ABBILDUNG 4.4: OBEN: EINKANALIGES BILD MIT BAYER PATTERN, UNTEN: INTERPOLIERTES RGB-BILD	51
ABBILDUNG 4.5: DE-BAYERING IN IMPACT TOOLBOX	52
ABBILDUNG 4.6: VIGNETTIERUNGSMASKE	54
ABBILDUNG 4.7: EINFLUSS DER VIGNETTIERUNG UND DER VERZEICHNUNG, LINKS: ORIGINALBILD, RECHTS: BILD MIT ENTFERNTER VIGNETTIERUNG UND VERZEICHNUNG	55
ABBILDUNG 4.8: HOMOLOGE PUNKTE IN DEN BILDERN ADAM_0001_MARGARETHEN UND ADAM_0002_MARGARETHEN	57
ABBILDUNG 4.9: VERKNÜPFUNGSPUNKTE ZWISCHEN BILD 1 UND BILD 8	58
ABBILDUNG 4.10: ANZAHL DER VERKNÜPFUNGSPUNKTE PRO LUFTBILD	58
ABBILDUNG 4.11: EINMESSUNG PASSPUNKTE IM GCP TOOL MIT DETAILFOTO PP 24	59
ABBILDUNG 4.12: BLOCKFILE TESTSZENARIO 3	60
ABBILDUNG 4.13: AUSZUG PROTOKOLL BÜNDELBLOCKAUSGLEICH TESTSZENARIO 3	61
ABBILDUNG 4.14: STATISTIK BILDKOORDINATEN DER PASS- UND VERKNÜPFUNGSPUNKTE TESTSZENARIO 3	62
ABBILDUNG 4.15: PLOT DER RESIDUEN DER GCPS, TESTSZENARIO 3	62
ABBILDUNG 4.16: MATCHINGKONZEPT	64
ABBILDUNG 4.17: AUSGANGSBILDER 13 (LINKS) UND 14 (RECHTS)	66
ABBILDUNG 4.18: EPIPOLAR REGISTRIERTE BILDER 13 AUF 14	66
ABBILDUNG 4.19: EPIPOLAR REGISTRIERTE BILDER 13 & 14	67
ABBILDUNG 4.20: DISPARITY MAP BILD 13 & 15, TESTSZENARIO 2	68
ABBILDUNG 4.21: DOM TESTSZENARIO 1	70
ABBILDUNG 5.1: EINMESSUNG DER BAUMWIPFEL MITTELS TERRESTRISCHER VERMESSUNG	72

ABBILDUNG 5.2: ÜBERSICHT EINGEMESSENE BAUMWIPFEL	72
ABBILDUNG 5.3: SUCHE NACH DEM LOKALEN MAXIMUMS INNERHALB EINER 5 x 5 MATRIX.....	74
ABBILDUNG 5.4: PLOT DER DIFFERENZEN DER ABSOLUTEN BAUMHÖHEN ALS "BAR-PLOT", TESTSZENARIO 2	75
ABBILDUNG 5.5: LINEARE REGRESSIONSGERADE, TESTSZENARIO 2, 12 & 6 BZW. 22	76
ABBILDUNG 5.6: RMS DER DIFFERENZEN	77
ABBILDUNG 5.7: SUBSET DOM MIT BILDÜBERLAPPUNGSBEREICH 62%, TESTSZENARIO 6	78
ABBILDUNG 5.8: SUBSET DOM MIT BILDÜBERLAPPUNGSBEREICH 82%, TESTSZENARIO 3	79
ABBILDUNG 5.9: SUBSET DOM MIT BILDÜBERLAPPUNGSBEREICH 93%, TESTSZENARIO 1	79
ABBILDUNG 5.10: EBENE (ROT) INNERHALB EINER ZELLE, QUELLE (STRAUB C. , 2011)	80
ABBILDUNG 5.11: PROFILE ENTLANG DER DIAGONALEN, PROFIL 1 ROT, PROFIL 2, GRÜN, PROFIL 3 BLAU	81
ABBILDUNG 5.12: PROFIL 1	81
ABBILDUNG 5.13: PROFIL 2	82
ABBILDUNG 5.14: PROFIL 3	82
ABBILDUNG 5.15: ORTHOPHOTOMOSAIK MIT AOI LAYER	84
ABBILDUNG 5.16: STANDARDABWEICHUNGEN VON DER EBENE [M] (93% BILDÜBERLAPPUNGSBEREICH)	84
ABBILDUNG 5.17: MITTELWERTE DER STANDARDABWEICHUNGEN DER HÖHENWERTE VON DER EBENE	86
ABBILDUNG 6.1: MITTLERE ABWEICHUNGEN DER DIFFERENZEN (MODELL - REFERENZ)	88
ABBILDUNG 6.2: STANDARDABWEICHUNGEN DER MITTELWERTE	88
ABBILDUNG 6.3: OBERFLÄCHENRAUIGKEITEN 62% BIS 93% BILDÜBERLAPPUNGSBEREICH, STEREOMATCHING.....	91
ABBILDUNG 6.4: GEGENÜBERSTELLUNG DER OBERFLÄCHENRAUIGKEITEN DER UNTERSCHIEDL. MATCHINGALGORITHMEN.....	92
ABBILDUNG 6.5: "LÖCHER" IM DIGITALEM OBERFLÄCHENMODELL TESTSZENARIO 13	93
ABBILDUNG 6.6: GEGENÜBERSTELLUNG DER OBERFLÄCHENRAUIGKEITEN DER DOM MIT 93% OVERLAP UND ALS.....	93
ABBILDUNG 6.7: GEGENÜBERSTELLUNG DER PROFILE AUS PHOTOGRAMMETRISCHEN DOMS UND DES ALS DOMS (SCHWARZ)	94
ABBILDUNG 7.1: ADAM-FLUGAUFNAHMEPLATTFORM AN CESSNA 182 SYKLINE	96

Tabellenverzeichnis

TABELLE 3.1: PROSILICA GE 4900C SPEZIFIKATIONEN - QUELLE: SIEHE (ALLIED VISION TECHNOLOGIES, 2010).....	36
TABELLE 3.2: GENAUIGKEITEN ALS MODELL.....	42
TABELLE 3.3: POLYGONZÜGE.....	42
TABELLE 3.4: ABSCHLUSSFEHLER DER ZÜGE IM LANDESKOORDINATENSYSTEM.....	43
TABELLE 3.5: STANDPUNKTE UND GPS LAUFZEITEN.....	44
TABELLE 3.6: PASSPUNKTE FÜR 7 PARAMETER TRANSFORMATION.....	44
TABELLE 3.7: KOORDINATENDIFFERENZEN NACH TRANSFORMATION.....	45
TABELLE 3.8: TRANSFORMATIONSPARAMETER.....	45
TABELLE 3.9: BESTIMMUNG DER GEOIDUNDULATION N.....	46
TABELLE 4.1: TESTSZENARIEN.....	49
TABELLE 4.2: AUFSETZGENAUIGKEITEN DER BLÖCKE DER TESTSZENARIEN.....	63
TABELLE 4.3: BILDER FÜR SEQUENTIELLES MATCHING.....	65
TABELLE 5.1: MITTLERE LAGEABWEICHUNG (MODELL - REFERENZ).....	74
TABELLE 5.2: OBERFLÄCHENRAUIGKEITEN DER ZELLEN.....	82
TABELLE 5.3: MITTLERE STANDARDABWEICHUNG DER HÖHENWERTE VON DER EBENE.....	85
TABELLE 7.1: BERECHNUNGSDAUER TIEPOINTS & MATCHING PRO BILDPAAR.....	98
TABELLE 7.2: BERECHNUNGSDAUER ERSTELLUNG EINES DOMS.....	98
TABELLE 7.3: VORGABE DER BODENAUFLÖSUNG, FLUGGESCHWINDIGKEIT IM MEDIUM 100 KNOTEN.....	99
TABELLE 7.4: VORGABE DER FLUGHÖHE, FLUGGESCHWINDIGKEIT IM MEDIUM 100 KNOTEN.....	99
TABELLE 7.5: VORGABE DER BODENAUFLÖSUNG, FLUGGESCHWINDIGKEIT IM MEDIUM 45 KNOTEN.....	99
TABELLE 7.6: VORGABE DER FLUGHÖHE, FLUGGESCHWINDIGKEIT IM MEDIUM 45 KNOTEN.....	99
TABELLE 7.7 VORGABE DER BODENAUFLÖSUNG, FLUGGESCHWINDIGKEIT IM MEDIUM 65 KNOTEN.....	100
TABELLE 7.8 VORGABE DER FLUGHÖHE, FLUGGESCHWINDIGKEIT IM MEDIUM 65 KNOTEN.....	100

1 Einleitung

Die Fernerkundung findet jahrelange Anwendung im Bereich des Umweltmonitorings. Aufgrund einschlägiger technischer Innovationen (siehe (Leberl, et al., 2010)) in der Datenakquise und in den Auswerteverfahren hat die Bedeutung der Fernerkundung in den letzten Jahren sehr stark zugenommen. Digitale Aufnahmesysteme, welche hochauflösende, hoch redundante Aufnahmen in unterschiedlichen Spektralbändern ermöglichen, und effiziente Auswertelgorithmen als Methoden zur Informationsgewinnung erweitern die Produktpalette und eröffnen dadurch einem größeren Anwenderkreis die Nutzung dieser Daten.

Digitale Luftbilder bringen im Bereich der Forstinventur einige Vorteile mit sich. Damit ist es möglich, Waldbestandsparameter wie Baumart, Verteilung der Altersklassen, Baumhöhen und vertikale Strukturen oder auch die ertragskundlichen Parameter wie Holzzuwachs, Biomasse und Oberhöhe und die Zusammensetzung und räumliche Verteilung dieser Parameter berührungslos zu bestimmen (Schardt, 2008). Dafür werden einerseits digitale Orthophotos im optischen und nahen Infrarotbereich und andererseits daraus abgeleitete digitale Geländemodelle und Kronenoberflächenmodelle benötigt. Des Weiteren können diese Produkte georeferenziert werden, d.h. die Zuordnung räumlicher Informationen zum Datensatz, und in geographische Informationssysteme einbezogen werden.

Die Nachteile dieser digitalen Auf- und Auswertetechnik sind die erheblichen Datenmengen, welche erzeugt werden, einerseits bei der Datenaufnahme im Flug und andererseits bei der Auswertung dieser Daten. Um Produkte wie Orthophotos oder digitale Oberflächenmodelle schnell aus den Bilddaten ableiten zu können, werden eine hohe Rechenleistung und ein hoher Speicheraufwand benötigt. Deshalb ist es von großer Bedeutung, eine genaue Planung der Aufnahme vor der Befliegung durchzuführen, um bei einer geforderten Genauigkeit den Aufwand so gering wie möglich zu halten (Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten, 2012). Die Parameter, welche für jede Aufnahme zu definieren sind, sind zum einen die benötigte geometrische Auflösung und die Brennweite der Messkamera, welche die Flughöhe und das abgedeckte Gebiet am Boden definieren. Zum anderen wird über die Geschwindigkeit des Flugobjektes und dem Aufnahmeintervall der Bildüberlappungsbereich der Bilder in Flugrichtung und über die Wahl der Flugstreifenbreite der seitliche Overlap festgelegt.

Bis dato wurden für Waldinventuren Laserscanner-Daten als Grundlage herangezogen. In diesen digitalen Oberflächenmodellen (DOM) werden einzelne Bäume am besten aufgelöst (Schardt, 2008). In (Straub & Seitz, 2012) wurden jedoch auf Basis von Stereo-Luftbildern gezeigt, dass optische Daten für den Forstbereich und für die Verwendung von Forstinventuren verwendet werden können. Die wesentlichen Vorteile von optischen Daten gegenüber ALS-Daten sind die geringeren Kosten für die Befliegung und die regelmäßig durchgeführten Neuaufnahmen von Luftbildern z.B. durch das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV- Neubefliegung im 3 Jahreszyklus). Daher entstehen keine neuen Kosten für die Forstverwaltung, da die benötigten Luftbilder für Forstinventuren bereits zur Verfügung stehen und nicht neu aufgenommen werden müssen.

1.1 Problemdefinition

In (Leberl, et al., 2010) wurden die technischen Innovationen in der modernen digitalen Photogrammetrie erläutert. Diese sind die kostenlose Steigerung des Bildüberlappungsbereiches bei digitalen Aufnahmen, die verbesserte radiometrische Auflösung der Aufnahmen, das sogenannte „multi-view matching“ sowie die „Graphics Processing Unit“, kurz GPU. Aufgrund dieser Erneuerungen ist es nun möglich, komplexe photogrammetrische Algorithmen in der Praxis zu verwenden, um 3D Punktwolken auf sub-Pixel Niveau zu generieren (Leberl, et al., 2010).

Diese Masterarbeit setzt sich mit einer dieser zuvor genannten Innovationen und der sich daraus ergebenden Möglichkeiten auseinander, nämlich mit der kostenlosen Steigerung des Bildüberlappungsbereiches durch digitale Aufnahmesysteme.

Bei analogen Messkameras verursachte jedes zusätzlich aufgenommene Bild Kosten für die Entwicklung im Labor und anschließend musste ein weiteres Stereomodell manuell bearbeitet werden. Deshalb wurde früher im Zeitalter der analogen Photogrammetrie nur ein Stereomodell verwendet, um einen 3D Oberflächenpunkt anhand vom Schnitt zweier Projektionsstrahlen zu bestimmen. Jedoch entfällt dieser limitierende Faktor beim Übergang zur digitalen Photogrammetrie. Bilder können, ohne weitere Kosten bei der Erstellung zu verursachen, aufgenommen werden (Leberl, et al., 2010). Der enorme daraus resultierende Vorteil besteht darin, dass nun Datensätze mit extrem hohen

Bildüberlappungsbereichen erstellt werden können. Dies bedeutet, dass bei einem Bildüberlappungsbereich in Flugrichtung von 80% ein Objektpunkt in acht Bildern vorhanden ist. Aufgrund des hoch redundanten Datensatzes hat der gesamte Block eine starrere Struktur im Vergleich zu einer Aufnahmekonstellation mit weniger starken Überlappungsbereichen. Dadurch werden auch die Einflüsse von systematischen Fehlern verringert (Kraus, 2004) und zusätzlich werden durch den starken Bildüberlappungsbereich bessere Ergebnisse beim Image Matching erzielt. Deshalb müssen einerseits weniger Passpunkte am Boden eingemessen werden und andererseits wird die geometrische Genauigkeit erhöht.

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, ein Konzept für die Ableitung einer idealen Aufnahmekonstellation zur Berechnung von digitalen Oberflächenmodellen aus hoch redundanten Luftbilddatensätzen im Forstbereich zu entwickeln. Dabei sollen aus einem hoch redundanten Bilddatensatz (Bildüberlappungsbereich 93% in Flugrichtung) verschiedene Aufnahmekonstellationen, in Abhängigkeit des Bildüberlappungsbereiches, für ein bewaldetes Gebiet getestet werden. Anschließend wird für jedes Szenario ein digitales Oberflächenmodell erzeugt und die Genauigkeit dieser Modelle miteinander verglichen. Daraus soll jene Aufnahmegeometrie gefunden werden, welche das Kronendach des Waldgebietes bestmöglich rekonstruiert.

Diese Konzept soll als Leitfaden für Befliegungen und die Berechnung von digitalen Oberflächenmodellen in Forstgebieten mit der ADAM (Airborne Data Acquisition and Mapping) Plattform dienen.

1.2 Stand des Wissens

1.2.1 Historischer Hintergrund

Die Informationen zu diesem Unterkapitel wurden an das Kapitel 5.5 aus (Kaufmann, 2011) angelehnt:

In Österreich geht die Stereoauswertung von Luftbildern auf das Jahr 1911 zurück, als am Militärgeographischen Institut in Wien der Stereoautograph entwickelt wurde. Stereoauswertegeräte dienten zur Kartierung von räumlichen Objekten aus einem Stereobildpaar.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts brach das Zeitalter der Analogauswertegeräte an. Diese wurden dann von den analytischen Auswertegeräte abgelöst. Der Unterschied zwischen den Auswertegeräten lag in der Herstellung des perspektivischen Zusammenhangs zwischen Bild- und Objektkoordinaten. Bei den analytischen Geräten erfolgte dies rechnerisch.

Die nächste Gruppe von Stereoauswertegeräten waren digitale photogrammetrische Arbeitsstationen. Dabei wurden analoge Bilder digitalisiert, an einem Stereomonitor dargestellt und digital verschoben. Die ersten Konzepte für diese Generation der Auswertegeräte gehen in die Jahre 1981/1982 zurück. Aus diesen DPAS (digitale photogrammetrische Arbeitsstationen) entwickelten sich die heutigen Softwareprodukte, welche in der Photogrammetrie verwendet werden.

1.2.2 „State of the art“ Software- und Hardwareprodukte

Derzeit existiert eine Vielzahl an photogrammetrischen Softwareprodukten. Auf der Webseite <http://www.photogrammetry-software.com> wird ein Überblick über kommerzielle Produkte und den Funktionsumfang der verschiedenen Softwarepakete gegeben. Für die Auswertung von Luftbildern und die Erstellung von digitalen Oberflächenmodellen würden folgende Produkte in Frage kommen:

- Geospatial data production solution (Intergraph)
- Leica Photogrammetry Suite (LPS)
- INPHO (Trimble)
- PHOTOMOD (Racurs)

Ähnlich wie bei den Softwareprodukten erfolgte auch bei der Hardware der Einzug des digitalen Zeitalters in die Photogrammetrie. Analoge Messkameras wurden durch digitale großformatige Aufnahmesysteme ersetzt. Ein daraus resultierender Vorteil ist u.a. die verbesserte Bildqualität (Paparoditis et. al, 2006).

Namhafte Produkte sind:

- UltraCam XP (Vexcel Imaging GmbH, a Microsoft company)
- ADS80 (Leica)
- Z/I II Camera Series (Hexagon Group)

Durch die Umstellung auf die digitale Datenakquise ergaben sich auch im Bereich der Datenauswertung neue Konzepte – zum Beispiel für die Ableitung von digitalen dreidimensionalen Oberflächenmodellen durch erweiterte Matching-Ansätze.

So können aufgrund der in Kapitel 1.1 beschriebenen kostenlosen Steigerung des Bildüberlappungsbereiches können bei Luftbildaufnahmen höhere Bildüberlappungsbereiche in und quer zur Flugrichtung geflogen werden. In Kapitel 3.7.1 in (Kraus, 2004) werden dafür für die Längsüberdeckung 60% und für die Querüberdeckung 25-30% angegeben. Diese beziehen sich jedoch noch auf die analoge Photogrammetrie. In neuerer Literatur, wie zum Beispiel (Mikhail et al. 2011), wird dazu übergegangen, den Überlappungsbereich in Flugrichtung mit 80% und mehr und die Überdeckung von benachbarten Flugstreifen mit 40% anzugeben. Auch beim Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) werden seit 2010 digitale Aufnahmen erzeugt. Die Minimalanforderungen für Längs- und Querüberdeckung sind ebenfalls mindestens 80% bzw. 40%.

Aus der mehrfachen Abdeckung desselben Gebietes durch eine Vielzahl von digitalen Luftbildern können auch neue Matchingansätze verfolgt werden. In (Zhang & Gruen, 2006) wird ein „multi-image Matching“-Ansatz für die Erstellung von digitalen Oberflächenmodellen aus Satellitenbildern vorgestellt. Dieser Ansatz wurde in (Baltsavias et al. 2008) aufgegriffen und für die Erstellung von 3D Baummodellen erweitert. Diese Methode basiert auf einem simultanen Matching aller zur Verfügung stehenden Bilder und verlangt deshalb hohe Bildüberlappungsbereiche für Längs- und Querüberdeckung. Beide Matchingverfahren basieren auf jenem von (Gruen & Zhang, 2003). Des Weiteren wird in (Hirschmüller, 2008) ein „Multibaseline Matching“-Algorithmus für digitale Luftbilder präsentiert, bei welchem die Berechnung der Disparität für einen Bildpunkt aus allen zur Verfügung stehenden Bildern erfolgt. Dieser Matcher wurde in dieser Masterarbeit verwendet (siehe Kapitel 4.7.2). Der enorme Vorteil, der aus dem Multi-Image Matching im Vergleich zum Stereomatching resultiert, liegt in der Steigerung der geometrischen Genauigkeit, in der Robustheit des Blockes und in den besseren Matching-Ergebnissen und wurde bereits bei der Problemdefinition (Kapitel 1.1) genauer erläutert.

1.3 Struktur der Arbeit

Im ersten Kapitel erfolgte ein kurzer Überblick über den Nutzen von Fernerkundungsdaten in der Forstwirtschaft sowie eine Erklärung der Aufgabenstellung und Zielsetzung dieser Masterarbeit. Es wird auf technische Innovationen eingegangen, welche neue Aufnahme- und Auswerteverfahren in der Photogrammetrie ermöglichen. Zusätzlich wird in diesem Kapitel auch der aktuelle Stand des Wissens erläutert. Neben den gängigen kommerziellen Softwareprodukten wird auch der aktuelle Stand der Forschung im Bereich des Matchings dargestellt. Darüber hinaus wird der Begriff des Bildüberlappungsbereiches erläutert und es werden Beispiele zu den analogen und in der heutigen, digitalen Photogrammetrie verwendeten Überlappungsbereichen erwähnt.

Das Kapitel 2 widmet sich den photogrammetrischen Grundlagen, welche für die Durchführung der Masterarbeit benötigt wurden. Dabei wird näher auf die inneren und äußeren Orientierungsparameter eingegangen und die verwendeten Algorithmen für das Matching bzw. für das automatische Finden von homologen Punkten werden beschrieben.

Die Datengrundlagen sind Bestandteil von Kapitel 3. Hier erfolgt eine genaue Beschreibung der Daten, welche dieser Masterarbeit zu Grunde liegen. Im Speziellen sind dies die Luftbilder und deren Metadaten, die Bestimmung der Passpunkte und die Laserscanner-Daten, welche für einen Vergleich herangezogen wurden. Zusätzlich wird in diesem Abschnitt auch das Testgebiet beschrieben.

Kapitel 4 beschreibt die Durchführung und definiert und erläutert die verschiedenen Testszenarios. Des Weiteren werden sämtliche Arbeitspakete dieser Masterarbeit, wie die Datenvorverarbeitung, das Einmessen der Pass- und Verknüpfungspunkte, die Bündelblockausgleichung, das Matching und der räumliche Vorwärtsschnitt beschrieben.

Die Validierung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5. Die berechneten digitalen Oberflächenmodelle werden anhand von Referenzmessungen und einem modellbasierten Ansatz evaluiert und in Kapitel 6 diskutiert. Aus den Resultaten dieses Arbeitsschrittes wird in Kapitel 7 ein Konzept für die Aufnahmekonstellation von Luftbildverbänden im Forstbereich abgeleitet.

Im letzten Abschnitt werden alle durchgeführten Arbeiten und Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick für weitere Untersuchungen gegeben.

2 Photogrammetrische Grundlagen

2.1 Kalibrierung der Messkamera – innere Orientierung

2.1.1 Geometrische Kalibrierung

Bei der geometrischen Kalibrierung der Messkamera werden die inneren Orientierungsparameter der Kamera bestimmt. Diese kameraspezifischen Größen bestimmen die interne Geometrie eines Sensors zum Zeitpunkt der Aufnahme. Diese Parameter werden benötigt, um die systematischen Fehlereinflüsse in den Rohbilddaten zu korrigieren und im Anschluss das Strahlenbündel der Aufnahme zu rekonstruieren (Kraus, 2004).

Die inneren Orientierungsparameter sind:

- Lage des Autokollimationshauptpunktes H_A im Bildkoordinatensystem
- Brennweite c
- Verzeichnung Δr

Die Bezugsachse der Photogrammetrie ist ein kalibrierter Hauptstrahl HS_A . Dieser trifft objektseitig senkrecht auf die Bildebene und verläuft durch die Mitte der Eintrittspupille. Wird der Hauptstrahl physikalisch verlängert, so durchstößt er die Bildebene im Autokollimationshauptpunkt H_A . Bei digitalen Messkameras wird H_A immer in Bezug auf das Bildkoordinatensystem angegeben. τ definiert die Eintrittswinkel zwischen dem Hauptstrahl HS_A und den Objektpunkten in der Mitte der Eintrittspupille. Der Eintrittswinkel eines Lichtstrahls in der Mitte der Eintrittspupille (objektseitig) ist ungleich dem Austrittswinkel τ' (bildseitig) aufgrund von asymmetrisch aufgebauten Linsen oder asymmetrisch angebrachten Blenden - $\tau \neq \tau'$. Die unterschiedlichen Ein- und Ausfallwinkel führen zur radial-symmetrischen Objektivverzeichnung (Kraus, 2004).

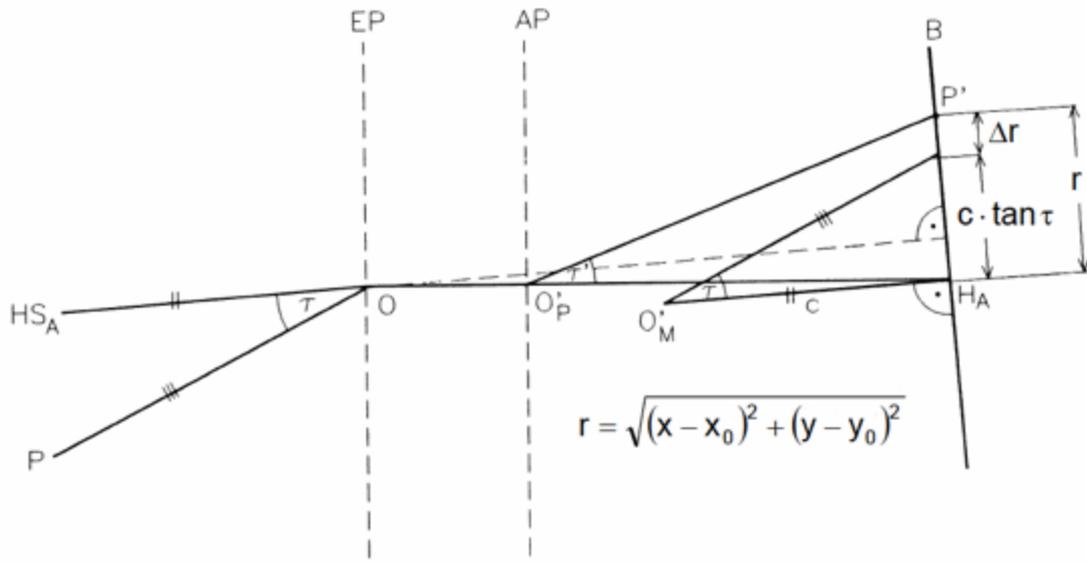


Abbildung 2.1: Verzeichnung, Quelle: (Kaufmann, 2011) Kapitel 3

In der Photogrammetrie hat sich ein Ansatz etabliert, bei welchem die dreidimensionale Lage des Projektionszentrums bildseitig durch Kalibrierung bestimmt wird:

„Es wird ein mathematisches Projektionszentrum O_M' derart (Abbildung 2.1) definiert, dass es im Abstand c der Kamerakonstanten senkrecht vor dem Autokollimationshauptpunkt H_A liegt und die Winkel τ auch bildseitig möglichst gut realisiert. Restfehler führen zur optischen Verzeichnung Δ_r “, siehe (Kraus, 2004).

Die Gleichung der inneren Orientierung lautet:

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (2.1)$$

$$r = c \cdot \tan \tau + \Delta_r \quad (2.2)$$

Die Verzeichnung wird in zwei Teile unterteilt; einerseits in die radial-symmetrische Verzeichnung und andererseits in die radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnung.

Die radial-symmetrische Verzeichnung ist der radiale Abstand eines Bildpunktes von seiner theoretischen Position, was mit einer Änderung im Winkel zwischen dem Hauptstrahl und dem Strahl des Objektpunktes im Bildraum gleichzusetzen ist.

In *Abbildung 2.2* ist die Verzeichnungskurve der Prosilica GE4900C dargestellt. Die Kalibrierung erfolgte am Institut DIGITAL (Joanneum Research). Dabei ist auf der Horizontalachse der radiale Abstand vom Hauptpunkt aufgetragen und in der Vertikalachse die Verzeichnung in Mikrometer.

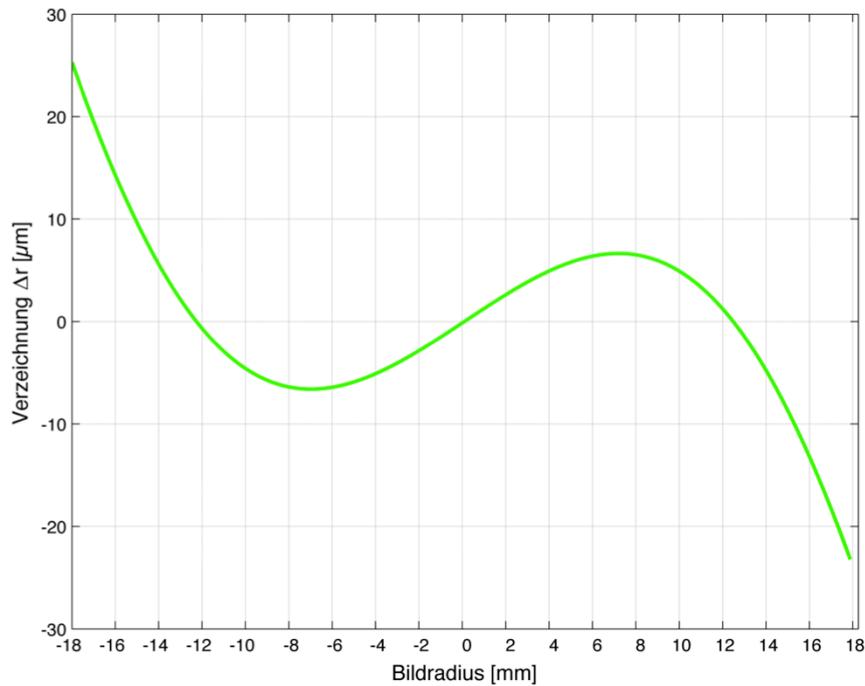


Abbildung 2.2: Verzeichnungskurve Prosilica GE4900C

Die radiale Verzeichnung wird als Polynom angegeben:

$$\Delta r_{rad} = K_1 \cdot r^3 + K_2 \cdot r^5 + K_3 \cdot r^7 + \dots \quad (2.4)$$

$$\Delta x_{rad} = \bar{x} \cdot \frac{\Delta r_{rad}}{r} \quad \Delta y_{rad} = \bar{y} \cdot \frac{\Delta r_{rad}}{r} \quad (2.5)$$

Die radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnung ist auf die Dezentrierung der Linien im Objektiv zurückzuführen. Der Einfluss gegenüber der radial-symmetrischen Verzeichnung bei Messkameras ist deutlich geringer (Luhmann, 2010).

Folgender Ansatz (nach Brown) kann für die Modellierung verwendet werden (Formel aus (Kaufmann, Bildmessung, 2010)):

$$\Delta x_{tan} = P_1 \cdot (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2 \cdot \bar{x} \cdot \bar{y} \quad (2.6)$$

$$\Delta y_{tan} = P_2 \cdot (r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1 \cdot \bar{x} \cdot \bar{y} \quad (2.7)$$

Die Bildfehler beschreibenden Funktionen lauten somit:

Auf den Hauptpunkt bezogene Koordinaten:

$$x^0 = x - x_0 \quad (2.8)$$

$$y^0 = y - y_0 \quad (2.9)$$

Bildfehler:

$$\Delta x = \Delta x_{rad} + \Delta x_{tan} \quad (2.10)$$

$$\Delta y = \Delta y_{rad} + \Delta y_{tan} \quad (2.11)$$

Korrigierte Bildkoordinaten:

$$\bar{x} = x^0 - \Delta x \quad (2.12)$$

$$\bar{y} = y^0 - \Delta y \quad (2.13)$$

2.1.2 Vignettierung und Lichtabfall

Die Stärke der Strahlung ist in der Bildmitte einer Aufnahme am größten und nimmt mit zunehmendem Abstand von der Bildmitte zu den Bildrändern hin ab. Dieser radiale Lichtabfall in einem Linsensystem ist geometrischer Natur und wird mit dem \cos^4 -Gesetz beschrieben (Herleitung siehe (Lottmann, 2000)):

$$I' = I \cdot (\cos \tau)^4 \quad (2.13)$$

Die Helligkeitsabnahme wird mit geringerer Brennweite, zum Beispiel bei Weitwinkel- und Fisheyeobjektiven, verstärkt. Dies ist in *Abbildung 2.3* dargestellt.

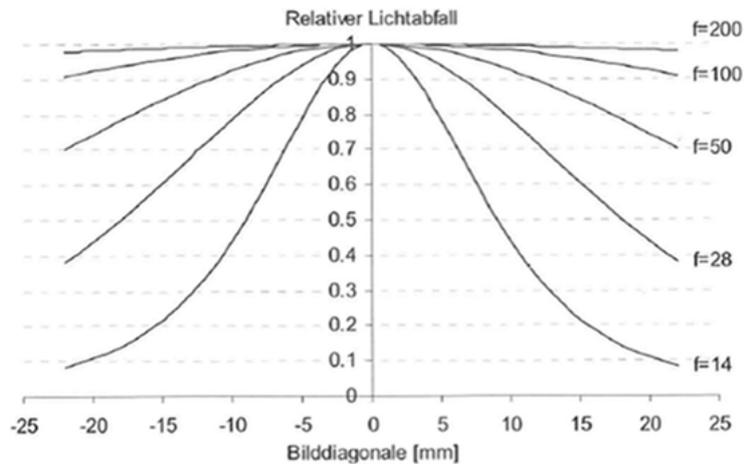


Abbildung 2.3: Relativer Lichtabfall zum Bildrand, Quelle. (Luhmann, 2010) Kapitel 3.1.3.6

Der Lichtabfall zum Rand hin wird noch durch die Vignettierung überlagert. Die Vignettierung entsteht durch die Abschattung der Strahlen durch die Objektivfassung bei großen Bildwinkeln. Dadurch wird die Abnahme der Strahlung zum Bildrand hin zusätzlich verstärkt (Luhmann, 2010).

Um die Helligkeitsabnahme korrigieren zu können, muss eine radiometrische Kalibrierung durchgeführt werden. Es wird ein digitales Kalibrierungsbild erzeugt, welches die Korrekturwerte pro Bildkanal enthält (siehe Kapitel 4.3.2). Wird diese Korrektur nicht durchgeführt, kann dies zu Fehlern beim Matching führen, welche sich bei der Berechnung des digitalen Oberflächenmodells auswirken.

2.2 Das Strahlenbündel

Die Theorie zu Kapitel 2.2 wurde an Kapitel 2.3 (Kaufmann, 2011) angelehnt:

Für die geometrische Beziehung zwischen dem Objektraum und dem Bildraum dient als mathematisches Modell in der Photogrammetrie die zentralprojektive Abbildung durch Strahlenbündel. Die Abweichungen zwischen der Modellvorstellung und den physikalischen Gegebenheiten sind jedoch zu berücksichtigen.

Die Elemente der äußeren Orientierung, die Lage des Projektionszentrums X_o und die Einheitsvektoren i, j, k des Kamerasystems, ausgedrückt in Parametern des Objektkoordinatensystems, sind die geometrischen Größen zur Beschreibung der Lage der Messkamera im Objektkoordinatensystem. Die äußere Orientierung besteht demnach aus sechs Parametern. Zusätzlich werden dafür noch die inneren Orientierungsparameter $(x_0, y_0, c; \Delta r)$ benötigt.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa & \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix}$$

ω, φ, κ Quer-, Längsneigung, Kantung (=3 Drehwinkel)

2.3 Grundgleichungen der Photogrammetrie

Die Theorie zu Kapitel 2.3 wurde an Kapitel 2.3.2 (Kaufmann, 2011) angelehnt:

Aus den Elementen der in Kapitel 2.2 beschriebenen äußeren Orientierung und *Abbildung* 2.4 ist die sogenannte **Kollinearitätsbedingung** abzuleiten:

$$\mathbf{X} - \mathbf{X}_0 = \lambda \mathbf{p} \quad (2.15)$$

Diese Bedingung zeigt, dass der Vektor $\mathbf{X} - \mathbf{X}_0$ von einem Objektpunkt \mathbf{X} zum Projektionszentrum \mathbf{X}_0 mit dem Produkt aus Projektionsstrahl \mathbf{p} und einem skalaren Streckungsfaktor λ verknüpft ist.

Ausgehend von der Kollinearitätsbedingung können nun die **Projektionsgleichung** und die **Abbildungsgleichung** abgeleitet werden.

Für die Rekonstruktion (Projektionsgleichung) wird in die Kollinearitätsgleichung die Gleichung des Projektionsstrahls $\mathbf{p} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}$ eingesetzt. Somit entsteht:

$$(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) = \lambda \mathbf{R} \mathbf{x} = \lambda \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

und daraus die Projektionsgleichungen:

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{i_1(x - x_0) + j_1(x - x_0) - k_1c}{i_3(x - x_0) + j_3(x - x_0) - k_3c} \quad (2.17)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{i_2(x - x_0) + j_2(x - x_0) - k_2c}{i_3(x - x_0) + j_3(x - x_0) - k_3c} \quad (2.18)$$

Die Umkehrung zur Projektionsgleichung ist die Abbildungsgleichung:

$$\lambda \mathbf{x} = \mathbf{R}^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \quad (2.19)$$

aus welcher die Gleichungen für die x- und y-Komponente im Bildraum hervorgehen:

$$x = x_0 - c \frac{i_1(X - X_0) + i_2(Y - Y_0) + i_3(Z - Z_0)}{k_1(X - X_0) + k_2(Y - Y_0) + k_3(Z - Z_0)} \quad (2.20)$$

$$y = y_0 - c \frac{j_1(X - X_0) + j_2(Y - Y_0) + j_3(Z - Z_0)}{k_1(X - X_0) + k_2(Y - Y_0) + k_3(Z - Z_0)} \quad (2.21)$$

Aus den Abbildungsgleichungen geht hervor, dass zu jedem Objektpunkt genau ein Bildpunkt existiert. Hingegen gehören bei den Projektionsgleichungen zu einem Bildpunkt unendlich viele Objektpunkte, weshalb sich aus einer Photographie kein räumliches Objekt rekonstruieren lässt. Dafür ist mindestens ein zweites Messbild oder die Zusatzinformation über die Z-Komponenten erforderlich.

Des Weiteren ist an dieser Stelle auch die Bedeutung der Grundgleichung der Photogrammetrie zu erwähnen. Auf der linken Seite der Gleichung stehen die beobachteten Messgrößen, die Bildkoordinaten, als Funktion der Unbekannten auf der rechten Seite. Somit eignen sich diese Formeln als Beobachtungsgleichungen für die überbestimmte Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen was bei räumlichen Vorwärtsschnitten, räumlichen Rückwärtsschnitten und bei der Bündelblockausgleichung Anwendung findet.

2.4 Äußere Orientierung

2.4.1 Räumlicher Rückwärtsschnitt

Die Theorie zu Kapitel 2.4.1 wurde an Kapitel 4.3.1 (Kaufmann, 2011) angelehnt:

Unter dem räumlichen Rückwärtsschnitt wird die Orientierung eines Einzelbildes verstanden beim welchem die äußeren Orientierungsparameter (siehe Kapitel 2.2) ermittelt werden. Die Berechnung der Orientierungsparameter erfolgt auf Basis des Strahlenbündels.

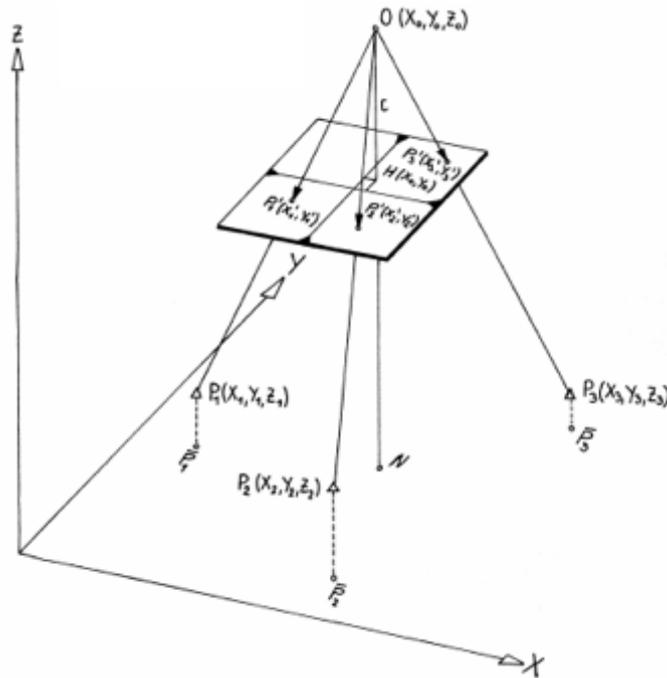


Abbildung 2.5: Räumlicher Rückwärtsschnitt, Quelle: (Kaufmann, 2011) Kapitel 4.3.1

Die Berechnung der Orientierungsparameter basierend auf der Strahlenbündelmethode ist ein Sonderfall der Bündelblockausgleichung (siehe Kapitel 2.4.2), da die Berechnung für nur ein Messbild durchgeführt wird. Ausgehend von den Bildkoordinaten werden dabei die Position des Projektionszentrum \mathbf{X}_0 und die Ausrichtung der Messkamera \mathbf{R} bestimmt. Als funktionales Modell dienen die Abbildungsgleichungen, welche die Kollinearitätsbedingung (siehe Kapitel 2.3) erfüllen:

$$x = x_0 - c \frac{(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \cdot \mathbf{i}}{(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \cdot \mathbf{k}} \quad (2.22)$$

$$y = y_0 - c \frac{(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \cdot \mathbf{j}}{(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \cdot \mathbf{k}} \quad (2.23)$$

Als Beobachtung fungieren die gemessenen Bildkoordinaten der Passpunkte. Die Unbekannten sind die Elemente der äußeren Orientierung (bei vorausgesetzter bekannter innerer Orientierung):

$$x = f(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa; x_0, c; X, Y, Z) \quad (2.24)$$

$$y = g(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa; x_0, c; X, Y, Z) \quad (2.25)$$

Aus Formel 2.24 und 2.25 geht hervor, dass insgesamt sechs Unbekannte zu berechnen sind. Dafür werden mindestens drei Passpunkte (2D) benötigt. Liegen mehr als drei Passpunkte vor, muss das lineare Gleichungssystem durch Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen gelöst werden. Dafür müssen Gleichung 2.22 und Gleichung 2.23 durch eine Taylorreihenentwicklung an den Näherungswerten der Unbekannten linearisiert werden. Pro Bildpunkt erhält man zwei linearisierte Verbesserungsgleichungen:

$$x + v_x = (x) + dx \quad (2.26)$$

$$y + v_y = (y) + dy \quad (2.27)$$

Die Ausgleichung erfolgt nach dem Gauß'schen Minimumsprinzip ($L_2 - Norm$): $\sum v^2 \stackrel{\text{def}}{=} \min$. Als Ergebnis erhält man die Zuschläge zu den Näherungswerten. Die Berechnung erfolgt iterativ, bis eine maximale Anzahl von Iterationen durchlaufen ist oder bis ein definierter Schwellwert für $d\mathbf{X}_0$ und $d\mathbf{R}$ unterschritten wurde.

2.4.2 Bündelblockausgleichung

Die Theorie zu Kapitel 2.4.2 wurde an Kapitel 6.2.2 (Kaufmann, 2011) angelehnt:

Bei der Bündelblockausgleichung kommt es zu einer Verkettung räumlicher Rückwärtsschnitte (siehe Kapitel 2.4.1). Dabei werden die äußeren Orientierungselemente, \mathbf{X}_0 und \mathbf{R} , simultan für alle Bilder eines Blockes rechnerisch bestimmt. Dies bedeutet, dass unter der Berücksichtigung von Bildkoordinaten, durch geodätisch bestimmte Passpunkte eines übergeordneten Koordinatensystems, eine rechnerische Einpassung der einzelnen Bilder erfolgt.

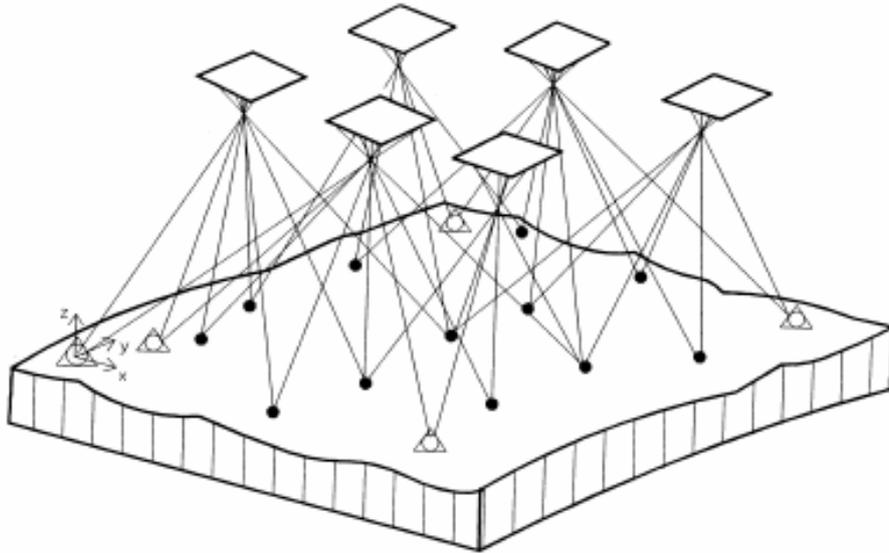


Abbildung 2.6: Bündelblockausgleichung, Quelle: (Kaufmann, 2011) Kapitel 6.2.2

Die Grundeinheit des Bündelblockausgleichs ist erneut das Strahlenbündel, welches mathematisch durch die photogrammetrische Abbildungsgleichung (siehe Kapitel 2.3) definiert ist.

Bei der Bündelblockausgleichung werden die einzelnen Bilder (Strahlenbündel) zu einem gesamten Modell verknüpft. Des Weiteren wird über Passpunkte der Bezug zu einem übergeordneten Koordinatensystem hergestellt. Dadurch ist es möglich, Objekte dreidimensional zu rekonstruieren. Das Ziel der Bündelblockausgleichung ist es, die Elemente der äußeren Orientierung für jedes Luftbild und die Koordinaten der Verknüpfungspunkte und der Neupunkte gemeinsam zu bestimmen.

Für eine Bündeltriangulation im Luftbildfall werden die Bilder in Streifen oder in blockförmiger Struktur aufgenommen (siehe *Abbildung 2.6*). Dabei sollte zumindest ein 60% Bildüberlappungsbereich in Flugrichtung und ein Querüberdeckungsbereich von mindestens 20% angestrebt werden.

Der Datenfluss für die Bündelblockausgleichung ist in *Abbildung 2.7* dargestellt.

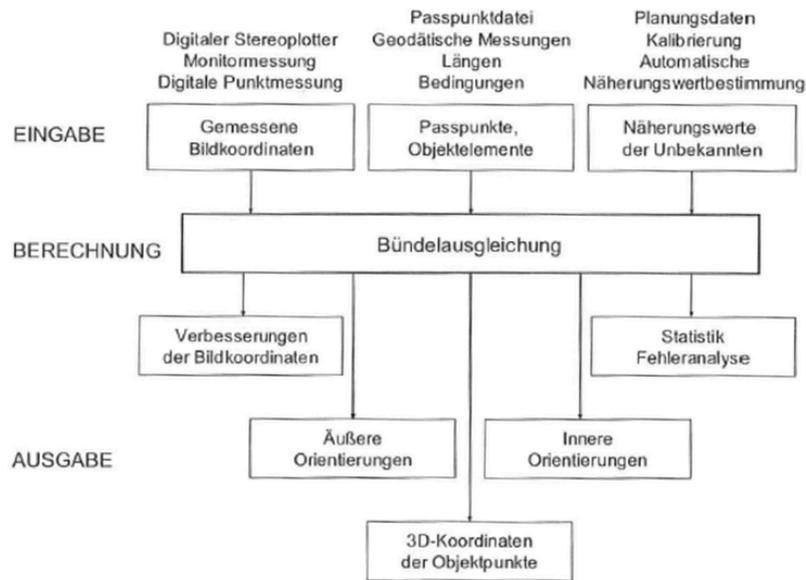


Abbildung 2.7: Datenfluss Bündelblockausgleichung, Quelle: (Luhmann, 2010) 4.4.1.3

Das funktionale Modell für die Mehrbildorientierung stellen ebenfalls die Abbildungsgleichungen (Formel 2.20 und 2.21) dar. Wie bereits in Kapitel 2.4.1 erwähnt, müssen diese Gleichungen linearisiert werden, weshalb für die Berechnung des Ausgleiches Näherungswerte für die Unbekannten benötigt werden.

Die Linearisierung erfolgt hier nach der Notation von Prof. K. Rinner:

$$dx = dx_0 + \frac{x - x_0}{c} dc + u_{11}(dX_0 - dX) + u_{12}(dY_0 - dY) + u_{13}(dZ_0 - dZ) + v_{11}d\omega + v_{12}d\varphi + v_{13}d\kappa \quad (2.28)$$

$$dy = dy_0 + \frac{y - y_0}{c} dc + u_{21}(dX_0 - dX) + u_{22}(dY_0 - dY) + u_{23}(dZ_0 - dZ) + v_{21}d\omega + v_{22}d\varphi + v_{23}d\kappa \quad (2.29)$$

Die Ausgleichung erfolgt, gleich wie bei einem einzelnen Bild, nach der Methode der kleinsten Quadrate (L_2 -Norm). Die unbekanntenen Größen sind die Zuschläge zu den Näherungswerten:

$$dx_0, dy_0, dc; dX_0, dY_0, dZ_0; d\omega_0, d\varphi_0, d\kappa_0; dX_N, dY_N, dZ_N$$

Für die Beschaffung von Näherungswerten werden heutzutage GPS (Global Positioning System) Sensoren und eine IMU (Inertia Measurement Unit) während des Bildfluges mitgeführt. Aufgrund von den Messungen von GPS und IMU ist es möglich, die Position und die Ausrichtung der Kamera für die Aufnahmeorte zu bestimmen.

Des Weiteren können auch noch zusätzliche Parameter in die Abbildungsgleichung der Zentralprojektion eingeführt werden. Damit können systematische Abbildungsfehler

modelliert werden und man spricht dann von einer sogenannten Simultankalibrierung. Dafür müssen die Kollinearitätsgleichungen um die systematischen Fehler erweitert werden. Dies wurde jedoch bei dieser Arbeit nicht angewandt und deshalb wird auf diese Thematik nicht weiter eingegangen.

2.5 Matching

Beim Image matching werden idente Objektmerkmale in zwei oder mehreren Bildern identifiziert und anschließend einander eindeutig zugeordnet. Ausgehend von einem Pixel in einem Referenzbild wird in einem Suchbild nach dem Pixel mit der größten Korrespondenz gesucht. Dies wird u.a. für die Identifikation von homologen Bildmustern zur 3D-Oberflächenrekonstruktion und für die automatische Suche nach Verknüpfungspunkten benötigt (Luhmann, 2010).

Bei dieser Masterarbeit wurde das Matching mit Hilfe der Software RSG (siehe Kapitel 4) ausgeführt. Der Workflow ist in *Abbildung 2.8* dargestellt. Des Weiteren wurde ein hierarchisch aufgebautes Bildzuordnungsverfahren (Feature-Matching) verwendet.

Dabei beginnt die Suche nach homologer Information an der obersten Ebene der Bildpyramide und wird anschließend in den nächsten Layern fortgesetzt. Die Ergebnisse einer Ebene werden als Eingangsinformation für den nächsten Layer verwendet, bis das Verfahren an der tiefsten Stufe der Bildpyramide angekommen ist ((Kaufmann, 2010) Kapitel 8.1).

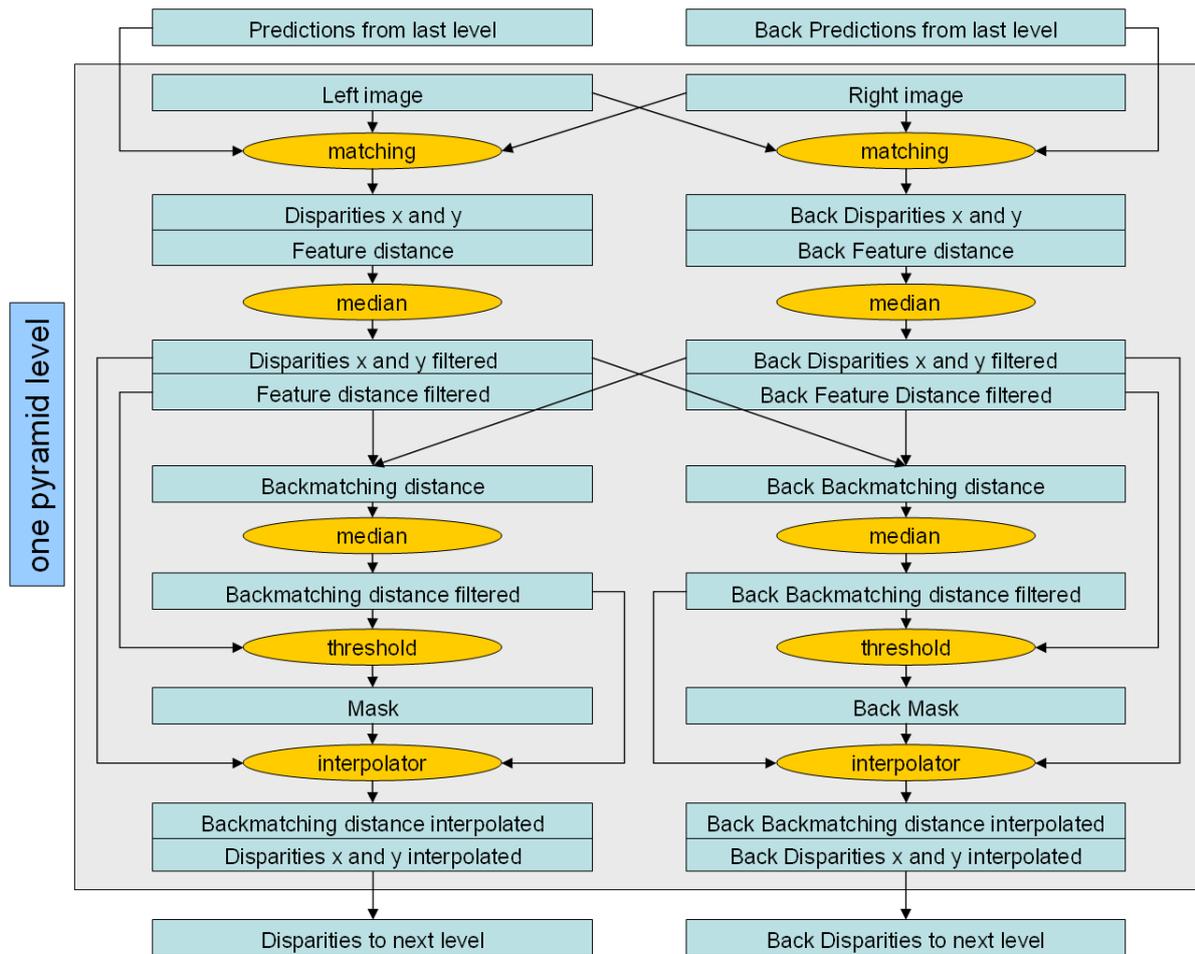


Abbildung 2.8: Workflow Matching RSG

Wie bereits erwähnt, handelt es sich dabei um einen hierarchischen Ansatz. Das bedeutet, dass die in *Abbildung 2.8* gezeigten Prozesse pro Bildpyramidenlevel angewendet werden. Der Vorteil besteht darin, dass das Bild in geringeren Auflösungen gespeichert wird (*Abbildung 2.9*). Somit wird die Datenmenge eines Bildes verkleinert. Dadurch können die Bilder in reduzierten Auflösungen schneller dargestellt werden und die Suche wird beschleunigt. Es gilt: Je höher die Ebene der Pyramide, desto geringer wird die Auflösung. In RSG werden Gauß Pyramiden verwendet, bei welchen jeder Level in x - und y -Richtung um den Faktor 2 verringert wird.

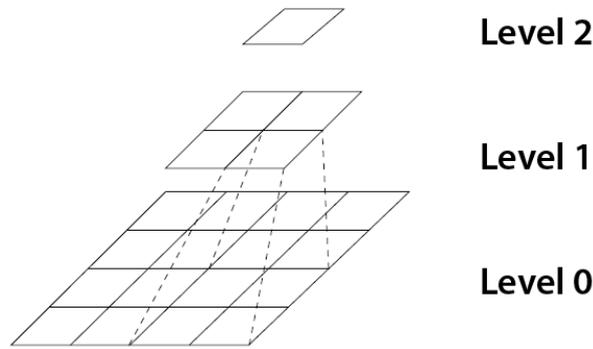


Abbildung 2.9: Bildpyramiden, Quelle: Joanneum Research

Für das Matching bedeutet das, dass das Verfahren im obersten Pyramidenlevel mit der geringsten Auflösung startet. Das Ergebnis des aktuellen Levels wird dann als Prädiktion für die nächste tiefere Ebene verwendet, bis die originalen Bilder mit der höchsten Auflösung erreicht werden.

Pro Pyramidenebene werden in einem ersten Schritt die Disparitäten (siehe Kapitel 2.5.1) eines Bildpaares bestimmt und in sogenannten „*disparity-maps*“ gespeichert. Zusätzlich wird noch ein Bild mit der „*feature distance*“ erstellt. Die *feature distance* wird aus den Einträgen des „*feature vectors*“ bestimmt.

Die Einträge des „*feature vectors*“ beschreiben die Eigenschaften (*features*) des Pixels (und seiner Umgebung). Pro Feature erhält man einen numerischen Wert im Vektor (Paar & Pölzleitner, 1992). Dies ist in **Abbildung 2.10** exemplarisch für drei Eigenschaften darstellt.

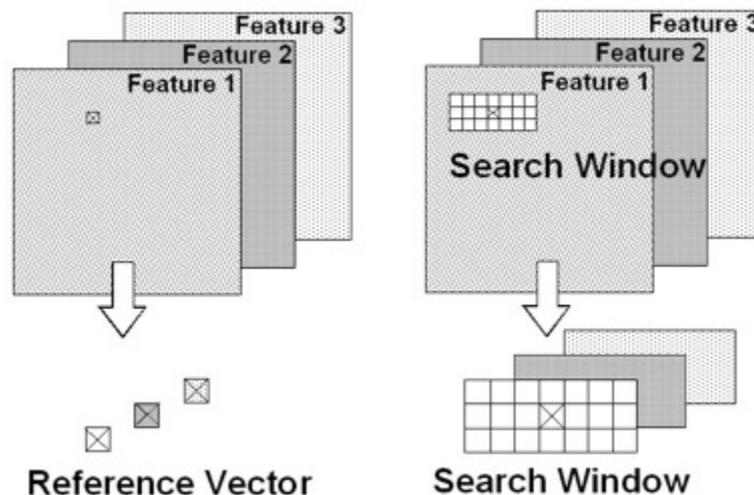


Abbildung 2.10: Einträge des „*feature vectors*“ im Referenzbild (links) und im Suchbild (rechts), Quelle: Joanneum Research

Beispiele für *features* sind gefilterte Bilder mit z.B. normierter Kreuzkorrelation mit unterschiedlichen Kernelgrößen, Tief- und Hochpassfilter und mutual Information (MI).

Parallel zum Matchingprozess wird auch ein Backmatching durchgeführt (Abbildung 2.11). Dieser Arbeitsschritt ist äquivalent zum zuvor beschriebenen Matching, jedoch werden Referenz- und Suchbild vertauscht. Das Backmatching kann als Kontrolle angesehen werden, da im Idealfall $P_r = P'_r$ gelten sollte. Pixel mit stark divergierenden matching- und backmatching Distanzen können als falsche Matches interpretiert werden.

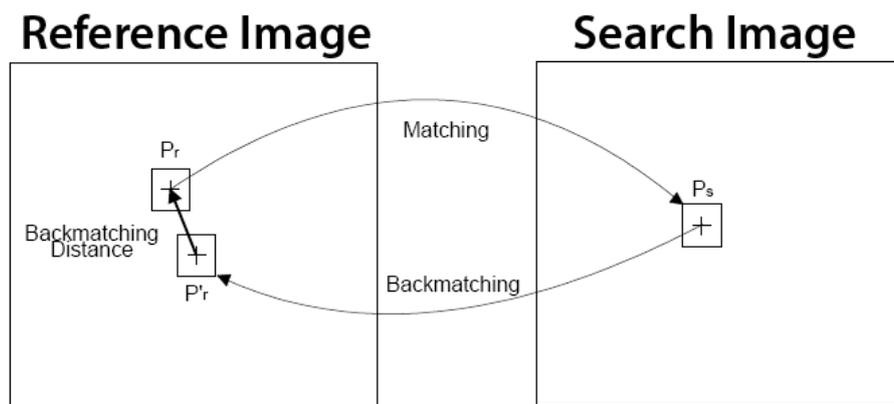


Abbildung 2.11: Prinzip des Backmatchings, Quelle: Joanneum Research

Der nächste Schritt im Workflow enthält eine Medianfilterung der Disparitäten, der *feature distances* des Matchings und des Backmatchings. Danach wird eine Maske erstellt. Werden zuvor definierte Schwellwerte für die *backmatching distance* oder für die *feature distance* überschritten, so werden diese Werte eliminiert. Dies hat jedoch zur Folge, dass Löcher entstehen konnten. Diese werden im nächsten Schritt durch Interpolation geschlossen.

Die gefilterten und interpolierten *disparity maps* dienen anschließend als Prädiktion für die nächste Pyramidenebene.

2.5.1 Parallaxe

Die Theorie zu diesem Kapitel wurde an Kapitel 2.1.6 (Kraus, 2004) angelehnt:

Um ein Objekt aus Bildern dreidimensional rekonstruieren zu können, werden ohne zusätzliche Information mindestens zwei Messbilder benötigt, welche von unterschiedlichen Standpunkten aufgenommen wurden. Deshalb erscheint das Objekt in den Bildern auch in unterschiedlichen Positionen. Dieser Positionsunterschied in den

Bildkoordinaten führt zu Parallaxen (Disparitäten) in den jeweiligen Koordinatenrichtungen.

Dieses Prinzip wird in *Abbildung 2.12* verdeutlicht.

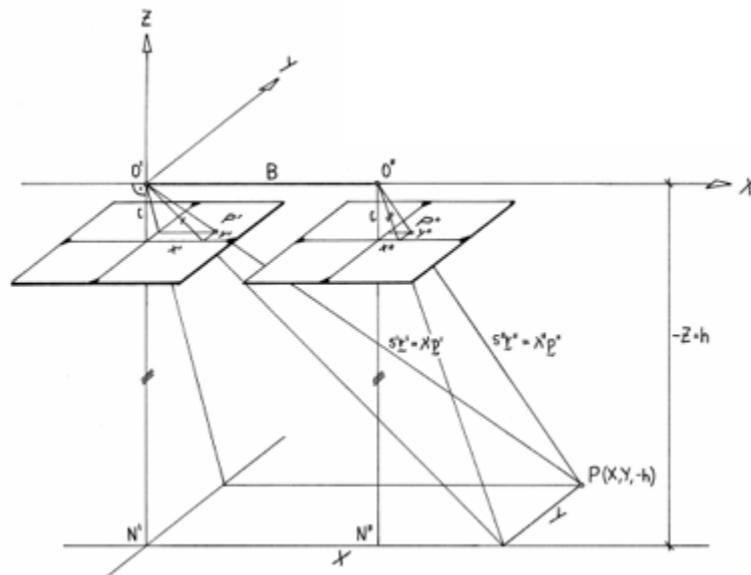


Abbildung 2.12: Normalfall der Stereophotogrammetrie, Quelle: (Kaufmann, 2011) Kapitel 5.2.1

Beim Normalfall der Zweibildauswertung ist die x – Achse parallel zur Basis (Abstand der Aufnahmezentren) und y steht normal auf die Aufnahmerichtung. Dies ist eine Idealvorstellung in der Luftbildphotogrammetrie. Aus *Abbildung 2.12* geht hervor, dass sich beim Normalfall keine Differenzen in den Bildkoordinaten in y – Richtung ergeben. Somit ist die Parallaxe $p_y = 0$. Das bedeutet, dass nur Parallaxen entlang der x - Achse (siehe *Abbildung 2.13*) auftreten.

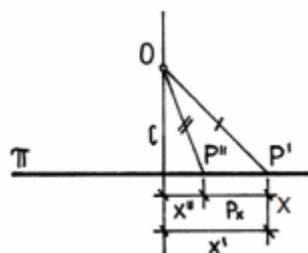


Abbildung 2.13: Parallaxe in x-Richtung, Quelle: (Kaufmann, 2011) Kapitel 5.2.1

Beim Image Matching (Kapitel 4) werden genau diese Parallaxen (Disparitäten) bestimmt und in so genannten disparity maps gespeichert. Die disparity maps werden in weiterer Folge für die Berechnung von digitalen Oberflächenmodellen benötigt (siehe Kapitel 2.6).

2.5.2 Epipolare Geometrie

Bei der Zweibildorientierung geht man von der sogenannten Kernebene aus. Diese Ebene wird durch die beiden Projektionszentren O' und O'' und dem jeweiligen Objektpunkt P definiert. Die Kernebene schneidet die beiden Bildebenen in den sogenannten Kernstrahlen l' und l'' . Alle Kernstrahlen eines Bildes schneiden sich im Kernpunkt E . Werden die beiden Projektionszentren mit einer Gerade verbunden und mit den Bildebenen geschnitten, so ergeben sich als Durchstoßpunkte die Kernpunkte e' und e'' . Das bedeutet, dass e' das Bild des Projektionszentrums O'' und e'' das Bild von O' ist. Damit ist auch festgelegt, dass ein Bildpaar genau zwei Kernpunkte besitzt. Des Weiteren geht aus der epipolaren Geometrie hervor, dass korrespondierende Punkte auf den Kernstrahlen liegen (siehe *Abbildung 2.14*) (Kaufmann, 2010).

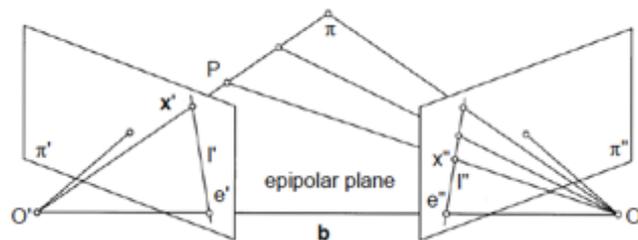


Abbildung 2.14: Kernebene

Der Vorteil, der sich aus dieser Geometrie ergibt, ist, dass sich damit eine Einschränkung des Suchbereiches ergibt. Dies findet Anwendung beim Image Matching entlang eines Kernstrahles. Bei SGM, „Semi-global Matching“ (siehe Kapitel 2.5.5) wird eine strenge epipolare Geometrie vorausgesetzt, da die Suche eindimensional ist und nur mehr entlang der x-Achse gesucht wird.

2.5.3 Relative Orientierung mittels projektiver Geometrie

Dieser Ansatz für die Orientierung zweier überlappender Bilder findet verstärkt in der Computer Vision Einsatz.

„Mit der projektiven Geometrie kann man den mathematischen Zusammenhang zwischen einem zentralperspektivisch entstandenen Bild und dem Objekt beschreiben, ohne die Lage des Projektionszentrums und die Stellung des Bildes im Bezug zum Objekt zu benutzen“, siehe (Kraus, 2004).

Die Komplanaritätsbedingung:

$$\mathbf{b}^T \cdot (\mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2) = 0 \quad (2.30)$$

besagt, dass das Volumen, berechnet über das Spatprodukt der Vektoren $\mathbf{b}, \mathbf{p}_{1i}, \mathbf{p}_{2i}$, des Parallelepipeds genau dann 0 ist, wenn die drei Vektoren in einer Ebene liegen.

Gleichung 2.30 kann auch umformuliert werden, da es gleichgültig ist, mit welchen Vektoren das Kreuzprodukt gebildet wird:

$$\mathbf{p}_1^T \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{p}_2) = 0 \quad (2.31)$$

Ersetzt man in Formel 2.31 den Vektor \mathbf{b} durch eine schiefsymmetrische Matrix

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & -b_z & b_y \\ b_z & \mathbf{0} & b_{-x} \\ -b_y & b_x & \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

und die Vektoren \mathbf{p}_1 und \mathbf{p}_2 entsprechend durch die Beziehungen der Bildkoordinaten ξ_1, η_1 und ξ_2, η_2 , durch die Matrizen \mathbf{C}_1 und \mathbf{C}_2 für die innere Orientierung und durch die Drehmatrizen $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$, welche die Stellung der Bilder im Modellraum definieren, so ergibt sich für die Komplanaritätsbedingung folgende Darstellung:

$$(\xi_1, \eta_1, 1) \mathbf{C}_1^T \mathbf{R}_1^T \mathbf{B} \mathbf{R}_2 \mathbf{C}_2 \begin{pmatrix} \xi_2 \\ \eta_2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

Der zentrale Term $\mathbf{C}_1^T \mathbf{R}_1^T \mathbf{B} \mathbf{R}_2 \mathbf{C}_2$ wird zur so genannten Fundamentalmatrix \mathbf{F} der relativen Orientierung zusammengefasst:

$$(\xi_1, \eta_1, 1) \mathbf{F} \begin{pmatrix} \xi_2 \\ \eta_2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

Die Beziehung in 2.34 stellt nun den Zusammenhang zwischen den Bildkoordinaten ξ_1, η_1 und ξ_2, η_2 her.

In (Fusiello & Irsara , 2008) wird der Ansatz der projektiven Geometrie für eine quasi-euklidische unkalibrierte epipolare Rektifizierung aufgegriffen. Dieser Algorithmus wurde in RSG implementiert und bei dieser Masterarbeit verwendet. Deshalb wird dieses Verfahren kurz erläutert.

Die Theorie dazu wurde aus (Fusiello & Irsara , 2008) entnommen.

(Fusiello & Irsara , 2008) baut auf der kalibrierten epipolaren Rektifizierung auf. Dabei wird für jedes Bild eine neue virtuelle Kamera definiert. Dabei werden die aktuellen Kameramatrizen solange um deren optischen Achsen gedreht, bis die Komplanaritätsbedingung erfüllt ist.

$$H_r = K_{nr}R_rK_{or}^{-1} \quad (2.35)$$

K_{nr} und K_{or} definieren jeweils eine 3×3 Matrix und beinhalten die intrinsischen Parameter der neuen und alten Kamera. R_r beschreibt die Rotation des alten Bildes.

Im Falle der unbekanntenen inneren Orientierung muss für die transformierten Punkte folgende Gleichung erfüllt werden:

$$(H_r \mathbf{m}_r^j)^T [\mathbf{u}_1]_{\times} (H_l \mathbf{m}_l^j) = 0 \quad (2.36)$$

$\mathbf{m}_r, \mathbf{m}_l$ bezeichnen die Vektoren der homologen Punkte und $[\mathbf{u}_1]_{\times}$ stellt die Form der Fundamentalmatrix dar. Für die Lösung dieser Gleichung wird der „Sampson-Error“ herangezogen und das Gleichungssystem $\{E_s^j = 0\}$ nach kleinsten Quadraten gelöst. Für die Lösung erfolgt die Parametrisierung der Matrizen H_r und H_l wie im kalibrierten Fall (siehe Formel 2.35). Es kann gezeigt werden, dass die Matrizen der neuen intrinsischen Parameter von der weiteren Berechnung ausgeschlossen werden können. Die Fundamentalmatrix wird also durch folgende Formel definiert:

$$F = K_{or}^{-1} R_r^T [\mathbf{u}_1]_{\times} R_r K_{ol}^{-1} \quad (2.37)$$

Des Weiteren wird gezeigt, dass die Rotation um die x -Achse der linken Kamera auch 0 gesetzt werden kann und die alten intrinsischen Parameter den Hauptpunkt in der Bildmitte haben, keine Schiefe aufweisen und das Bildformat gleich 1 ist. Somit vereinfacht sich die Darstellung der aktuellen Matrizen, welche nur mehr von der gleichen Brennweite (α) und der Breite und Höhe des Bildes (in Pixel) abhängen:

$$K_{ol} = K_{or} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & w/2 \\ 0 & \alpha & h/2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Die Bestimmung der projektiven Abbildung in einem anderen Raum erfolgt über Gleichung 2.35, wobei die neuen intrinsischen Parameter mit den aktuellen Parametern gleichgesetzt werden ($K_{ol} = K_{or} = K_{nl} = K_{nr}$) modulo dem Versatz des Bildhauptpunktes.

2.5.4 SURF Algorithmus

Für die Bestimmung der relativen Orientierung werden homologe Punkte zwischen zwei Bildern benötigt. Damit diese nicht manuell gemessen werden müssen, wird mit Hilfe von Bildzuordnungsverfahren automatisch nach Verknüpfungspunkten gesucht. Bei dieser Masterarbeit wurde dafür der **Speed-Up Robust Features**, kurz **SURF**, Algorithmus verwendet.

Der theoretische Hintergrund zur Beschreibung von SURF wurde aus (Bay et al, 2008) entnommen.

Bei SURF handelt es sich um einen maßstabs- und rotationsinvarianten Detektor und Deskriptor. Die Suche nach Verknüpfungspunkten wird in drei Arbeitsschritte aufgeteilt. Im ersten Schritt werden „Interest Points“ an markanten Bildstellen wie zum Beispiel Kanten, T-Kreuzungen und blobs detektiert. Die wichtigste Eigenschaft eines Detektors ist, dass die gleichen Interest Points auch unter unterschiedlichen Betrachtungsverhältnissen (Beleuchtung, unterschiedlicher Maßstab, Rotation) detektiert werden können.

Im nächsten Schritt wird die Nachbarschaft des Interest Points herangezogen um eindeutige Eigenschaften für den aktuell detektierten Punkt zu extrahieren und diese in dem sogenannten „feature Vektor“ abzuspeichern. Dafür ist es wichtig, dass die Beschreibung der Nachbarschaft eindeutig ist und dass der Deskriptor robust gegenüber geometrischen und photographischen Deformationen und Bildrauschen ist.

Im letzten Schritt, dem Matching, werden die „feature Vektoren“ aufgrund ihrer Distanz (Mahalanobis Abstand oder euklidische Distanz) einander zugeordnet.

2.5.4.1 „Interest Point Detection“

Für die Detektion von Interest Points wird die „Hessian Matrix“ herangezogen. An jenen Stellen, wo die Determinante der Matrix ein Maximum ist, wird eine sogenannte blob-Struktur lokalisiert. Für die Berechnung der „Hessian Matrix“ werden so genannte „Integral Images“ herangezogen. Der Grund dafür ist, dass in weiterer Folge „box type convolution Filters“ angewendet werden, welche mit „Integral Images“ schnell berechnet

werden können. Die Hessian Matrix für einen Bildpunkt x und einem Maßstab σ ist folgendermaßen definiert:

$$\mathcal{H}(x, \sigma) = \begin{pmatrix} L_{xx}(x, \sigma) & L_{xy}(x, \sigma) \\ L_{xy}(x, \sigma) & L_{yy}(x, \sigma) \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

$L_{xx}(x, \sigma)$ ist die Faltung der 2-fachen Gauss'schen Ableitung mit dem „Integral Image“. Jedoch werden bei der Berechnung aufgrund von Diskretisierung nicht die 2-fachen Gauss'schen Ableitung sondern deren Approximation durch Box Filter (D_{xx}, D_{xy}, D_{yy}) verwendet.

Die Determinante der „Hessian Matrix“ wird folgendermaßen berechnet:

$$\det(\mathcal{H}_{approx}) = D_{xx}D_{yy} - (\omega D_{xy})^2 \quad (2.39)$$

ω ist ein Gewichtungsfaktor, welcher jedoch für die gesamte Berechnung konstant gehalten wird. Die Determinante stellt eine „blob response“ an der Position x dar. Diese wird in sogenannten „blob-response maps“ abgespeichert, um in einem nachfolgenden Schritt (Lokalisierung des „Interest Points“) ein lokales Maximum zu finden. .

Die Berechnung der Extrema erfolgt auf unterschiedlichen Maßstabsebenen, weshalb der Skalenraum in unterschiedliche Oktaven unterteilt wird. Pro Oktave wird eine „filter response map“ erzeugt. Dafür wird das Eingangsbild mit unterschiedlich großen Filtermatrizen gefaltet. Aufgrund von „Integral Images“ müssen jedoch keine Bildpyramiden gebildet werden. Die Filtermatrizen werden vergrößert und auf das originale Bild angewendet.

Für die erste Oktave ergeben sich folgende Filtermatrizen: $9 \times 9, 15 \times 15, 21 \times 21, 27 \times 27$. Für die nächste Oktaven wird der Größe zwischen zwei Filtermatrizen verdoppelt: $15 \times 15, 27 \times 27, 39 \times 39, 51 \times 51$. Die Filtergrößen der dritten Oktave sind: $27, 51, 75, 99$. Diese Folge von Filtergrößen wird solange fortgesetzt, bis die Filtergrößen größer sind als das Eingangsbild.

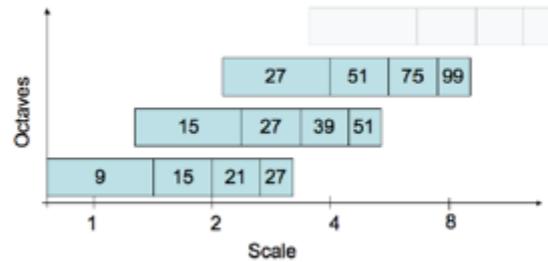


Abbildung 2.15: Filtergrößen in unterschiedlichen Oktaven, Quelle: (Bay et al. 2008)

Um einen „Interest Point“ lokalisieren zu können, wird danach eine „non-maximum suppression“ in der $3 \times 3 \times 3$ Nachbarschaft durchgeführt um festzustellen, ob ein lokales Maximum existiert. Wird ein „Interest Point“ gefunden, so muss danach noch das Maximum der Determinante interpoliert werden.

2.5.4.2 „Interest Point Description and Matching“

Der Interest Point Deskriptor beschreibt die Intensitätsverteilung in der Nachbarschaft des „Interest Points“. Dafür sind drei Schritte notwendig.

Im ersten Schritt wird die Orientierung des Schlüsselpunktes ermittelt. Dafür werden die „Haar-wavelet responses“ in x- und y-Richtung innerhalb eines Kreises mit Radius $6s$ (s ist der Maßstab, in welchem der Punkt lokalisiert wurde) gebildet. Die Rückgabewerte der Wavelets sind maßstabsabhängig und müssen zusätzlich mit einem Gaußfilter ($\sigma = 2s$) gefiltert werden. Anschließend werden diese innerhalb des Kreises entlang der Abszisse und Ordinate als Punkte aufgetragen und daraus wird die Orientierung bestimmt. Dafür werden die Rückgabewerte in x- und y-Richtung aufsummiert und ein lokaler Vektor, innerhalb eines $\frac{\pi}{3}$ großen Kreissektors, gebildet (siehe *Abbildung 2.16*). Der längste Vektor definiert die Orientierung des „Interest Points“. Die Orientierung wird benötigt um invariant gegenüber Bildrotationen zu sein.

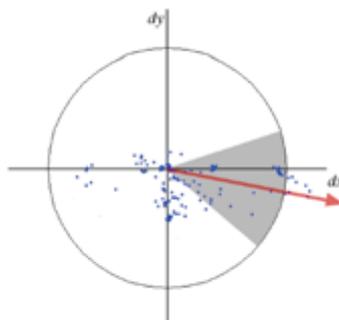


Abbildung 2.16: Orientierung des Vektors, Quelle: (Bay et al. 2008)

Im zweiten Schritt erfolgt die Beschreibung der Nachbarschaft. Dafür wird ein Quadrat (mit der Seitenlänge $20s$) mit der zuvor ermittelten Orientierung um den „Interest Point“ gelegt. Dieses Quadrat wird in weitere 4×4 Subquadrate aufgeteilt (Abbildung 2.17) und für jede Subregion werden 5×5 Punkte definiert, an welchen die „Haarwavelets“ in horizontale, d_x , und vertikale Richtung, d_y , (bezogen auf die Orientierung) berechnet werden.

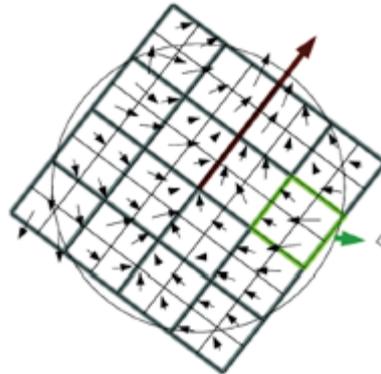


Abbildung 2.17: Quadrat um den Interest Point, Quelle: (Bay et al. 2008)

Die Filterrückgabewerte d_x und d_y werden anschließend für jede Subregion summiert. Des Weiteren werden auch die absoluten Summen gebildet. Somit entsteht für jede Subregion ein „descriptor vector“ $v = (\sum d_x, \sum d_y, \sum |d_x|, \sum |d_y|)$. Für das gesamte Quadrat entsteht somit ein Vektor mit 64 Einträgen.

2.5.5 Semi-global Matching

Der Theoretische Hintergrund für die Beschreibung dieses Matching Algorithmus wurde aus (Hirschmüller, 2008) entnommen.

SGM ist ein pixelbasierter Algorithmus, basierend auf „Mutual Information“, und einer approximierten zweidimensionalen Glättungsbedingung. SGM setzt eine strenge epipolare Geometrie der Bilder voraus, da nur entlang einer Achse gesucht wird.

In einem ersten Schritt werden pixelweise die Kosten berechnet. Dafür wird die „Mutual Information“, welche den statistischen Zusammenhang von Grauwerten beschreibt, herangezogen. MI wird über die Entropie H_{I_1} und H_{I_2} , dem Informationsgehalt der jeweiligen Bilder und deren kombinierter Entropie H_{I_1, I_2} berechnet:

$$MI_{I_1, I_2} = H_{I_1} + H_{I_2} - H_{I_1, I_2} \quad (2.40)$$

Die Entropien werden über die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion, \mathbf{P} , der Grauwerte der Bilder bestimmt, wobei hoch texturierte Bereiche einen hohen Informationsgehalt und ähnliche radiometrische Bereiche einen niedrigen Informationsgehalt liefern.

Die MI matching Kosten werden mit folgender Funktion berechnet:

$$C_{MI}(\mathbf{p}, d) = -m_{I_{b,f_D(I_m)}}(I_{bp}, I_{mq}) \quad (2.41)$$

\mathbf{p}, \mathbf{q} bezeichnen die Pixel im Basis- und Matchbild (Subindizes \mathbf{b}, \mathbf{m}) und d die Disparität zwischen \mathbf{p} und \mathbf{q} .

In einem zweiten Schritt werden die Kosten aggregiert. Das Problem bei pixelweisem Matching ist, dass es mehrdeutig sein kann und falsche matches geringere Kosten haben können als richtige Zuordnungen. Deshalb werden bei der Summierung „Penalties“, P_1 und P_2 , eingeführt, welche Änderungen in den benachbarten Disparitäten benachteiligen (Glättungsbedingung). Somit werden auch die Umgebungspixel in der Berechnung miteinbezogen. Die pixelweisen Kosten und die Glättungsbedingung werden über die Energie $E(D)$ des Bildes der Disparitäten D ausgedrückt:

$$E(D) = \sum_p C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1] \quad (2.42)$$

$E(D)$ ist somit die Summe aller Matching Kosten (1. Term) plus zusätzlichen, jedoch geringen, Kosten für kleine Änderungen (in 1 Pixel-Bereich, 2. Term) und weiteren Kosten für größere Änderungen (Term 3). T ist ein binärer Operator, welcher den Wert 1 erhält, wenn das Argument zutrifft und 0 anderenfalls. P_1 und P_2 sind frei wählbar, jedoch muss folgende Bedingung gelten: $P_2 \geq P_1$.

Das Ziel ist es nun, jenes Bild der Disparitäten zu finden, bei welchem die Energie $E(D)$ minimiert wird. Jedoch ist solch eine globale, zweidimensionale Aggregation ein NP-Problem, welches sich nicht effizient lösen lässt. SGM verfolgt nun den Ansatz, alle jeweiligen eindimensionalen Kosten $L_r(\mathbf{p}, d)$ entlang von 16 Pfaden der Richtung \mathbf{r} gleichermaßen zu aggregieren (*Abbildung 2.18*):

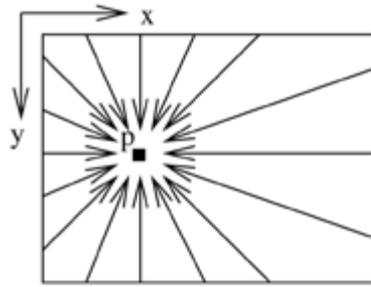


Abbildung 2.18: Kostenaggregation entlang der Pfade, Quelle: (Hirschmüller, 2008)

Für die Berechnung der Kosten entlang der Pfade welche im Pixel \mathbf{p} enden wird Formel 2.43 verwendet. Die Berechnung erfolgt rekursiv:

$$\begin{aligned}
 &L_r(\mathbf{p}, d) \\
 &= C(\mathbf{p}, d) \\
 &+ \min(L_r(\mathbf{p} - \mathbf{r}, d), L_r(\mathbf{p} - \mathbf{r}, d - 1) + P_1, L_r(\mathbf{p} - \mathbf{r}, d + 1) \\
 &+ P_1, \min_i L_r(\mathbf{p} - \mathbf{r}, i) + P_2) - \min_k L_r(\mathbf{p} - \mathbf{r}, k)
 \end{aligned} \tag{2.43}$$

Die Kosten von $L_r(\mathbf{p}, d)$ setzen sich aus den Matchingkosten und den minimalen Kosten des vorhergehenden Pixels des Pfades $\mathbf{p} - \mathbf{r}$ zusammen, welche wiederum mit dem konstanten Penalty P_1 für Änderungen von ∓ 1 Pixel und für größere Änderungen mit P_2 versehen werden.

Die Kosten aller Pfade aus allen Richtungen \mathbf{r} werden schlussendlich summiert:

$$S(\mathbf{p}, d) = \sum_{\mathbf{r}} L_r(\mathbf{p}, d) \tag{2.44}$$

Im letzten Schritt erfolgt die Berechnung des Bildes der Disparitäten D_b . Dafür wird für jedes Pixel \mathbf{p} jene Disparität d mit den minimalen korrespondierenden Kosten $S(\mathbf{p}, d)$ ausgewählt.

2.6 Räumlicher Vorwärtsschnitt – Generierung eines DOM

Ein digitales Oberflächenmodell (DOM) ist eine dreidimensionale Abbildung der Erdoberfläche. Um ein DOM generieren zu können, wird eine hohe Anzahl an 3D-Punkten benötigt, um den Oberflächenverlauf bestmöglich approximieren zu können.

Mathematisch betrachtet kann ein Oberflächenpunkt aus zwei Messbildern abgeleitet werden. Dafür werden folgende Größen benötigt:

Gegeben sind die Projektionszentren X_0' , X_0'' und die Rotationsmatrizen R_0' , R_0'' der Messbilder sowie die Parameter der inneren Orientierung x_0, y_0, c . Die Bildkoordinaten x', y' bzw. x'', y'' eines Punktes werden gemessen (oder durch das Matching bestimmt). Somit kann für jede Bildkoordinate (pro Bild) ein Projektionsstrahl gebildet werden (siehe Kapitel 2.3). Der Schnittpunkt der beiden Strahlen ergibt den Objektpunkt (Kaufmann, 2011) Kapitel 5.2.2.

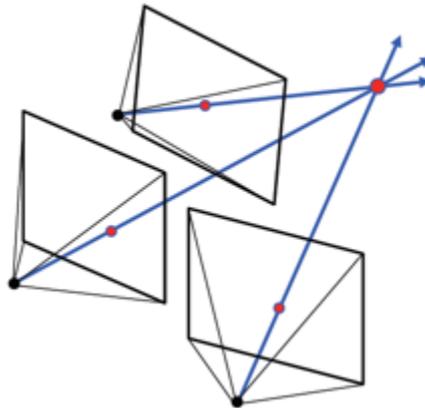


Abbildung 2.19: Quelle ETH Zürich, Quelle:

<http://www.igp.ethz.ch/photogrammetry/education/lehveranstaltungen/PhotogrammetryFS11/coursematerial/PhotoFS2011-07-triang.pdf>

Sind mehr als zwei Bilder (wie schematisch in *Abbildung 2.19* dargestellt) für den räumlichen Vorwärtsschnitt vorhanden, erfolgt die Bestimmung der Objektpunktkoordinaten auf Basis einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten. Der Vorteil liegt darin, dass mehrere Projektionsstrahlen im Raum vorhanden sind und somit mehrere Optionen für die Bestimmung des Oberflächenpunktes vorliegen. Somit können mögliche falsche Matchingergebnisse, welche zu Fehlern in den Oberflächenkoordinaten führen können, identifiziert und von den Berechnungen ausgeschlossen werden. Verglichen zur reinen Stereobildauswertung sind die Ergebnisse des allgemeinen räumlichen Vorwärtsschnittes robuster und zuverlässiger. Das Ergebnis ist ein unregelmäßig angeordneter Punkthaufen mit jeweils einer Nord-, Ost-, und Höhenkomponente, welcher in einem weiteren Schritt auf ein regelmäßiges Raster resampled werden muss (Raggam, 2006).

3 Datengrundlagen

3.1 Testgebiet

Für das Untersuchungsgebiet wurde ein Waldstück mit unterschiedlichen Bestandshöhen gesucht. Des Weiteren sollte das Gebiet leicht zugänglich sein um die Einmessung von Passpunkten und Referenzhöhen zu ermöglichen. Zusätzlich mussten für diese Region auch aktuelle ALS-Daten (Airborne Laser Scanning, siehe Kapitel 3.4) zur Verfügung stehen, da diese für einen Vergleich benötigt wurden.

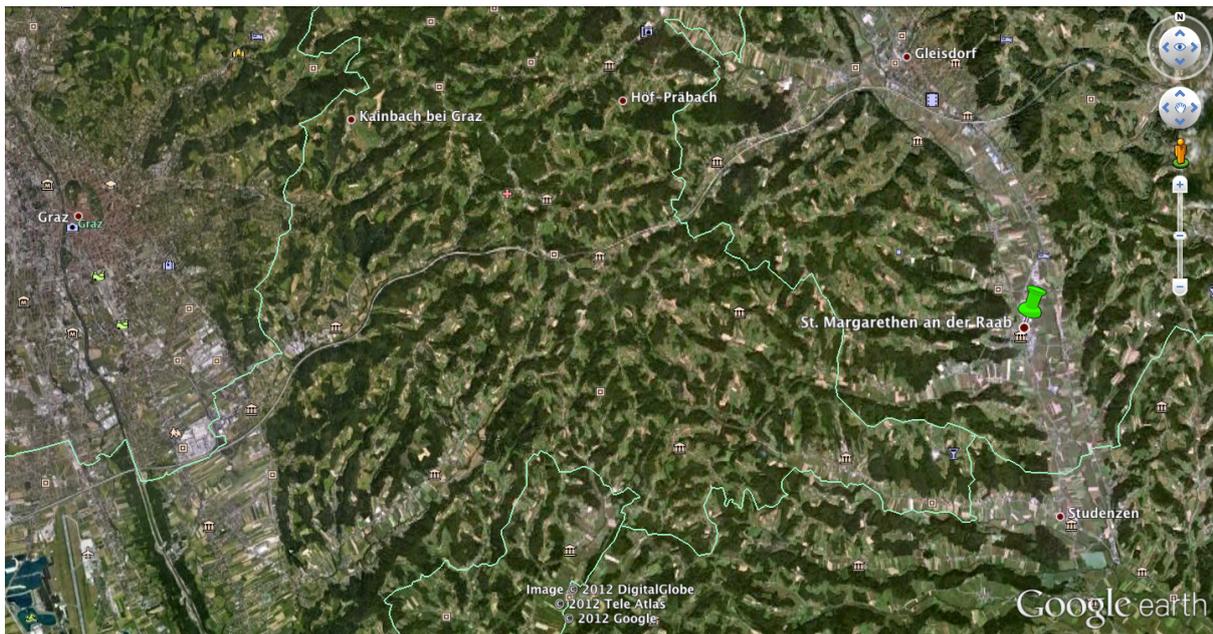


Abbildung 3.1: Lage St. Margarethen an der Raab, Quelle: Google Earth

Als Testgebiet wurde schlussendlich ein Waldstück in der Gemeinde St. Margarethen an der Raab, ca. 8 km südlich von Gleisdorf, ausgewählt (Abbildung 3.1). Im Zuge eines weiteren Forschungsprojektes des Institutes DIGITAL (Joanneum Research) wurden dafür Luftbildaufnahmen mit der ADAM-Plattform Ende Juni 2011 (siehe Kapitel 3.2) erstellt. Für die Durchführung dieser Masterarbeit wurden die Bilddaten des mittleren Flugstreifens herangezogen. Bei dem Testgebiet handelt es sich um ein 1,5 x 0,5 km großes Waldstück, welches die zuvor definierten Voraussetzungen erfüllt (Abbildung 3.2).



Abbildung 3.2: Testgebiet, Quelle: Google Earth

3.2 Luftbildaufnahme

Die Bilddaten, welche für die Durchführung dieser Masterarbeit herangezogen wurden, wurden am 29.6.2011 aufgenommen. Sie stammen aus einer Befliegung mit der ADAM-Plattform (Abbildung 3.3). Dabei wurden insgesamt 3 Flugstreifen in Ostwestrichtung geflogen. Das Testgebiet wurde durch einen Teil des mittleren Flugstreifens (21 aufeinanderfolgende Luftbilder) vollständig abgedeckt. Die Luftbilder des Sub-Flugstreifens wurden für die Untersuchungen dieser Masterarbeit herangezogen.

Die Aufnahmeplattform wurde am Institut DIGITAL (Joanneum Research) entwickelt und besteht aus folgenden Hardwarekomponenten:

- Bildgebende Sensoren
 - Mittelformatkamera (Prosilica GE 4900C)
 - Infrarotkamera (nahes Infrarot)
- Sensoren für Georeferenzierung
 - GPS 2 Phasenempfänger (Novatel DL-V3)
 - Inertiale Messeinheit, IMU (iMar)
- Kontrolleinheit
 - PC
 - Datenspeicher
- Stromversorgung
 - Batteriebetrieb oder Stromerzeugung durch Generator

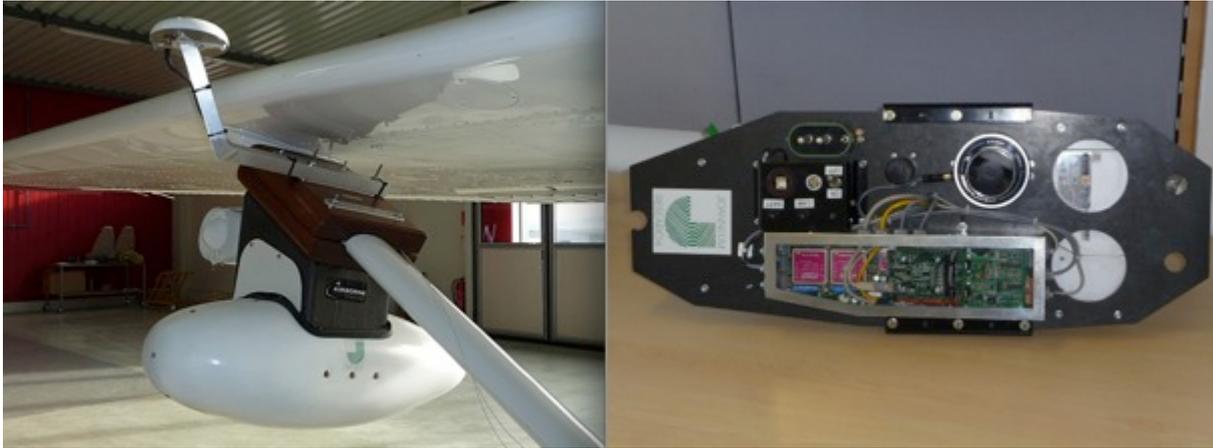


Abbildung 3.3: ADAM Aufnahmeplattform

Bei der verwendeten optischen Messkamera handelte es sich um eine Prosilica GE4900C mit einem Carl Zeiss 50 mm Fixbrennweitenobjektiv.

Die Kameraspezifikationen sind *Tabelle 3.1* zu entnehmen:

Tabelle 3.1: Prosilica GE 4900C Spezifikationen - Quelle: siehe (Allied Vision Technologies, 2010)

Prosilica GE 4900C	
Auflösung	4872 x 3248
Sensor	Kodak KAI-16000
Sensortyp	CCD Progressive
Sensorgroße	Type 35 mm
Zellengroße	7,4 μm
Farbtiefe	12 bit
Raw Modi	Bayer8, Bayer12Packed, Bayer16

Die aufgenommenen Bilder werden im Rohbildmodus Bayer 16 mit einer Auflösung von 4872 x 3248 Pixeln und einer Farbtiefe von 12 bit gespeichert. Bevor die Bilder zur Auswertung herangezogen werden können, müssen diese zuerst vorverarbeitet werden (siehe Kapitel 4.3). Zusätzlich werden zu jedem Bild die Metadaten in Form eines AAI-Pakets gespeichert (siehe Kapitel 4.3.2). Das AAI-Paket beinhaltet u.a. die Aufnahmeposition des Bildes, welches aus der Echtzeit-C/A Codelösung des GPS Empfängers bestimmt wird, und die Ausrichtung der Kamera, aus der IMU Lösung, zum Zeitpunkt der Aufnahme. Mit Hilfe dieser Daten kann eine direkte Georeferenzierung der Luftbilder erfolgen. Da dies bei dieser Masterarbeit jedoch nicht erfolgte, wird darauf

nicht weiter eingegangen. Die Metadaten werden allerdings als Näherungswerte für die Bündelblockausgleichung benötigt (siehe Kapitel 3.3).

Die Bodenauflösung für die Befliegung wurde mit 18 cm pro Pixel festgelegt. Ausgehend von dem Verhältnis Brennweite zu Zellengröße Kamera gleich Flughöhe zu Bodenauflösung eines Pixels, welches in *Abbildung 3.4* graphisch dargestellt ist, konnte die mittlere Flughöhe über Grund mit 1200 m berechnet werden (siehe Formel 3.1).

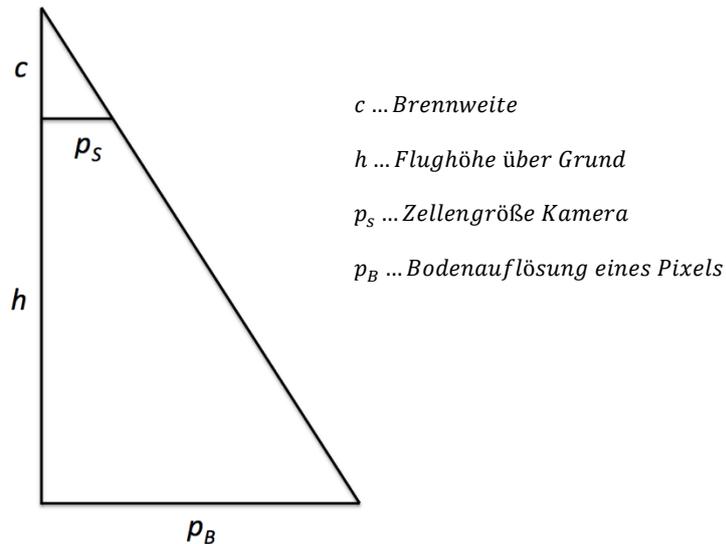


Abbildung 3.4: Bestimmung der Flughöhe aus Formel 3.1

$$\frac{c}{h} = \frac{p_S}{p_B} \quad (3.1)$$

Daraus ergab sich die Bodenabdeckung eines Bildes von 576 m in- und 865 m quer zur Flugrichtung (formaler Zusammenhang siehe (Kaufmann, 2011) Kapitel 3.2.3). Darüber hinaus wurde das Aufnahmeintervall für sequentielle Luftbilder für diese Aufnahme mit 2 s definiert. Für die Befliegung wurde ein Hubschrauber vom Typ Robinson R44 Raven II eingesetzt. Dadurch war es möglich, mit konstanten 15 – 20 m/s zu fliegen und somit einen hoch redundanten Datensatz zu erstellen. Nach Formel (3.2 siehe (Kaufmann, 2011) Kapitel 3.2.3) konnte daher ein Bildüberlappungsbereich von 93% in Flugrichtung erzielt werden. Dies war für die Auswertungen und Analysen gefordert.

$$l[\%] = \left(1 - \frac{B}{S}\right) \cdot 100 \quad (3.2)$$



Abbildung 3.5: Robinson R44 Raven II

3.3 GPS und IMU

Für die Bestimmung der äußeren Orientierung werden Näherungswerte benötigt. Diese Werte wurden aus der kombinierten GPS/IMU Lösung gewonnen.

In die Aufnahmeplattform wurde ein GPS-Empfänger des Typs Novatel DL-V3 und eine inertielle Messeinheit des Herstellers iMar (IMU-FSAS) eingebaut. Damit war es möglich, einerseits die Positionen der Auslösezeitpunkte der Kamera zu speichern und andererseits die Ausrichtung der Kamera im Raum durch drei Drehwinkel (*roll, pitch, yaw*) zu bestimmen. Die Datenrate des GPS wurde mit 1 Hz festgelegt. Die Sampelrate der IMU betrug 200 Hz.

Die Auswertung der Daten erfolgte im post-Processing mit Hilfe des Softwarepakets *Inertial Explorer* (Versionsnummer 8.1) von Novatel. In einem ersten Schritt wurde die Auswertung der GPS Messung vorgenommen. Dabei wurde nach dem Schema der *kinematischen relativen Positionierung* (siehe (Hofmann-Wellenhof et al., 2008) Kapitel 6.3.5) verfahren. Als Masterstation wurde ein Empfänger am Dach des Joanneum Research, Wastiangasse 6, aufgestellt. Für die Auswertung wurde in einem ersten Schritt die Basislinie der GPS Permanentstation Lustbühl der österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAG) zur Masterstation berechnet. Ausgehend von der korrigierten Masterstation wurde die Flugtrajektorie bestimmt. Die Genauigkeit für diese Art der Punktbestimmung wird in der Literatur mit $\mp (5 \text{ cm} + 0,5 \text{ ppm})$ angegeben.

Im zweiten Teil der Auswertung wurden die Messungen der IMU hinzugefügt. Diese wurden gemeinsam mit den Ergebnissen der GPS Auswertung, mittels Kalmanfilterung (siehe (Hofmann-Wellenhof et al., 2003) Kapitel 3.6.3) prozessiert. Als Auswertemethode wurde „*loosely coupled*“ verwendet. Dies setzt eine GPS-Auswertung voraus. Bei dieser

Form der Auswertung werden die Differenzen für Position und Geschwindigkeit aus den IMU-Messungen und der GPS-Auswertung gebildet. Daraus wird die Fehlerinformation für die IMU gebildet, welche als Update-Information für den Kalman Filter benutzt wird (Waypoint Products Group, 2007) Kapitel 4.3). Als Fehlermodell wurde das programmseitige definierte Modell für die IMU ausgewählt.

Für die Initialisierung wurde „*automated alignment*“ gewählt. Dies wird vom Softwarehersteller empfohlen. Dabei scannt das Programm die IMU-Daten und wählt im Anschluss die geeignete Methode der Initialisierung. Für das „*static coarse-alignment*“ werden insgesamt zwei Minuten und für das „*fine alignment*“ weitere acht bis zehn Minuten empfohlen (Waypoint Products Group, 2007).

Für das „*initial alignment*“ wurden sowohl das GPS als auch die IMU 15 Minuten vor Abflug aktiviert um im post-Processing eine statische Initialisierung durchführen zu können. Nach der Landung wurde dieser Vorgang wiederholt.

In *Abbildung 3.6* ist ein Ausschnitt der Flugtrajektorie über dem Testgebiet mit den Positionen der Aufnahmezeitpunkte der Kamera (blaue Punkte) dargestellt.



Abbildung 3.6: Flugtrajektorie über Testgebiet, Quelle: Google Earth

Diese beziehen sich jedoch auf das GPS-Phasenzentrum. Deshalb musste beim Export der Raumvektor zwischen GPS-Phasenzentrum und Projektionszentrum berücksichtigt werden. Dieser wurde in einer weiteren Diplomarbeit bestimmt.

Das Ergebnis der GPS/IMU Auswertung war eine Liste mit den Positionen der Projektionszentren und der Ausrichtung der Kamera sowie deren Standardabweichungen. Diese Parameter wurden beim Datenimport in RSG (4.3.2) und in weiterer Folge bei der Bündelblockausgleichung benötigt.

3.4 ALS Daten

Für den Vergleich der in dieser Masterarbeit erzeugten photogrammetrisch digitalen Oberflächenmodelle mit einem alternativen Modell wurde ein ALS-Modell herangezogen.

Das Amt der Steiermärkischen Landesregierung beauftragte 2008 ein flächendeckendes Laserscannermodell der Steiermark. Das Testgebiet wurde im Frühjahr 2009 befliegen. Das ALS Modell für diese Masterarbeit wurde kostenlos vom Land Steiermark zur Verfügung gestellt.

Der Datensatz wurde als XYZ-Rasterfile mit einer Rasterweite von 1 m bestellt. Das bedeutet, dass für jede Rasterzelle genau ein Höhenwert vorhanden ist. Geliefert wurde einerseits ein Rasterfile des digitalen Geländeoberflächenmodells, DOM, welches aus dem First-Pulse-Echo berechnet wurde. Andererseits wurde ein Rasterfile des digitalen Geländemodells, DGM, benötigt, welches aus dem Last-Pulse-Echo der Aufnahme erstellt wurde. Die ALS-Daten liegen im Bezugsrahmen WGS84 mit der Projektion UTM 33N vor. Jedoch handelte es sich bei der Höhe um orthometrische Höhen (H). Um ein einheitliches Höhensystem zu verwenden, musste H in ellipsoidische Höhen (h) transformiert werden. Dafür wurde die Geoidundulation (N) anhand von 5 Festpunkten des amtlichen Festpunktfeldes des BEV bestimmt (siehe Kapitel 3.5.3). Die Höhenwerte der ALS-Modelle wurden nach Formel (3.3) auf ellipsoidische Höhen umgerechnet.

$$h = H + N \quad (3.3)$$

In einem weiteren Schritt wurden zwei Oberflächenmodelle aus den beiden Rasterdatenfiles gebildet. Dafür wurden die ASCII-Files in das Surfacing-Tool des Programmpakets ERADS Imagine (Versions 11.0) importiert und ein digitales Oberflächenmodell bzw. ein digitales Geländemodell erzeugt (siehe *Abbildung 3.7*).

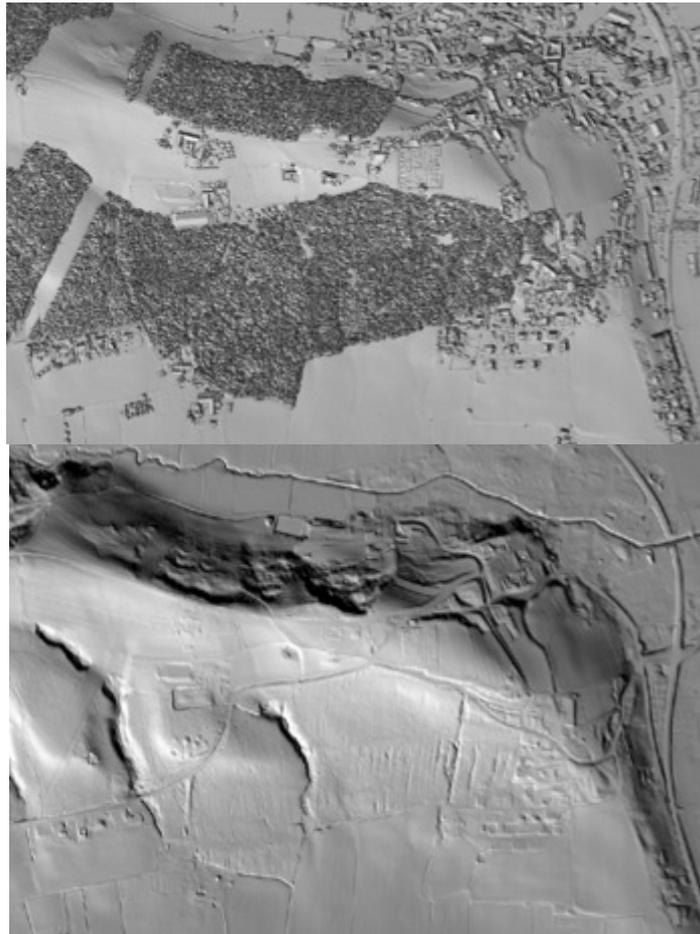


Abbildung 3.7: shaded Relief des ALS-DOMs oben und des ALS-DGMs unten

Anschließend musste das DOM noch gefiltert werden um etwaige Datenlücken im Kronendach des Waldes zu glätten. Dazu wurde ein Medianfilter mit einem 3×3 Filterkernel angewendet. Der Nachteil des Medianfilters ist jedoch, dass lokale Maximuswerte, wie z.B. Baumwipfel, abgeschnitten werden. Deshalb wurde danach eine Abfrage im Model Maker (ERDAS Imagine) durchgeführt. Dabei wurde die Bedingung definiert, dass das mediangefilterte Modell nur dann herangezogen wurde, wenn die Differenz zwischen gefiltertem Modell und Rohdatenmodell größer einem Schwellwert war. Andernfalls wurde das ursprüngliche, ungefilterte Modell herangezogen. Somit blieben die originalen Baumhöhen erhalten und Datenlücken wurden geglättet.

Die Lage- und Höhengenaugigkeit (von ebenen Flächen) der ALS Modelle sind in *Tabelle 3.2* angegeben.

Tabelle 3.2: Genauigkeiten ALS Modell

Genauigkeiten [cm]	
Lage	± 30
Höhe	± 15

3.5 Passpunkte

3.5.1 Polygonzug

Die Einmessung der Passpunkte erfolgte terrestrisch, in Form von Polygonzügen. Es wurde zuvor schon versucht, mittels GPS Messung (rapid-statik-Methode) die Koordinaten der Passpunkte zu bestimmen. Jedoch kam es entlang der Straßen am Waldrand und im bebauten Gebiet zu Signalverlusten, weshalb keine brauchbaren Passpunktkoordinaten eingemessen werden konnten. Deshalb erfolgte eine alternative Einmessung mittels beidseitig angeschlossenen Polygonzügen.

Der Anschluss der Polygonzüge erfolgte an das amtliche Festpunktfeld des BEV im Landeskoordinatensystem mit M34 als Bezugsmeridian. Insgesamt wurden zwei Polygonzüge gemessen (siehe *Tabelle 3.3*). Die Passpunkte wurden polar von den Standpunkten der Polygonzüge bestimmt.

Tabelle 3.3: Polygonzüge

Zug	Startpunkt	Anschluss	Endpunkt	Anschluss	Länge [m]
1	MP1	245-165A1, 18-165T1	MP10	400-165A1, 442-165A1	1230,843
2	MP1	245-165A1, 18-165T1	400-165A1	442-165A1, 68123-E1	2337,287

Für die Einmessung wurde die Totalstation Leica TCRA 1201+ des Vermessungsbüros Sommer ZT GmbH verwendet, welches auch zwei Mitarbeiter für die Messung zur Verfügung stellte. Des Weiteren wurden die Polygonpunkte mit Nägel im Asphalt vermarktet und nummeriert, da diese für weitere Anschlussmessungen zu einem späteren

Zeitpunkt benötigt wurden (siehe Referenzmessung Kapitel 5.1). Die Abschlussfehler der Züge sind in *Tabelle 3.4* dargestellt.

Tabelle 3.4: Abschlussfehler der Züge im Landeskoordinatensystem

Zug	Abschlussfehler der Koordinaten		
	$\Delta Y_{GK} [m]$	$\Delta X_{GK} [m]$	$\Delta H_{GK} [m]$
1	-0,097	0,002	-0,021
2	-0,108	-0,026	0,012



Abbildung 3.8: Lage der Festpunkte, Quelle: GIS Steiermark

3.5.2 Koordinatentransformation

Die eingemessenen Passpunkte beziehen sich auf das Landeskoordinatensystem. Als Bezugsrahmen für diese Masterarbeit wurde jedoch WGS84 mit UTM 33N als Projektion gewählt. Deshalb mussten die eingemessenen Passpunkte transformiert werden (Helmert-Transformation). Dazu mussten die lokalen Transformationsparameter bestimmt werden. Dies erfolgte durch GPS Messungen an den amtlichen Festpunkten, welche das Testgebiet umgeben (siehe *Abbildung 3.8*) und an einem Standpunkt des

Polygonzuges. Für die GPS Messungen wurde eine Masterstation am KT 245-165A1 aufgestellt (Laufzeiten siehe *Tabelle 3.5*).

Tabelle 3.5: Standpunkte und GPS Laufzeiten

Punkt ID	Laufzeit [min]	Länge Basislinie [km]	Genauigkeiten [cm]	
			σ_{DLage}	$\sigma_{DHöhe}$
245-1565A1	374	18,27	0,7	0,9
18-165A1	30	0,84	0,5	1,1
442-165A1	31	0,81	0,5	1,2
68123-20E1	30	0,78	0,5	0,8
400-165A1	30	1,30	0,8	0,6
MP12	30	0,74	0,5	0,8

Ausgehend von der Permanentstation der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAG) am Grazer Lustbühl wurde im post-Processing die Basislinie von der Station Lustbühl zur Masterstation im Testgebiet berechnet. Darüber hinaus wurden von der korrigierten Mastereinheit alle Basislinien zu den umliegenden, mit GPS-Receiver bestückten, Festpunkten bestimmt. Somit wurden insgesamt fünf Passpunkte für die Bestimmung der lokalen Transformationsparameter eingemessen (*Tabelle 3.6*).

Tabelle 3.6: Passpunkte für 7 Parameter Transformation

ID	GK M34			WGS84/UTM33N		
	Y[m]	X[m]	H[m]	X[m]	Y[m]	h[m]
245-165A1	-45634,82	211849,73	387,22	555582,74	5210337,47	433,77
18-165A1	-44598,50	211732,97	364,24	556420,67	5210235,01	410,82
442-165A1	-45615,71	211038,08	334,37	555615,76	5209526,55	380,92
68123-20E1	-45286,47	211157,72	333,15	555942,78	5209651,77	379,67
400-165A1	-44887,99	210790,19	324,56	556347,32	5209291,21	371,07

Die Berechnung der lokalen Transformationsparameter (*Tabelle 3.8*) erfolgte im Softwarepaket rmGEO4 (Versionsnr. 4.10.3819). Somit konnten die eingemessenen Passpunkte in den globalen Bezugsrahmen transformiert werden. Als Kontrolle für die Transformation wurde der Standpunkt des Polygonzuges (MP12) transformiert. Die Koordinatendifferenzen sind in *Tabelle 3.7* dargestellt.

Tabelle 3.7: Koordinatendifferenzen nach Transformation

Punkt ID	Differenzen (gemessen - transformiert)		
	ΔX [m]	ΔY [m]	Δh [m]
MP12	-0,04	-0,04	-0,03

Aus den in *Tabelle 3.7* gezeigten Transformationsfehlern und den Abschlussfehlern des Polygonzuges (*Tabelle 3.4*), ergibt sich ein mittlerer Punktlagefehler von 5 cm pro Passpunkt. Die Bodenauflösung eines Pixels im Bild betrug im Vergleich dazu 18 cm. Eine Übersicht der Passpunkte ist in *Abbildung 3.9* dargestellt.

Tabelle 3.8: Transformationsparameter

	Y	X	H
Drehpunkt [m]	-45244,698	211313,738	348,07
Verschiebung [m]	601226,552	4998494,664	46,542
Drehung [gon]	0,004340	399,99923	1,087677
Maßstab		0,999637	
mPLG [m]		0,044	

3.5.3 Geoidundulation

Für die in Kapitel 3.4 beschriebene Höhentransformation wurde eine Geoidhöhe benötigt. Sowohl für die Transformation der Passpunkte (Kapitel 3.5.2) als auch für die Höhentransformation (Kapitel 3.4) wurde eine konstante Geoidhöhe angenommen, da es sich um ein nur $1,5 \times 1$ km großes Gebiet handelte.

Die Bestimmung der Geoidundulation N erfolgte über die für die Bestimmung der Transformationsparameter in beiden Systemen eingemessenen amtlichen Festpunkte

(Tabelle 3.6). Ausgehend von Formel (3.3) wurde N für jeden Passpunkt bestimmt und anschließend das arithmetische Mittel gebildet (Tabelle 3.9).

Tabelle 3.9: Bestimmung der Geoidundulation N

Punkt ID	$h[m]$	$H[m]$	$N[m]$
245-165A1	433,77	387,22	46,55
18-165A1	410,82	364,24	46,58
442-165A1	380,92	334,37	46,55
68123-20E1	379,67	333,15	46,52
400-165A1	371,07	324,56	46,51
Mittelwert [m]			46,54
Standardabweichung [m]			0,03

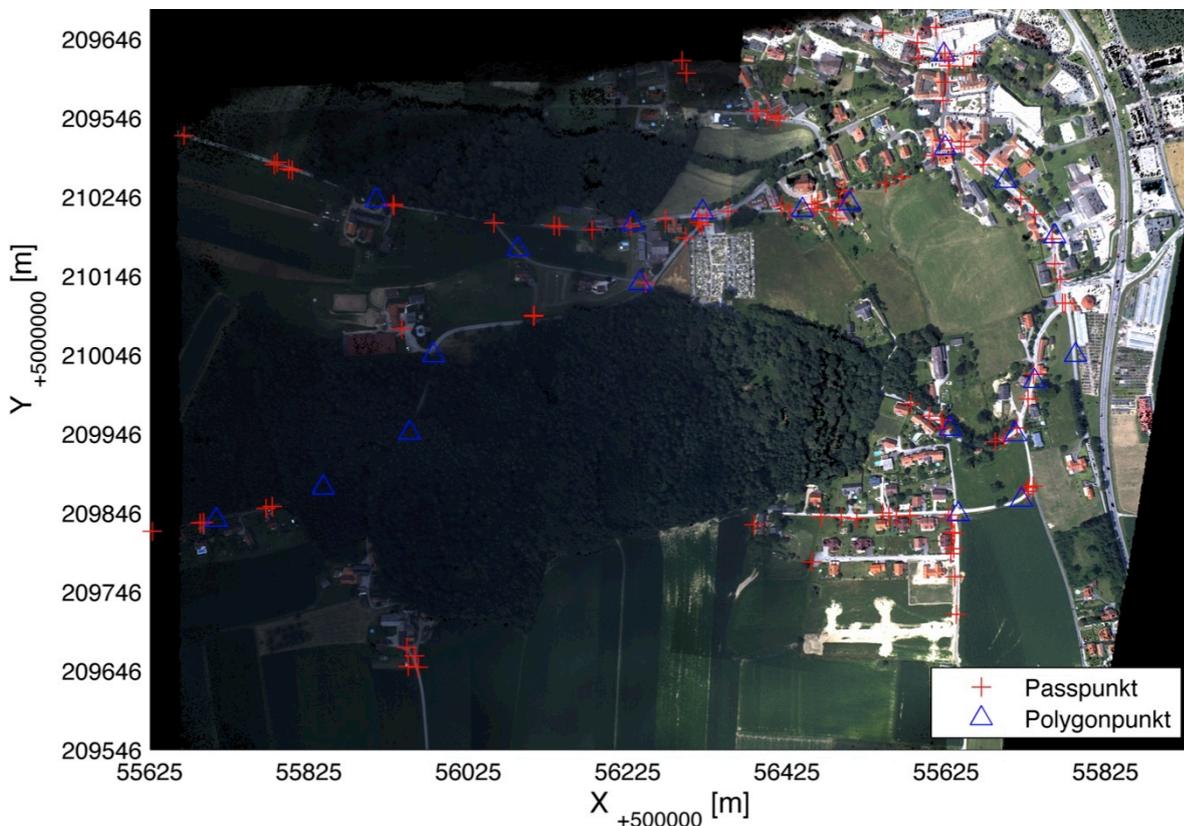


Abbildung 3.9: Lagedarstellung der Pass- und Polygonpunkte

4 Durchführung

Die Auswertungen wurden im Softwarepaket „Remote Sensing Software Package Graz“ (RSG) durchgeführt. RSG wurde in den letzten Jahrzehnten am Institut DIGITAL (Joanneum Research, Gruppe Fernerkundung und Geoinformation) entwickelt und ist eine umfassende und vielfältige Bildverarbeitungssoftware für die Fernerkundung (RSG, 2003).

4.1 Definition der Testszenarien

Für die Untersuchung wurde ein hoch redundanter Bilddatensatz mit einem Bildüberlappungsbereich von 93% erzeugt (siehe Kapitel 3.2). Davon ausgehend wurden insgesamt sechs unterschiedliche Testszenarien (*Tabelle 4.1*) vom identen Testgebiet, in Abhängigkeit des Bildüberlappungsbereiches, gebildet. Des Weiteren wurden zwei unterschiedliche Matchingverfahren angewendet.

Standardmäßig wurden bei analogen Messkameras für die Berechnung eines Oberflächenmodells aus Kostengründen zwei Bilder mit einem Bildüberlappungsbereich von 60% (in Flugrichtung) herangezogen. In *Abbildung 4.1* stellt dies schematisch *Image 1* und *Image 5* dar. Der Vorteil dieser Methode ist, dass ein robustes Verhältnis zwischen Aufnahmehöhe und dem Abstand der Projektionszentren besteht. Der Nachteil besteht jedoch darin, dass Lichtungen, aber auch tiefer liegende Baumspitzen, aufgrund der Aufnahmegeometrie nicht „gesehen“ werden können und zu Fehlern im Matchingergebnis und in weiterer Folge bei der Berechnung des Oberflächenmodells führen können.

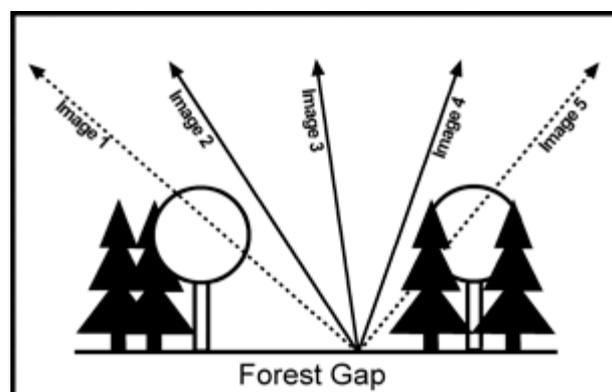


Abbildung 4.1: Projektionsstrahlen zur Oberflächenrekonstruktion, Quelle: (Hirschmugl, 2008)

Deshalb liegt es nahe, eine Oberfläche aus mehreren Projektionsstrahlen zu rekonstruieren. Wie in (Raggam, 2006) beschrieben, besteht der Vorteil darin, dass die

Bestimmung der Objektpunkte auf einer Ausgleichsrechnung basiert und mögliche falsche Matchingergebnisse detektiert werden können.

Das Testgebiet wurde mit einer maximalen Anzahl von 21 sequentiell aufgenommenen Luftbildern (siehe Kapitel 3.2), mit einem Bildüberlappungsbereich von 93%, abgedeckt. Das bedeutet, dass ein Objektpunkt aus maximal 15 Projektionsstrahlen rekonstruiert werden konnte. Ausgehend von dieser großen Redundanz war es möglich, verschiedene Testszenarien zu definieren. Testszenario 1 bestand aus allen zur Verfügung stehenden Luftbildern. Für das 2. Szenario wurde jedes zweite Bild verwendet und für Testszenario 3 nur mehr jedes Dritte.

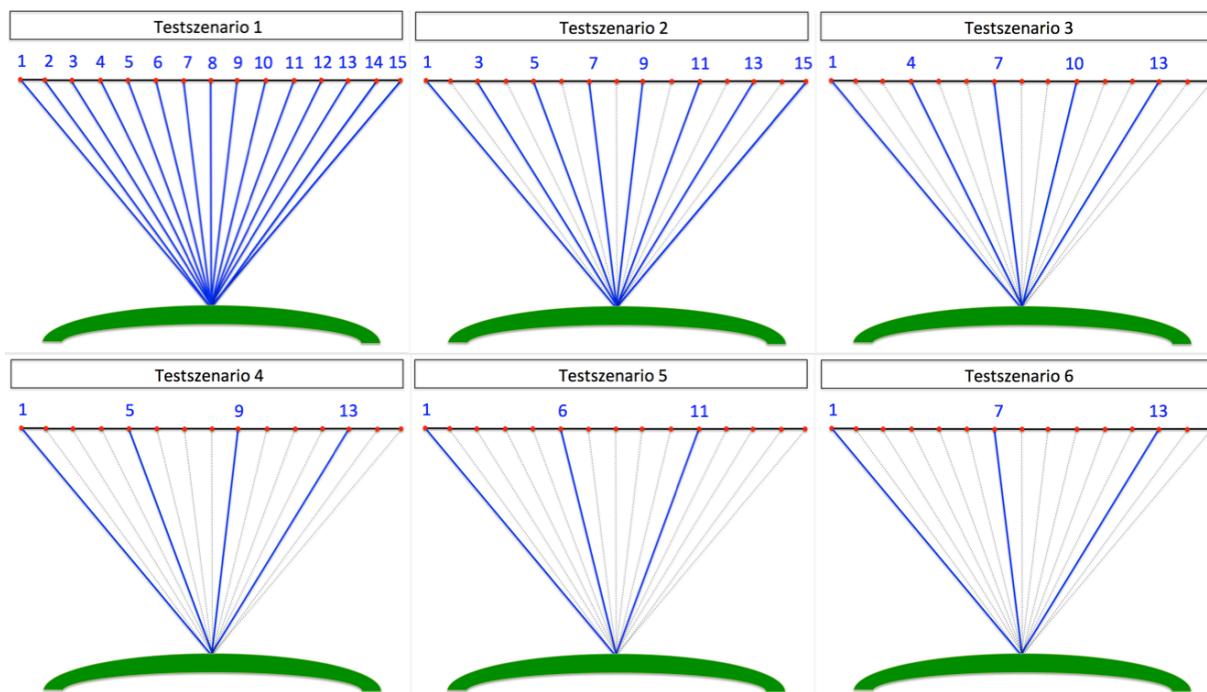


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Aufnahmegeometrien der Testszenarien

Der ursprüngliche Bilddatensatz wurde solange ausgedünnt, bis das gesamte Testgebiet von nur mehr insgesamt vier Luftbildern abgedeckt (Bildüberlappungsbereich 62%) und somit die Aufnahmegeometrie im analogen Fall wiedergegeben wurde. Dadurch entstanden insgesamt sechs Testszenarien, welche mit ihren korrespondierenden Bilderüberlappungsbereichen in *Tabelle 4.1* dargestellt sind. *Abbildung 4.2* zeigt schematisch die unterschiedlichen Aufnahmekonstellationen der verschiedenen Testszenarien für einen Objektpunkt. Sehr deutlich zu sehen ist, dass sich mit abnehmendem Bildüberlappungsbereich die Anzahl der Projektionsstrahlen für die Rekonstruktion eines Oberflächenpunktes verringert. Für jede Aufnahmekonstellation wurde anschließend ein digitales Oberflächenmodell vom Testgebiet berechnet mit dem

Ziel, die ideale Aufnahmegeometrie für die Ableitung eines DOM im Forstbereich zu finden.

Tabelle 4.1: Testszenarien

Testszenario	Bildoverlap [%]	Länge Basis [m]	Anzahl Bilder	Matching
1	93	36	21	Stereo
2	87	72	11	
3	81	108	7	
4	75	144	6	
5	68	180	5	
6	62	216	4	
11	93	36	21	Multibaseline
12	87	72	11	
13	81	108	7	
22	DOM aus Airborne Laser Scanning			

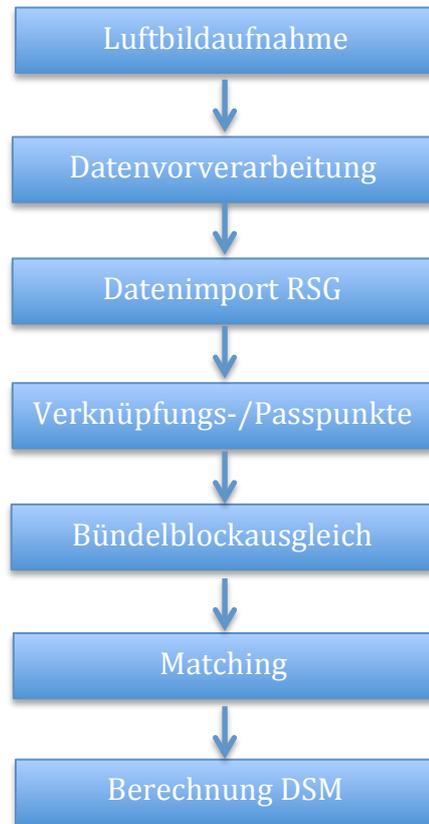
Für Testszenario 1 bis 3 konnte auf Grund des sehr hohen Bildüberlappungsbereiches ein Multibaseline-Matchingverfahren angewendet werden. Diese wurden als Testszenario 11, 12 und 13 bezeichnet. Somit wurden insgesamt neun digitale photogrammetrische Oberflächenmodelle berechnet. Die Unterschiede zwischen den beiden Matchingverfahren sind in Kapitel 4.7.1 und 4.7.2 beschrieben.

Zusätzlich erfolgte ein Vergleich der photogrammetrischen DOMs mit einem alternativen Modell um prinzipielle Aussagen über die Verwendbarkeit von photogrammetrische machen zu können. Dafür wurde ein Modell, welches mittels Airborne Laserscanning erzeugt wurde, herangezogen (siehe Kapitel 3.4) und als Testszenario 22 definiert.

Der verwendete Arbeitsfluss für die Berechnung der photogrammetrischen digitalen Oberflächenmodelle wird im folgenden Kapitel beschrieben.

4.2 Arbeitsfluss

Im folgenden Flussdiagramm werden die einzelnen Arbeitsschritte von der Luftbildaufnahme bis zur Berechnung des digitalen Oberflächenmodells dargestellt.



4.3 Datenvorverarbeitung

4.3.1 Bayer Pattern

Für die Luftbildaufnahmen wurde eine digitale CCD Kamera verwendet (siehe Kapitel 3.2). Der Sensor solch einer Kamera ist mit einem Farbfilterarray (color filter array , CFA) überlagert. Daraus resultiert ein enormer Vorteil, denn es können somit Farbbilder (3 Kanäle) mit nur einem CCD Sensor (1 Kanal) aufgenommen werden. Der bekannteste Farbfilter wird „Bayer pattern“ genannt (siehe (Bayer, 1976)). In *Abbildung 4.3* ist das Farbschema dargestellt. Dabei wird das CCD Array mit 50% grünen und jeweils 25% blauen und roten Pixeln abgedeckt (Perko, 2004).

R ₁₁	G ₁₂	R ₁₃	G ₁₄	R ₁₅	G ₁₆	R ₁₇
G ₂₁	B ₂₂	G ₂₃	B ₂₄	G ₂₅	B ₂₆	G ₂₇
R ₃₁	G ₃₂	R ₃₃	G ₃₄	R ₃₅	G ₃₆	R ₃₇
G ₄₁	B ₄₂	G ₄₃	B ₄₄	G ₄₅	B ₄₆	G ₄₇
R ₅₁	G ₅₂	R ₅₃	G ₅₄	R ₅₅	G ₅₆	R ₅₇
G ₆₁	B ₆₂	G ₆₃	B ₆₄	G ₆₅	B ₆₆	G ₆₇
R ₇₁	G ₇₂	R ₇₃	G ₇₄	R ₇₅	G ₇₆	R ₇₇

Abbildung 4.3: Beispiel eines 7 x 7 Bayer pattern mit 50% grünen und jeweils 25% rot und blauen Pixeln am CCD, Quelle: (Perko, 2004)

In *Abbildung 4.4* befindet sich ein Ausschnitt eines Luftbilds des Testgebiets. Um nun ein RGB Bild zu erhalten, muss das Luftbild demosaikiert werden. Das bedeutet, dass die fehlenden Farbpixel interpoliert werden müssen (siehe (Perko, 2004) Kapitel 6.1). Mögliche Interpolationsmethoden sind in (Perko, 2004) Kapitel 6.3 dargestellt.



Abbildung 4.4: Oben: einkanaliges Bild mit Bayer Pattern, unten: interpoliertes RGB-Bild

Die Demosaikierung wurde in der Impact Toolbox implementiert (Abbildung 4.5). Neben der Auswahl des Ein- und Ausgabebildes muss noch zusätzlich die Anordnung der Pixel des Patterns angegeben werden. Für die Prosilica GE4900C wurde „gb“ ausgewählt. Das bedeutet, dass es sich bei den ersten beiden Pixeln des *Bayer Patterns* in der ersten Zeile um ein grünes bzw. blaues Pixel handelt.

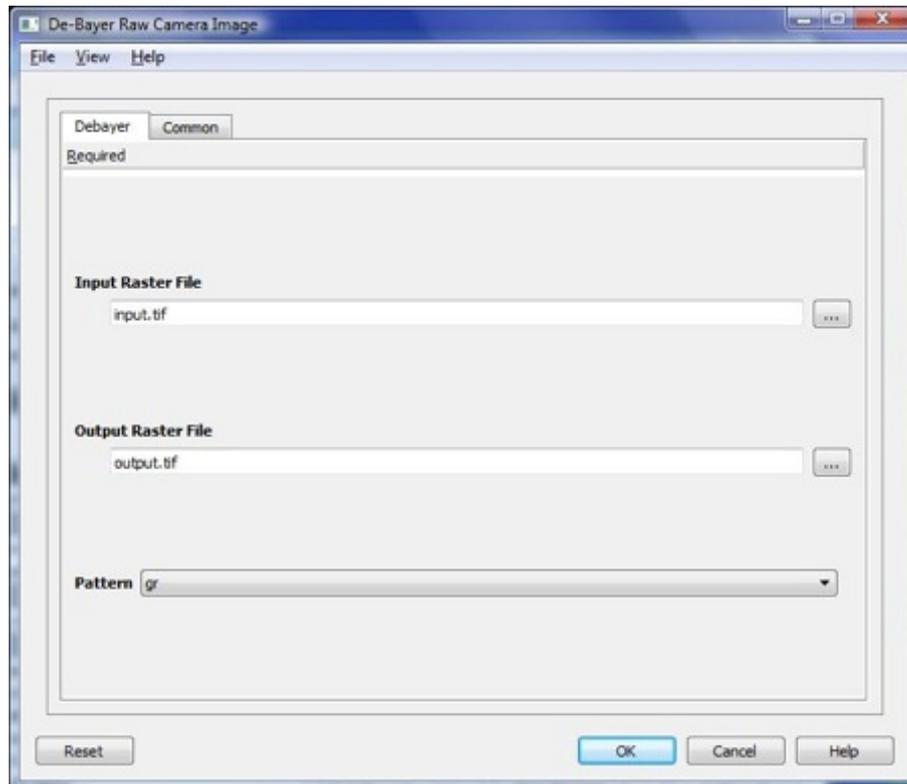


Abbildung 4.5: De-bayering in Impact Toolbox

4.3.2 Datenimport RSG & Verzeichnungskorrektur

Der erste Schritt in der Datenvorverarbeitung ist der Datenimport in RSG. Dafür wurde ein Skript (*prox adam_menu*, ADAM Data Processing Menu) verwendet. Dabei werden einerseits die Bilddaten und andererseits die korrespondierenden Metadaten, die aus der kombinierten GPS/IMU Auswertung (Kapitel 3.3) der Befliegung stammen, in RSG eingelesen.

In einem ersten Schritt wird die Ordnerstruktur im Arbeitsverzeichnis, welche RSG benötigt, angelegt. Es erfolgt die Festlegung des Bezugsrahmens und der Projektion (WGS84/UMT33N) und die sogenannten ADAM-Pakete werden erstellt. Ein ADAM-Paket besteht aus einem Luftbild im .tif-Format und einem .aai-Paket. AAI bedeutet „*ADAM Acquisition Image*“. Das AAI-Paket beinhaltet sämtliche Metainformationen zu dem

zugehörigen Luftbild welche bei der Verzeichnungskorrektur bzw. bei der Bündelblockausgleichung benötigt werden:

- GPS Woche und GPS Zeit
- Projektionszentrum & Standardabweichungen (geographischen Koordinaten)
- Drehwinkel & Standardabweichungen (Pitch, Roll, Yaw)
- Sensortyp
- Daten der Kamera-und Aufnahmeplattformkalibrierungen
- Namen des korrespondierenden Bildes

Im zweiten Teil des Datenimports werden einerseits zu allen Bilddaten die **.rsx**-Files und **.PAR**-Files erstellt und andererseits können auf die Bilddaten Rasteroperationen angewendet werden.

Rsx ist ein Deskriptor für Bilddatenformate in RSG, welches sämtliche bildbezogene Informationen speichert. Diese sind u. A. die Auflösung des Bildes, die Anzahl der Kanäle, die Orientierung des Bildes und die Farbtiefe. In den Parameterfiles (**PAR**-Files) werden alle Informationen abgespeichert, welche für die innere und äußere Orientierung benötigt werden. Dies sind u.a. die Projektionszentren und Ausrichtung der Kamera plus deren Standardabweichungen, die Flughöhe über Grund, die Hauptpunktverschiebung und Koeffizienten der Verzeichnung. Beide Files, **.rsx** und **.PAR**, werden im XML-Format gespeichert.

Wie zuvor schon erwähnt, können in diesem Bearbeitungsschritt noch Rasteroperationen auf die Bilddaten angewendet werden. In diesem Fall wurde die Verzeichnung für jedes Bild herausgerechnet.

4.3.3 Korrektur der Vignettierung

In Kapitel 2.1.2 wird die Problematik der Vignettierung und des Lichtabfalles zu den Bildrändern hin in einem Luftbild erläutert.

Die Helligkeitsabnahme zu den Bildrändern hin musste korrigiert werden, da andernfalls im Bild Intensitätsunterschiede entstehen, welche jedoch nicht in der Natur auftreten, sondern rein aus den in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Gründen resultieren. Dies könnte

beim Matching zu inkorrekten Disparitäten führen. Für die Korrektur stand ein Kalibrierungsbild (*Abbildung 4.6*) zur Verfügung.



Abbildung 4.6: Vignettierungsmaske

Jedes Pixel des Kalibrierungsbildes beinhaltet einen multiplikativen Korrekturwert pro Bildkanal. Mit Formel 4.1 wird jedes Pixel des Originalbildes korrigiert:

$$P_{N(x,y)} = \frac{P_0(x,y)}{V(x,y)} \quad (4.1)$$

mit

P_N Pixelwert des korrigierten Bildes an der Stelle (x,y)

P_0 Pixelwert des originalen Bildes an der Stelle (x,y)

V Korrekturwert an der Stelle (x,y)

In *Abbildung 4.7* ist ein Originalbild mit einem korrigierten Bild (Korrektur der Vignettierung) gegenübergestellt. Deutlich zu sehen ist der Unterschied in der Helligkeit am linken Bildrand der Bildausschnitte.



Abbildung 4.7: Einfluss der Vignettierung und der Verzeichnung, links: Originalbild, rechts: Bild mit entfernter Vignettierung und Verzeichnung

Somit wurden zum einen aus den rohen Aufnahmen RGB Luftbilder erstellt und zum anderen jene Einflüsse aus Bilddaten entfernt, welche das Matching negativ beeinflussen. Basierend auf diesen korrigierten Bilddaten konnten nun die weiteren Arbeitsschritte durchgeführt werden.

4.4 Verknüpfungspunkte

Um eine steife Verbindung zwischen den einzelnen Bildern zu erhalten, mussten Verknüpfungspunkte im Bildüberlappungsbereich jedes Bildpaares berechnet werden. Dieser Arbeitsschritt sollte jedoch automatisiert durchgeführt werden. Deshalb wurde nach einem geeigneten Algorithmus für die automatische Generierung von Verknüpfungspunkten gesucht. Da sich bereits in anderen Projekten „*Speeded Up-Robust Features*“ (SURF) bewährt hatte, wurde ein bereits bestehendes Softwaremodul herangezogen. Der theoretische Hintergrund zu *SURF* ist in Kapitel 2.5.4 beschrieben.

Der wesentliche Vorteil von *SURF* besteht darin, dass einerseits keine Information über die Geometrie der Luftbilder für die automatisierte Suche von Verknüpfungspunkten vorhanden sein muss. Andererseits ist dieser Detektor und Deskriptor maßstabs- und rotationsinvariant.

Die Suche nach Verknüpfungspunkten mit SURF erfolgte für jeweils ein Bildpaar. Das heißt, es wurden Tiepoints zwischen Bild 1 und Bild 2, dann zwischen Bild 2 und Bild 3 usw. gesucht. Bei diesem Verfahren werden zuerst in jedem der zwei Bilder Kandidaten für mögliche Verknüpfungspunkte gesucht. Dies sind die sogenannten „*Interest Points*“. Die Eigenschaften eines IPs werden mit dem Deskriptor beschrieben und im „*feature vector*“ abgespeichert. Im letzten Schritt werden die Vektoren einander zugeordnet um somit die korrespondierenden Punkte zu finden.

Pro Bildpaar wurden mit den gewählten Programmeinstellungen ungefähr 39000 Kandidaten gefunden. Aus diesen beiden Punktwolken wurden anschließend ca. 6400 Verknüpfungspunkte pro Bildpaar gefunden.

Dies ist eine sehr hohe Anzahl von Verknüpfungspunkten pro Stereopaar, welche aber nicht benötigt wird. Der Nachteil des SURF Moduls liegt darin, dass keine Bedingung für die Verteilung der Verknüpfungspunkte eingestellt werden konnte. Deshalb musste eine sehr hohe Anzahl von Verknüpfungspunkten definiert werden. In einem ersten Ansatz wurden so viele Verknüpfungspunkte wie möglich berechnet, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Punkte über den gesamten Bildüberlappungsbereich zu erzielen (siehe *Abbildung 4.8*). Als Ergebnis wurde für jedes Bild ein sogenanntes „*Column Line File*“ (CL-File) mit einer temporären ID und den Bildkoordinaten für jeden Verknüpfungspunkt erstellt.

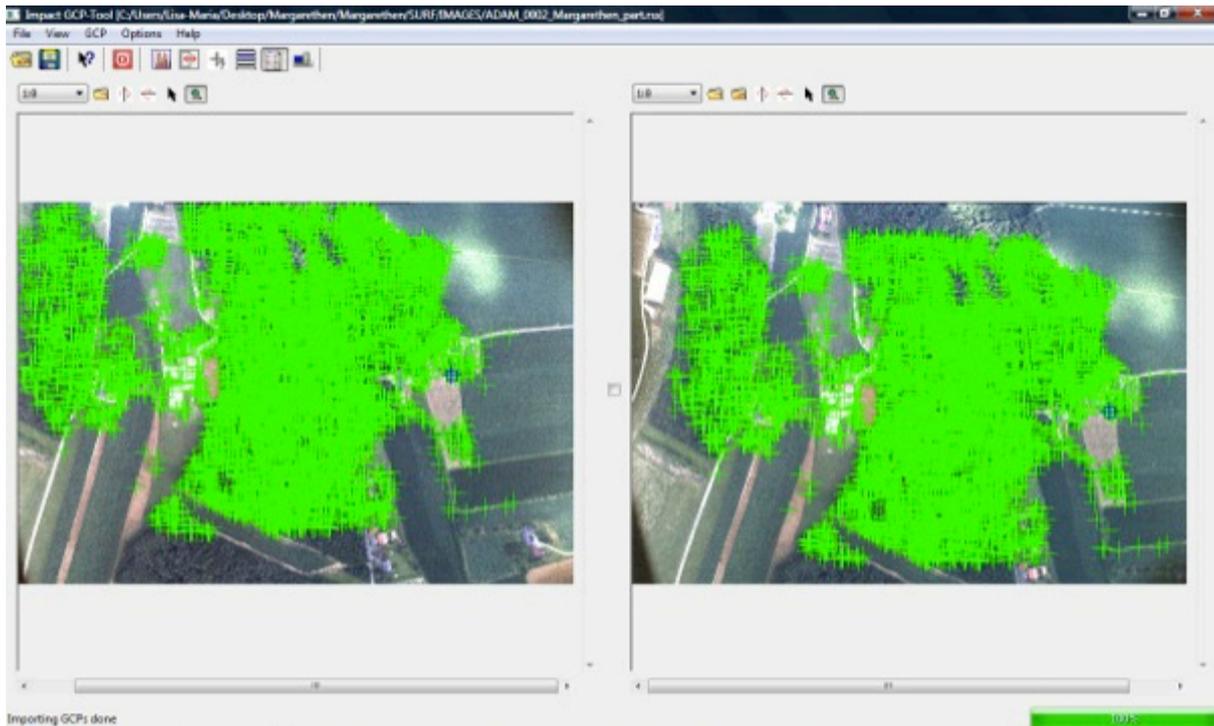


Abbildung 4.8: Homologe Punkte in den Bildern ADAM_0001_Margarethen und ADAM_0002_Margarethen

Im nächsten Schritt wurde ein weiteres Softwaretool angewendet, welches für idente Punkte in unterschiedlichen Bildern eine einheitliche ID vergibt. Dies war von großer Bedeutung. Denn beim Bündelblockausgleich (Kapitel 4.6) wurde festgestellt, dass Verknüpfungspunkte, welche nur in benachbarten Bildern vorkommen, das Ergebnis verschlechtern. Der Grund dafür liegt im sehr hohen Bildüberlappungsbereich von 93% und der dadurch entstehenden schleifenden Schnittgeometrie. Tiepoints, welche nur in zwei Bildern vorkommen, destabilisieren den gesamten Bildverband.

Aufgrund dieser Erkenntnis wurde dieser Ansatz erweitert. Dafür wurde in Matlab eine Funktion entwickelt, welche es ermöglicht, aus sämtlichen Tiepoints aller Bilder jene zu suchen, die in mindestens acht Bildern enthalten sind (entspricht einem Bildüberlappungsbereich von 57%, siehe *Abbildung 4.9*).

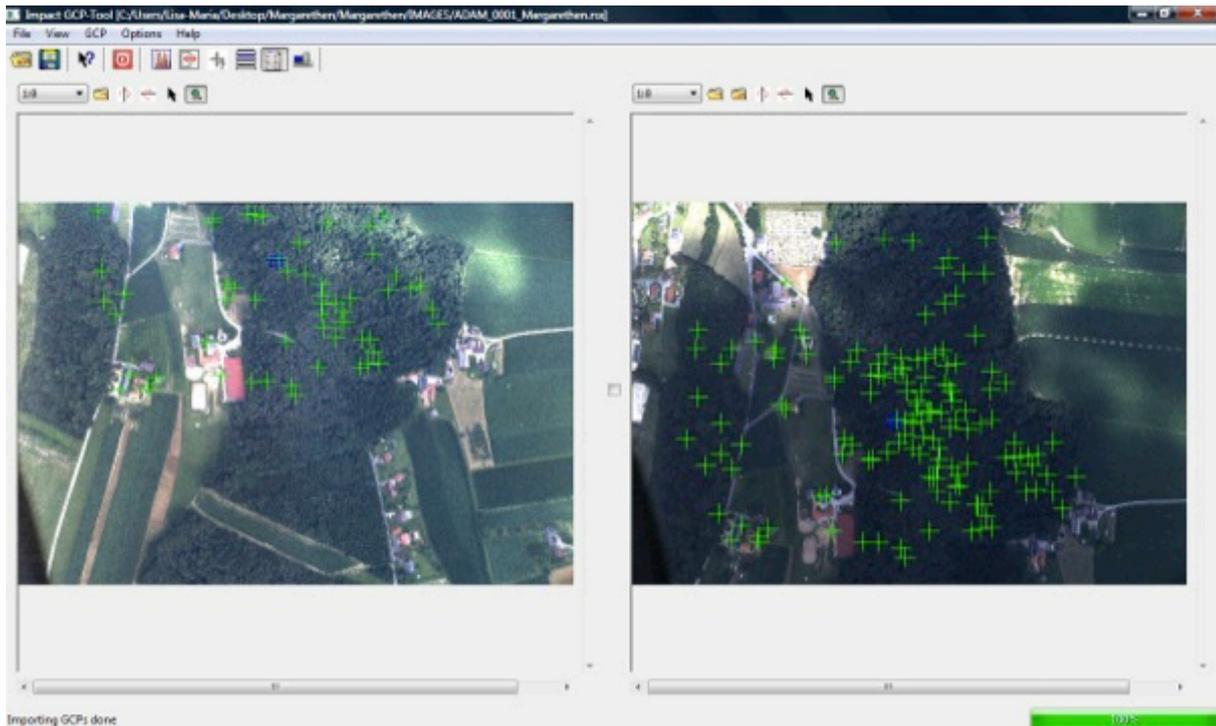


Abbildung 4.9: Verknüpfungspunkte zwischen Bild 1 und Bild 8

Für die weiteren Untersuchungen wurden deshalb nur mehr jene Verknüpfungspunkte herangezogen, die diese Bedingung erfüllten. Ein weiterer Vorteil, der aus dieser Bedingung resultiert, liegt darin, dass für alle Testszenarien die identen Verknüpfungspunkte verwendet werden konnten. Eventuelle Einflüsse auf die Ergebnisse der jeweiligen Bündelblockausgleichung, aufgrund von unterschiedlichen Verteilungen der Tiepoints, konnten somit ausgeschlossen werden. In *Abbildung 4.10* befindet sich die Anzahl der Verknüpfungspunkte pro Bild.

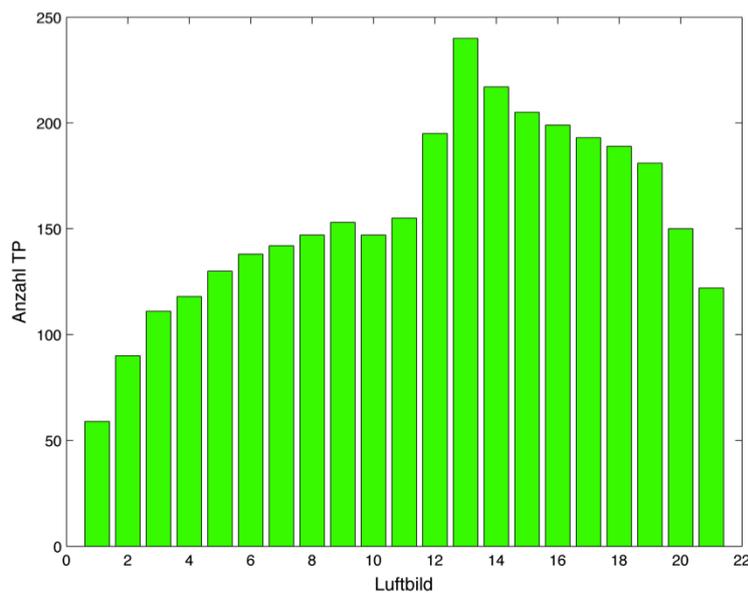


Abbildung 4.10: Anzahl der Verknüpfungspunkte pro Luftbild

4.5 Einmessen der Passpunkte

Die Einmessung der Passpunkte erfolgte im Point Measurement Tool in RSG. In jedem Bild wurden alle sichtbaren Passpunkte eingemessen (*Abbildung 4.11*).

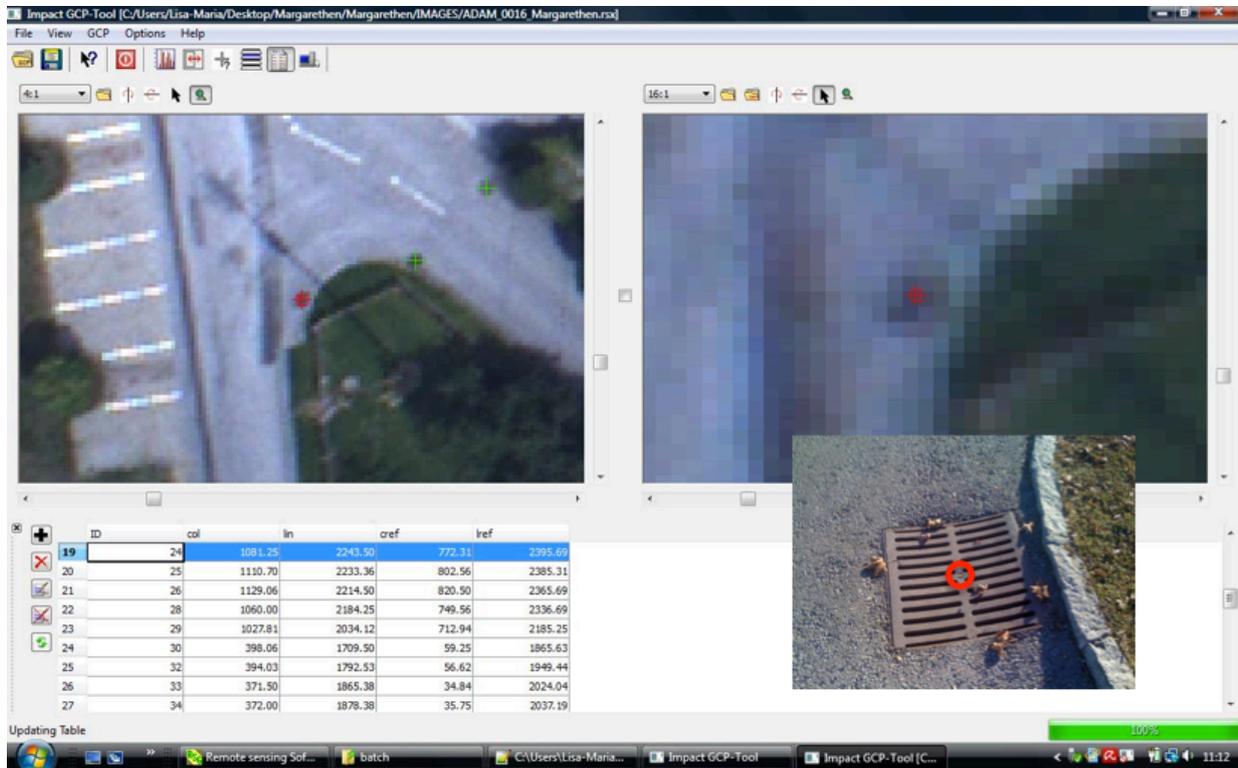


Abbildung 4.11: Einmessung Passpunkte im GCP Tool mit Detailfoto PP 24

Pro Luftbild wurden, wie bei den Verknüpfungspunkten, die Bildkoordinaten der Passpunkte in einem separaten CL-File gespeichert.

Anschließend wurden die Bildkoordinaten aller Pass- und Verknüpfungspunkte eines Bildes in ein gemeinsames CL-File zusammengefügt. Danach wurde ein „Point-File“ (**PNT-File**) mit Hilfe des *PNTM-Tools* (Point Management) erstellt. Dabei wurden den Bildkoordinaten der Passpunkte die korrespondierenden Objektkoordinaten zugewiesen und es erfolgte die Überführung der CL-Files in das RSG Punktformat. Das **.PNT-File** enthielt somit sämtliche Informationen über die Pass- und Verknüpfungspunkte pro Luftbild. Dies wurde bei der Bündelblockausgleichung (Kapitel 4.6) im nächsten Arbeitsschritt benötigt.

Anmerkung

Alle bisherigen Arbeitspakete - die Datenvorverarbeitung, der Datenimport in RSG, das Generieren der Verknüpfungspunkte und die Einmessung der Passpunkte - mussten nur einmal für das gesamte Projekt durchgeführt werden.

Die folgenden Punkte, der Bündelblockausgleich, das Matching und die Berechnung des digitalen Oberflächenmodells mussten für jedes photogrammetrische Testszenario gesondert ausgeführt werden – also insgesamt neun Mal.

4.6 Bündelblockausgleich

Beim Bündelblockausgleich erfolgte mit Hilfe des „*Geometric Parameter Adjustments*“ in RSG die Bestimmung der äußeren Orientierungsparameter simultan für alle Bilder eines Blockes (Kapitel 2.4.2).

Die Bestimmung der Parameter erfolgt im Sinne der Ausgleichsrechnung nach kleinsten Quadraten und basiert einerseits auf den eingemessenen Passpunkten (Kapitel 4.5) und andererseits auf den Näherungswerten der kombinierten GPS/IMU Auswertung (Kapitel 3.3). Der Ausgleich ist ein iterativer Prozess, welcher durch eine Abbruchbedingung (wenn Schwellwert für die Linearisierungsgenauigkeit unterschritten wird) oder durch die Vorgabe einer maximalen Anzahl an Iterationen beendet wird (RSG, 2003).

Bevor mit der Bündelblockausgleichung jedoch begonnen werden konnte, musste noch ein „*Blockfile*“ (BLK-File) definiert werden. Diese Datei enthält Einträge für alle zum Block zugehörigen Bilder (.rsx), und deren Parameter- (.PAR) und Point-Files (.PNT). Das BLK-File des 3. Testszenarios ist in *Abbildung 4.12* dargestellt.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<RSGBlockModel>
  <!--RSG-model for image block - Do not modify manually!-->
  <IMAGES>
    <IMG imageraster="..\IMAGES\ADAM_0001_Margarethen.rsx" modelfile="ADAM_0001_Margarethen" gcpfile="ADAM_0001_Margarethen.PNT" id="1"/>
    <IMG imageraster="..\IMAGES\ADAM_0004_Margarethen.rsx" modelfile="ADAM_0004_Margarethen" gcpfile="ADAM_0004_Margarethen.PNT" id="2"/>
    <IMG imageraster="..\IMAGES\ADAM_0007_Margarethen.rsx" modelfile="ADAM_0007_Margarethen" gcpfile="ADAM_0007_Margarethen.PNT" id="3"/>
    <IMG imageraster="..\IMAGES\ADAM_0010_Margarethen.rsx" modelfile="ADAM_0010_Margarethen" gcpfile="ADAM_0010_Margarethen.PNT" id="4"/>
    <IMG imageraster="..\IMAGES\ADAM_0013_Margarethen.rsx" modelfile="ADAM_0013_Margarethen" gcpfile="ADAM_0013_Margarethen.PNT" id="5"/>
    <IMG imageraster="..\IMAGES\ADAM_0016_Margarethen.rsx" modelfile="ADAM_0016_Margarethen" gcpfile="ADAM_0016_Margarethen.PNT" id="6"/>
    <IMG imageraster="..\IMAGES\ADAM_0019_Margarethen.rsx" modelfile="ADAM_0019_Margarethen" gcpfile="ADAM_0019_Margarethen.PNT" id="7"/>
  </IMAGES>

```

Abbildung 4.12: Blockfile Testszenario 3

Nach der Definition des Blockfiles erfolgte die Mehrbildorientierung. Folgende Einstellungen wurden für die Ausgleichung getroffen:

Die Anzahl der maximalen Iterationen wurde mit 30 und das Limit für die Linearisierungsgenauigkeit wurde mit 10^{-9} festgelegt. Des Weiteren wurde die automatische Punktverwerfung aktiviert und für den RMS Faktor 2 gewählt. Dieser Wert gibt den Multiplikationsfaktor für den RMS eines Punktes an, ab welchem dieser verworfen wird. Für die Näherungswerte der Projektionszentren und der Drehwinkel der Kamera, welche die Ausrichtung im Raum beschreiben, wurde die Gewichtung aktiviert, da unterschiedliche Messgenauigkeiten der Beobachtungen vorlagen.

Die Ausgleichung erfolgte nach dem Prinzip der weichen Lagerung. Dabei werden die Koordinaten der Passpunkte als Beobachtungen aufgefasst und erhalten Verbesserungen. Dies bedeutet, dass eventuelle Spannungen im Passpunktnetz, in Abhängigkeit der Gewichtung der Beobachtungsgruppen, auf das Netz der Strahlenbündel übertragen werden.

Das Ergebnis der Mehrbildorientierung waren die ausgeglichenen Koordinaten der Projektionszentren, X, Y, Z , im Objektkoordinatensystem und die ausgeglichenen Drehwinkel Ω, Φ, K . In *Abbildung 4.13* befindet sich ein Auszug aus dem Ausgleichsprotokoll des Bündelblockausgleichs des 3. Testszenarios.

PARAMETER ADJUSTMENT RESULTS			IMAGE: ADAM_0001_Margarethen		
	Initial value	Total increment	Adjustment increment	Adjusted value	Mean error

Camera Position:					
X [m]:	555891.441	-0.112	0.000	555891.329	0.138
Y [m]:	5209949.237	-0.093	0.000	5209949.144	0.131
Z [m]:	1643.230	0.291	0.000	1643.521	0.056
Camera Rotation:					
Omega[°]:	0.048000	0.069342	0.000000	0.117342	0.005985
Phi[°]:	-1.183000	-0.027339	0.000000	-1.210339	0.006287
Kappa[°]:	0.865000	-0.159330	0.000000	0.705670	0.002874
c [px]:	6918.507			6918.507	

PARAMETER ADJUSTMENT RESULTS			IMAGE: ADAM_0004_Margarethen		
	Initial value	Total increment	Adjustment increment	Adjusted value	Mean error

Camera Position:					
X [m]:	555994.463	-0.171	0.000	555994.292	0.136
Y [m]:	5209948.555	-0.154	0.000	5209948.401	0.128
Z [m]:	1644.160	0.350	0.000	1644.510	0.052
Camera Rotation:					
Omega[°]:	0.159000	0.048861	0.000000	0.207861	0.005900
Phi[°]:	0.610000	-0.024277	0.000000	0.585723	0.006261
Kappa[°]:	358.398020	-0.146962	0.000000	358.251058	0.002701
c [px]:	6918.507			6918.507	

Abbildung 4.13: Auszug Protokoll Bündelblockausgleich Testszenario 3

Des Weiteren kann dem Ausgleichsprotokoll auch eine zusammenfassende Statistik der Residuen der Pass- und Verknüpfungspunkte entnommen werden (*Abbildung 4.14*).

CONTROL POINT RESIDUAL SUMMARY STATISTICS

Image	RMS-X	RMS-Y	RMS-XY	No. Pnts
ADAM_0001_Margarethen	0.51	0.71	0.87	16
ADAM_0004_Margarethen	0.57	0.70	0.90	14
ADAM_0007_Margarethen	0.38	0.56	0.67	19
ADAM_0010_Margarethen	0.32	0.54	0.63	24
ADAM_0013_Margarethen	0.35	0.72	0.80	31
ADAM_0016_Margarethen	0.28	0.61	0.67	38
ADAM_0019_Margarethen	0.39	0.78	0.87	50

TIE-POINT RESIDUAL SUMMARY STATISTICS

Image	RMS-X	RMS-Y	RMS-XY	No. Pnts
ADAM_0001_Margarethen	0.25	0.44	0.51	57
ADAM_0004_Margarethen	0.19	0.43	0.47	126
ADAM_0007_Margarethen	0.21	0.38	0.44	149
ADAM_0010_Margarethen	0.15	0.42	0.45	139
ADAM_0013_Margarethen	0.10	0.38	0.40	213
ADAM_0016_Margarethen	0.13	0.31	0.34	258
ADAM_0019_Margarethen	0.08	0.32	0.33	220

Abbildung 4.14: Statistik Bildkoordinaten der Pass- und Verknüpfungspunkte Testszenario 3

Zusätzlich wird in einem weiteren Protokoll eine detaillierte Statistik zu jedem einzelnen Bild des Blockes angegeben. Die 2D-Residuen der Passpunkte können auch graphisch dargestellt werden (Abbildung 4.15).

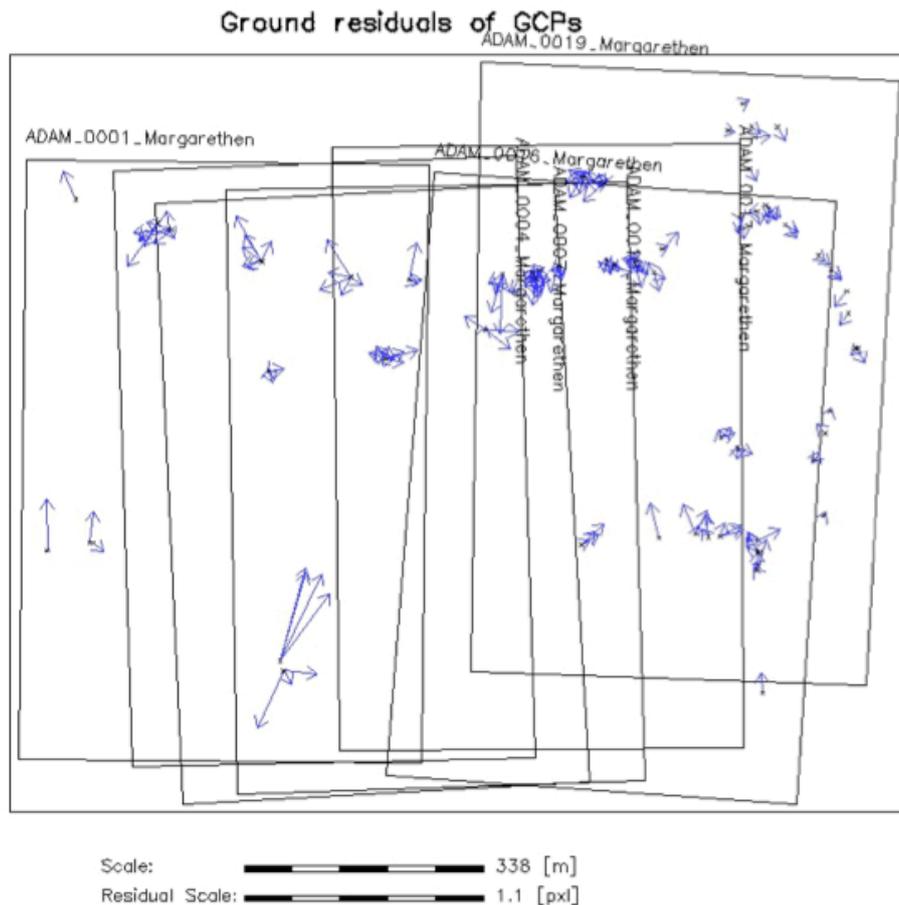


Abbildung 4.15: Plot der Residuen der GCPs, Testszenario 3

Der RMS der 3D-Residuen der Passpunkte wird in einem dritten Protokoll ausgegeben. Die 3D-Residuen geben die Aufsetzgenauigkeit des jeweiligen Blockes wieder. In *Tabelle 4.2* sind diese für jedes photogrammetrische Testszenario dargestellt.

Tabelle 4.2: Aufsetzgenauigkeiten der Blöcke der Testszenarien

Testszenario	Res-X [m]	Res-Y [m]	Res-Z [m]
1	0,06	0,11	0,33
2	0,06	0,12	0,34
3	0,05	0,11	0,32
4	0,06	0,11	0,37
5	0,05	0,10	0,30
6	0,03	0,09	0,31
11	0,05	0,10	0,29
12	0,06	0,12	0,43
13	0,06	0,10	0,40

4.7 Matching

Das Ziel des Matchingverfahrens ist es, die korrespondierenden Pixel eines Referenzbilds im Suchbild zu finden und den Versatz (die Disparität) zwischen den Bildern zu bestimmen (*Abbildung 4.16*). Dafür werden sogenannte Kostenfunktionen benötigt, mit welchen Ähnlichkeitsmaße für jedes Pixel im Referenz- und Suchbild bestimmt werden. Dem aktuellen Pixel im Referenzbild entspricht jenes Pixel im Suchbild, bei welchem die geringsten Kosten, und somit die höchste Ähnlichkeit, bestehen. Die Disparitäten werden in weiterer Folge für die Berechnung von digitalen Oberflächenmodellen benötigt (Kapitel 2.6).

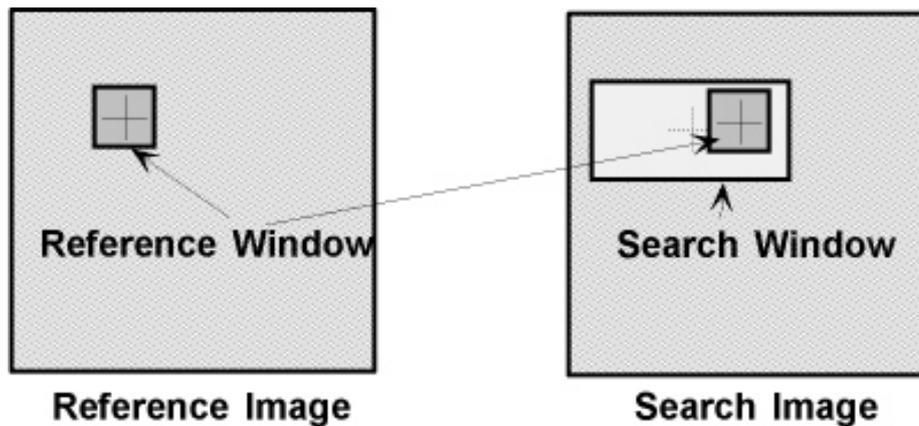


Abbildung 4.16: Matchingkonzept

Bei dieser Masterarbeit wurde „*Semi-Global Matching*“ (SGM) verwendet. Dies ist ein hierarchischer Ansatz, der auf dem Konzept des „*Hierarchical Feature Vector Matchings*“ (HFVM, siehe (Paar & Pözlleitner, 1992)) aufbaut.

In den folgenden zwei Kapiteln werden die beiden unterschiedlichen Matchingverfahren, welche Anwendung gefunden haben, beschrieben.

4.7.1 Sequentielles Matching

Für Testszenario 1 bis 6 wurde das Matching auf die jeweiligen Stereobildpaare angewendet. Das heißt, für Testszenario 1 wurde Bild 1 im Block mit Bild 2 gematched. Anschließend wurde die „*disparity map*“ für Bild 2 und 3, dann für Bild 3 und 4 usw. bestimmt. Jede Aufnahme im Block wurde somit mit dem nachfolgenden Bild gematched bis die Disparitäten zwischen Bild 20 und 21 bestimmt wurden.

Für Testszenario 2 wurde dasselbe Verfahren angewendet. Jedoch wurde nur jedes zweite Bild für das Matching herangezogen. Das bedeutete, dass Bild 1 mit 3, Bild 3 mit 5, Bild 5 mit 7 usw. zugeordnet wurde. Bei Testszenario 3 wurden dann jedes dritte Bild, nämlich Bild 1, Bild 4, Bild 7,... , verwendet bis schlussendlich das letzte Luftbild im zugehörigen Block erreicht wurde. Nach dieser Vorgehensweise wurde für die restlichen Szenarien vorgegangen, bis letztendlich das gesamte Testgebiet nur mehr von 4 Bildern abgedeckt wurde (Testszenario 6). Die einzelnen Blöcke der Testszenarien und die korrespondierenden Bilder sind in *Tabelle 4.3* angegeben.

Tabelle 4.3: Bilder für sequentielles Matching

TestszENARIO	Verwendete Bilder für das Matching
1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21
2	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21
3	1, 4, 7, 10, 13, 16, 19
4	1, 5, 9, 13, 17, 21
5	1, 6, 11, 16, 21
6	1, 7, 13, 19

Das sequentielle Matchingverfahren setzte eine strenge epipolare Registrierung der Bildpaare voraus. Dazu wurden die Verknüpfungspunkte (Kapitel 4.4) herangezogen, mit welchen ein PNT-File angelegt wurde.

Anschließend erfolgte der „Tie-point Block Adjustment“ (TPA). Basierend auf den Verknüpfungspunkten wurde mittels Ausgleichrechnung das Transformationspolynom (projektives Polynom) zwischen den Bildern bestimmt. Wie die Bündelblockausgleichung ist auch der TPA ein iterativer Prozess, welcher entweder nach einer bestimmten Anzahl an Iterationen oder nach dem Erreichen eines bestimmten Genauigkeitslimits beendet wird. Die Bestimmung des projektiven Polynoms erfolgte nach dem Ansatz von (Fusiello & Irsara, 2008), welcher auch in Kapitel 2.5.3 beschrieben ist (RSG, 2003).

Um die Forderung der epipolaren Registrierung erfüllen zu können, musste noch die Richtung der Achse angegeben werden, entlang welcher die Disparitäten auftreten (*x-is-main*). Das Ergebnis war ein aktualisiertes PNT-File, welches das Transformationspolynom beinhaltet.

Im nächsten Schritt erfolgte die epipolare Registrierung der Bilder. Dafür wurde das Modul „Polynomial Rectification/Registration“ (POLR) herangezogen. Dabei wurde ein Suchbild mit Hilfe des zuvor bestimmten Polynoms auf die Geometrie des Referenzbildes registriert (RSG, 2003). Das Such- und Referenzbild sind in *Abbildung 4.17* dargestellt.



Abbildung 4.17: Ausgangsbilder 13 (links) und 14 (rechts)

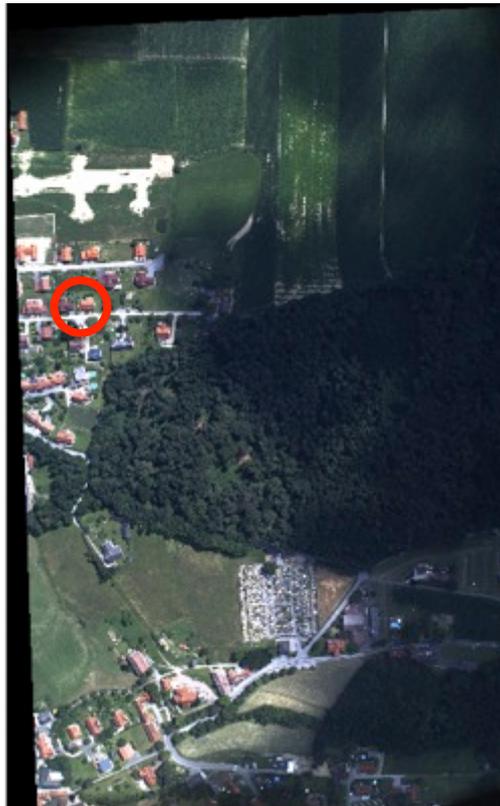


Abbildung 4.18: epipolar registrierte Bilder 13 auf 14

In *Abbildung 4.19* ist ein Beispiel (Hausdach, roter Kreis in *Abbildung 4.18*) für zwei aufeinander epipolar registrierte Bilder dargestellt. Auf der linken Seite war Bild 13 das Referenzbild und Bild 14 das Suchbild. Auf der rechten Seite wurden diese vertauscht. Gut ersichtlich ist, dass in y -Richtung keine Disparitäten mehr vorhanden sind, sondern nur mehr entlang der horizontalen Achse (siehe Punktkoordinaten in der Tabelle am unteren Bildrand).

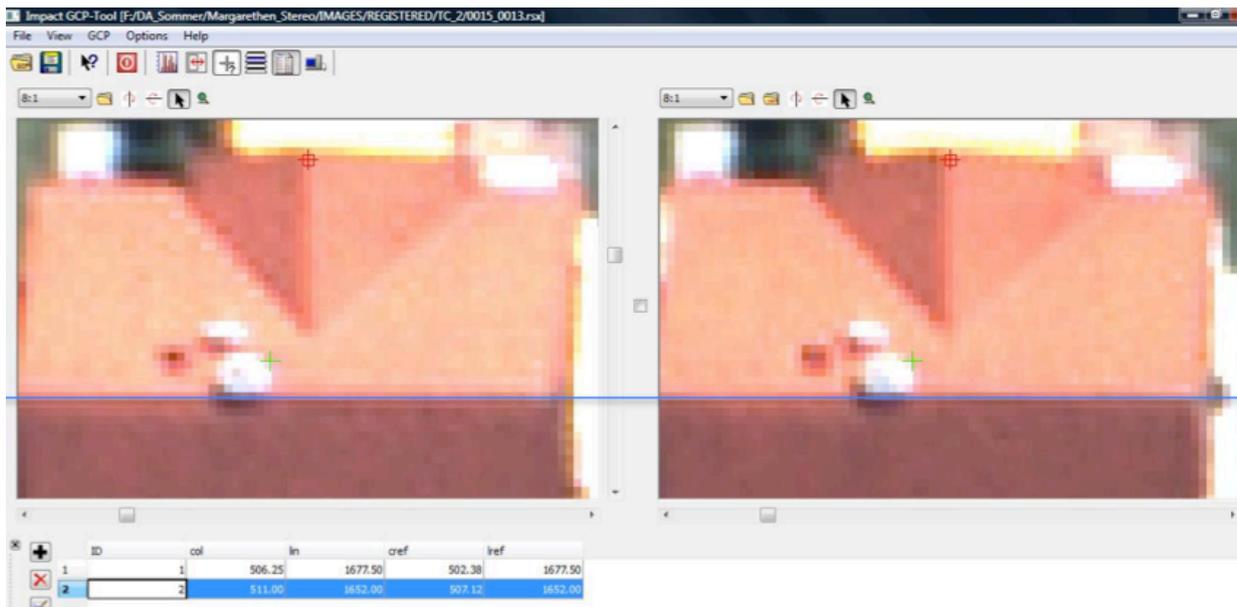


Abbildung 4.19: epipolar registrierte Bilder 13 & 14

Ausgehend von der Bildregistrierung erfolgte im nächsten Schritt das Matching mittels SGM und damit die Bestimmung der *disparity map* pro Stereobildpaar (siehe 2.5.5).

Bei dieser Masterarbeit wurde das *feature set* „mi-c3“ verwendet. Das *feature set* definiert die Kosten, den Typ und die Parameter der features. „mi-c3“ bedeutet, dass für die Bestimmung der Kostenfunktion einerseits *mutual Information* und andererseits eine Kreuzkorrelation mit einem 3×3 großen Kernel verwendet wurde. Darüber hinaus wurde für den *SGM-penalty P1* 0,1 und für den *penalty P2* 0,8 gewählt. Die Anzahl der Pyramidenlevels betrug fünf. Die maximale *backmatching distance* wurde mit 1,5 und die maximale *feature distance* mit 12 definiert.

Das Ergebnis dieses Arbeitsschritts war ein 4-kanaliges Bild mit den *disparities* in *x*- und *y*-Richtung, der *backmatching distance* und der *feature distance* (siehe **Abbildung 4.20**).

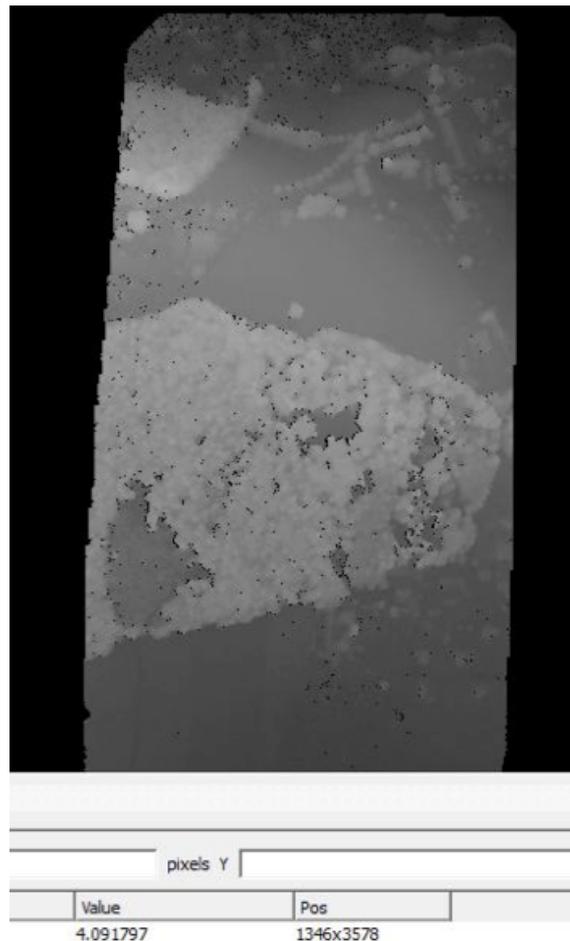


Abbildung 4.20: disparity map Bild 13 & 15, Testzenario 2

4.7.2 Multibaseline Matching

“*Multibaseline Matching*“ ist eine Erweiterung des zuvor beschriebenen Algorithmus. Dieses Verfahren wurde auf drei unterschiedliche Aufnahmekonstellationen, mit Bildüberlappungsbereichen von 93%, 87% beziehungsweise 82%, angewendet. Dies bildet die zweite Gruppe der Testszenerien (siehe Kapitel 4.1, Testszenerio 11 bis 13).

Der wesentliche Unterschied zu Kapitel 4.7.1 bestand darin, dass die Disparitäten für das Matching nicht nur aus zwei Bilder berechnet wurde, sondern aus einer pixelweisen Kombination zwischen dem Basisbild und allen nachfolgenden korrespondierenden Suchbildern bis ein minimaler Bildüberlappungsbereich zwischen dem Basis- und Suchbild von 35% unterschritten wurde. Für Bild 1 (Basisbild) im ersten Testszenerio bedeutete das, dass dieses mit den Bildern 2 bis 8 (Suchbilder) einzeln gematched wurde. Anschließend wurden die Ergebnisse auf ihre Konsistenz geprüft und falsche Matches eliminiert. Danach erfolgte die Erstellung der *disparity map* basierend auf unterschiedlichen Maßstäben. Die Disparitäten des aktuellen Bildes D_k wurden mit einem

Faktor t_k skaliert, welcher linear von der Basislinienlänge zwischen Referenz- und Suchbild abhängte $\frac{Dkp}{t_k}$ (Hirschmüller, 2008).

Im nächsten Schritt erfolgte die Fusion der Disparitäten. Dazu wurde das gewichtete Mittel der x –Parallaxen, in Anhängigkeit des Faktors t_k als Gewicht, gebildet und auf Ausreißer geprüft. Für die Berechnung der fusionierten Disparität eines Pixels wurden nur jene Werte herangezogen, welche um maximal ein Pixel vom Median aller gefundenen Disparitäten zwischen dem Referenzbild und allen Suchbildern abwichen (Hirschmüller, 2008).

Die *disparity map* wurde anschließend wieder in einem 4-kanaligen Bild gespeichert.

Für das Matching wurden sowohl im Stereofall als auch beim *Multibaseline Matching* die identen Einstellungen für das *feature-set*, die *penalties*, die maximale *feature-* und *backmatching distance* und für die Anzahl der Pyramidenlevels getroffen (siehe 4.7.1).

4.8 Digitales Oberflächenmodell

Für die Erstellung der digitalen Oberflächenmodelle aus den 9 Testszenerien in RSG wurde die Funktion „*Multi Image Disparity Based DEM Generation*“ (MID2DEM) verwendet. Der theoretische Hintergrund zur Berechnung des DOMs und zu *MID2DEM* ist in Kapitel 2.6 beschrieben.

Um ein DOM ableiten zu können, werden einerseits die Parameter der äußeren Orientierung, welche bei der Bündelblockausgleichung bestimmt wurden, und andererseits die *disparity maps* aus dem Matching benötigt. Deshalb mussten die zuvor bestimmten Disparitäten noch in das Blockfile hinzugefügt werden.

Anschließend konnte die Berechnung des DOM gestartet werden. Pro Testszenerio wurde ein digitales Höhenmodell erzeugt. In *Abbildung 4.21* ist das Ergebnis für das erste Testszenerio dargestellt.

Nach (Kaufmann, 2011) Kapitel 5.2.3 ist das Genauigkeitsgesetz der Photogrammetrie für die Höhe folgendermaßen definiert:

$$\sigma_h = \frac{h^2}{c \cdot B} \cdot \sigma_{p_x} \quad (4.2)$$

Aufgrund der Tatsache, dass bei der Berechnung der DOMs alle zur Verfügung stehenden Projektionsstrahlen verwendet wurden (siehe 2.6), betrug bei jedem Testszenario die maximale Basislänge 216 m. Die Pixelmessgenauigkeit σ_{p_x} wurde mit einem Drittel der Pixelgröße des Sensors ($\sigma_{p_x} = 7,4/3 \mu m$) angenommen. Dieser Wert ist nach Kapitel 4.3.3 in (Perko, 2004) zulässig, da durch die Subpixelinterpolationsmethode mit einem Polynom zweiter Ordnung die Pixelmessgenauigkeit gesteigert werden kann. Die mittlere Flughöhe betrug 1200 m über Grund (siehe 3.2). Die Brennweite der verwendeten Kamera betrug 50 mm. Daraus ergibt sich für die Höhengenaugkeit der DOMs $\sigma_h = 0,33 m$.

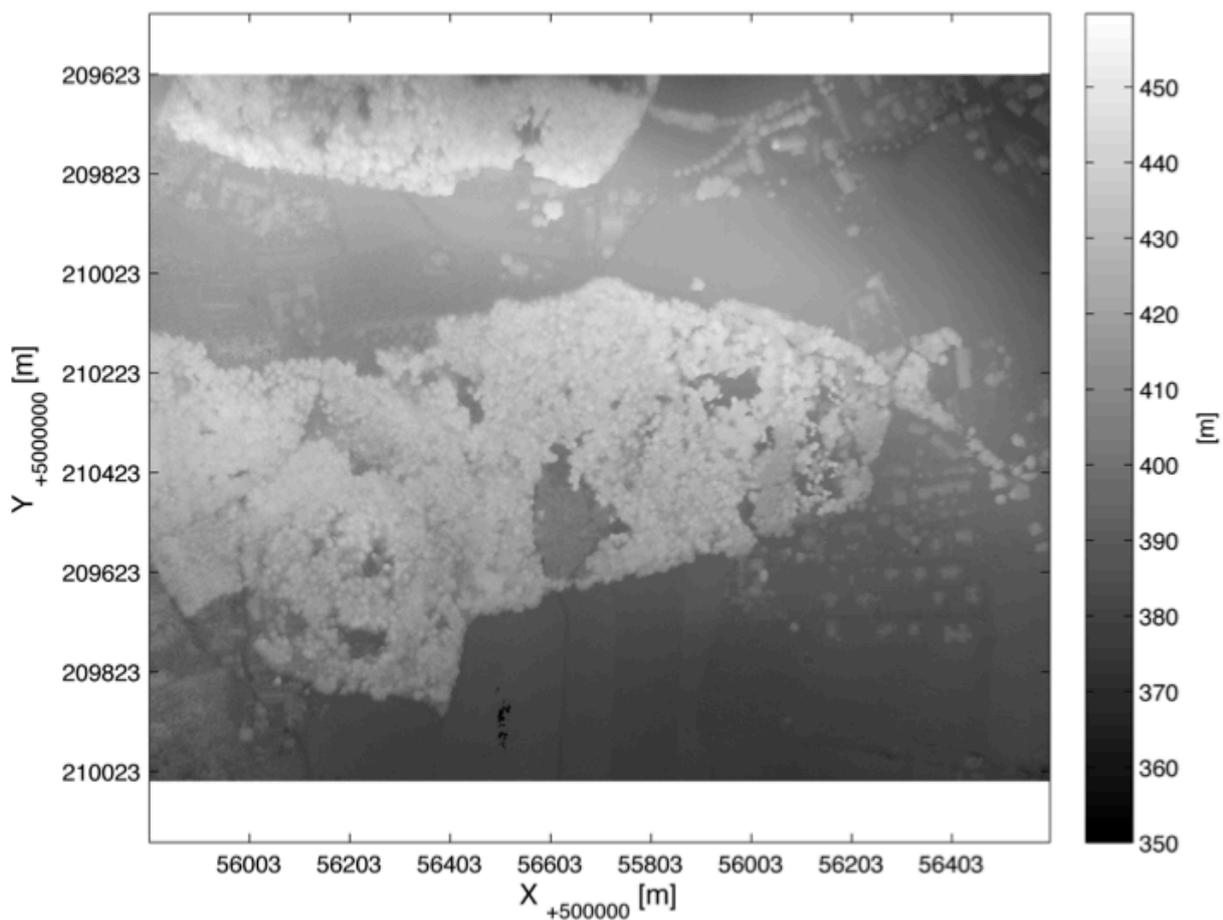


Abbildung 4.21: DOM Testszenario 1

5 Validierung

In diesem Arbeitsschritt erfolgte die Validierung der digitalen photogrammetrischen Höhenmodelle. Die Kontrolle erfolgte einerseits über den Abgleich mit Referenzmessungen (Kapitel 5.1) und andererseits über einen modellbasierten Ansatz (Kapitel 5.2). Des Weiteren wurde in beiden Fällen der Vergleich zu den ALS-Daten angestellt.

Das Ziel dieses Schritts ist es, jenes photogrammetrische digitale Höhenmodell zu finden, welches das Kronendach des Testgebietes bestmöglich approximiert. Darüber hinaus sollten die Fragen über die Notwendigkeit eines hoch redundanten Bilddatensatzes im Forstbereich für die Ableitung eines digitalen Oberflächenmodells beantwortet werden. Des Weiteren sollte ein Vergleich zwischen photogrammetrisch erstellten DOM und dem LIDAR-DOM erfolgen um eine Aussagen über die prinzipielle Verwendbarkeit von digitalen Oberflächenmodellen basierend auf optischen Bilddaten machen zu können.

Schlussendlich dienen die Ergebnisse der Validierung als Basis für die Ableitung eines Aufnahmekonzepts für die Befliegung von Forstbereichen mit der ADAM-Plattform.

5.1 Referenzmessung

Für die unabhängige Kontrolle der berechneten absoluten Baumhöhen in den DOMs wurden Referenzmessungen im Testgebiet durchgeführt. Dazu wurden mit einer terrestrischen Vermessung die 3D-Koordinaten von ausgewählten Baumwipfeln mittels Polarpunktbestimmung eingemessen. Dafür wurde die Totalstation Leica TCRA1201+ der Vermessung Sommer ZT-GmbH verwendet. Die Einmessung der Baumwipfel erfolgte von insgesamt drei unterschiedlichen Standpunkten aus (siehe *Abbildung 5.2* – rote Kreise). Insgesamt wurden 46 Baumwipfel von geraden Nadelbäumen bei absolut windstillen Verhältnissen koordinativ bestimmt. Aufgrund der topographischen Gegebenheiten des Testgebietes war es möglich die Standpunkte so auszuwählen, dass eine ideale Sicht in der Nähe des Waldrandes auf einzelnen Baumwipfel gewährleistet werden konnten. Dadurch war es möglich die Distanzen zu den einzelnen Baumwipfeln mittels reflektorloser Distanzmessung zu messen bzw. die Richtungswinkel und Zenitdistanzen zu beobachten, im Anschluss die 3D-Koordinaten der Baumwipfel zu bestimmen und diese mit den 3D-Koordinaten der unterschiedlichen Modelle zu vergleichen. In *Abbildung 5.1* ist das Messprinzip schematisch dargestellt.

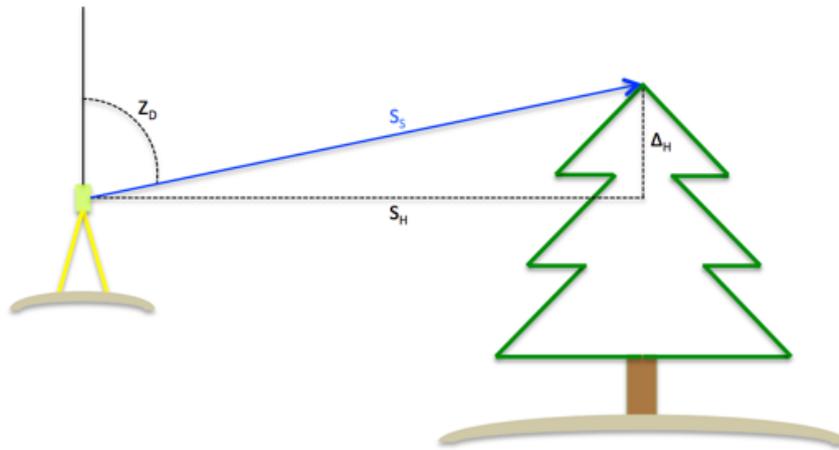


Abbildung 5.1: Einmessung der Baumwipfel mittels terrestrischer Vermessung

Die Anschlussmessungen erfolgten mittels freier Stationierung an die Polygonpunkte, welche für die Einmessung der Passpunkte benutzt wurden. Die Referenzmessungen wurden im Bezugsrahmen WGS84/UTM33N ausgewertet. Für die Auswertung der Messungen wurde das Softwarepaket rmGE04 (Versionsnr. 4.10.3819) verwendet. In *Abbildung 5.2* ist eine Übersicht der eingemessenen Wipfel sowie der Stand- und Anschlusspunkte dargestellt.

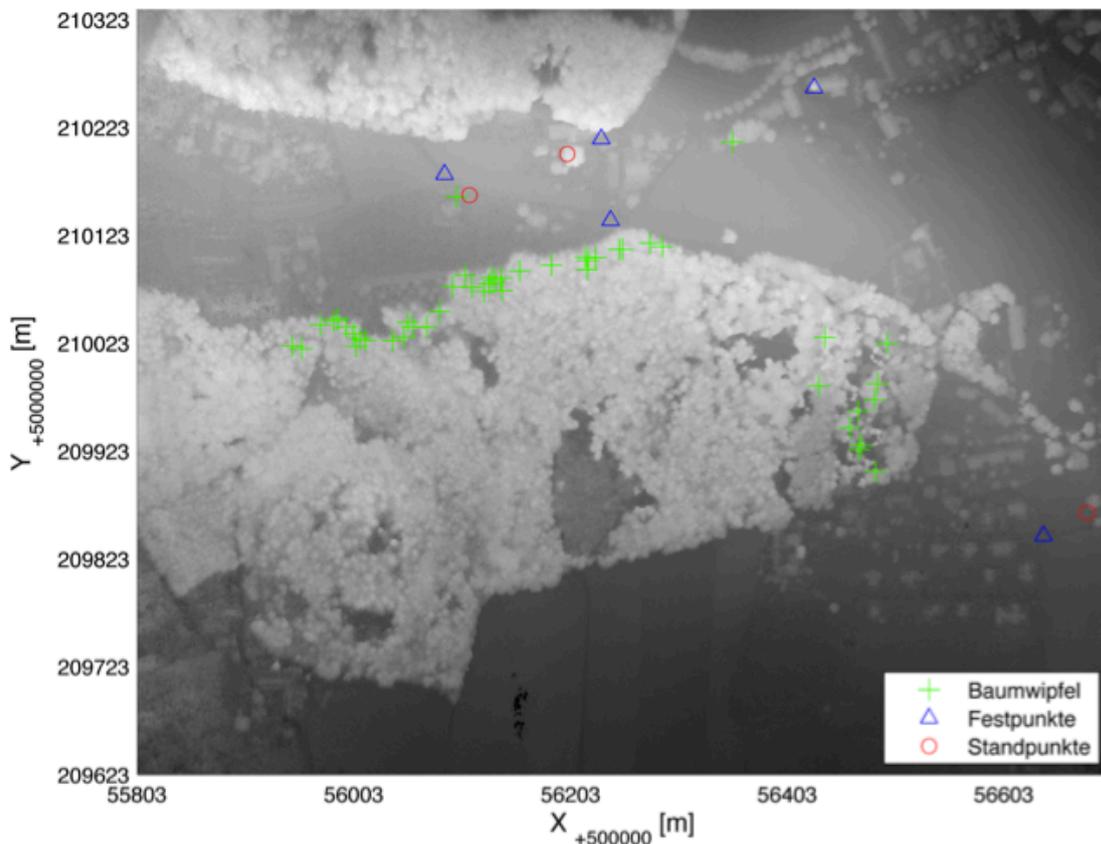


Abbildung 5.2: Übersicht eingemessene Baumwipfel

Die Richtungs- und Distanzmessung wurde getrennt voneinander durchgeführt. D. h. es wurde zuerst der Stamm des Baumes, ca. zwei Meter unter dem Wipfel, anvisiert und die horizontale Distanz bestimmt. Anschließend wurde der Wipfel angezielt und die Zenitdistanz bzw. der Richtungswinkel gespeichert.

Die Genauigkeit der Referenzmessung betrug sowohl in der Lage als auch in der Höhe $\pm 15 \text{ cm}$. Dieser Wert setzt sich aus der Anzielgenauigkeit der Baumwipfel sowie aus den Unsicherheiten der Polygonpunkte zusammen.

Zusätzlich zu den Unsicherheiten durch das Anvisieren der Baumwipfel mussten noch die Genauigkeitsangaben für Richtungsbeobachtung und Distanzmessung des Instruments berücksichtigt werden. Durch die Varianzfortpflanzung der ersten Hauptaufgabe ergab sich für die Messunsicherheit pro Polarpunktaufnahme, aufgrund der Instrumentenspezifikationen (Distanzmessgenauigkeit RL-Modus $2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$, Winkelmessgenauigkeit $3''$ (Leica Geosystems AG)), eine Standardabweichung für Lage- und Höhenmessung von jeweils kleiner $0,5 \text{ cm}$. Dieser Einfluss ist im Vergleich zu der der Anzielgenauigkeit jedoch sehr gering.

Im nächsten Schritt erfolgte die Bestimmung der absoluten Höhen der Wipfel in den digitalen Oberflächenmodellen. Dazu wurde eine Funktion in Matlab geschrieben, welche als Inputgröße die Lagekoordinaten des Baumwipfels benötigte. Dafür wurden die Lagekoordinaten der Referenzmessung herangezogen. Um den aktuellen Rechts- und Hochwert wurde dann einem 5×5 Pixel große Matrix gebildet, wobei sich der Baumwipfel im zentralen Pixel der Matrix befunden hat (siehe *Abbildung 5.3*).

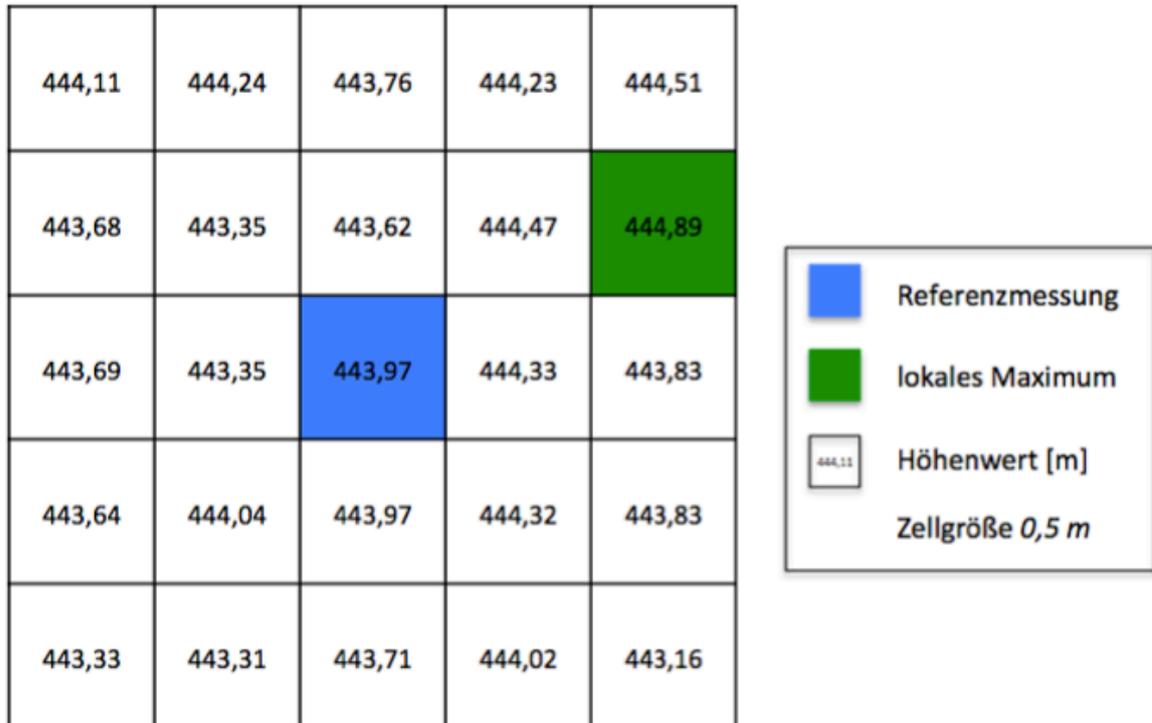


Abbildung 5.3: Suche nach dem lokalen Maximums innerhalb einer 5 x 5 Matrix

Innerhalb der Matrix wurde dann das lokale Maximum gesucht und anschließend in einer Liste, zusammen mit der aktuellen Punkt-ID, gespeichert. Diese Abfrage wurde mit allen photogrammetrischen Höhenmodellen und dem ALS-Modell durchgeführt. Aufgrund der Tatsache, dass der aktuelle Baumwipfel im Modell gefunden wurde konnte gleichzeitig die Lageabweichung zwischen der Referenzmessung und dem Baumwipfel berechnet werden. Die mittleren Lageabweichungen der einzelnen Baumwipfeln in den Modellen von den Referenzmessungen sind in *Tabelle 5.1* angegeben.

Tabelle 5.1: mittlere Lageabweichung (Modell - Referenz)

Testszenario	Mittlere Lageabweichung	Standardabweichung
	[m]	[m]
1	0,29	0,37
2	0,19	0,32
3	0,12	0,32
4	0,15	0,35
5	0,22	0,39
6	0,49	0,53

11	0,29	0,34
12	0,24	0,52
13	0,39	0,60
22	0,41	0,76

Danach wurden für jedes Testszenario die Differenzen zwischen den Referenzmessungen und den abgefragten absoluten Höhen aus den jeweiligen DOM nach Formel 6.1 gebildet:

$$\Delta h_i = h_{Mod_i} - h_{Ref_i} \quad (6.1)$$

Anschließend wurden die Differenzen, in Form eines „Bar-Plots“ graphisch dargestellt (Abbildung 5.4).

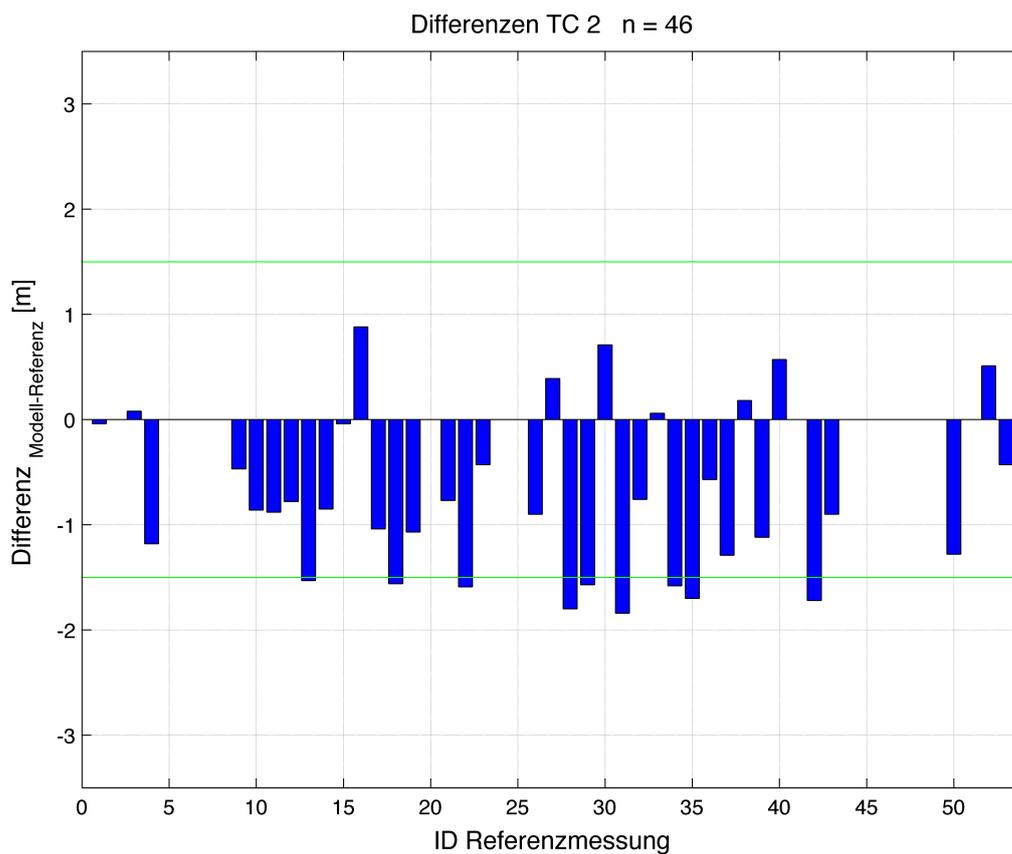


Abbildung 5.4: Plot der Differenzen der absoluten Baumhöhen als "Bar-Plot", Testszenario 2

Darüber hinaus wurde mittels Ausgleich nach kleinsten Quadraten eine lineare Regression berechnet. Dabei wurden die Referenzmessungen mit den abgefragten Höhen

aus den Modellen gegenübergestellt. In *Abbildung 5.5* wurden die repräsentativen Regressionsgeraden dargestellt.

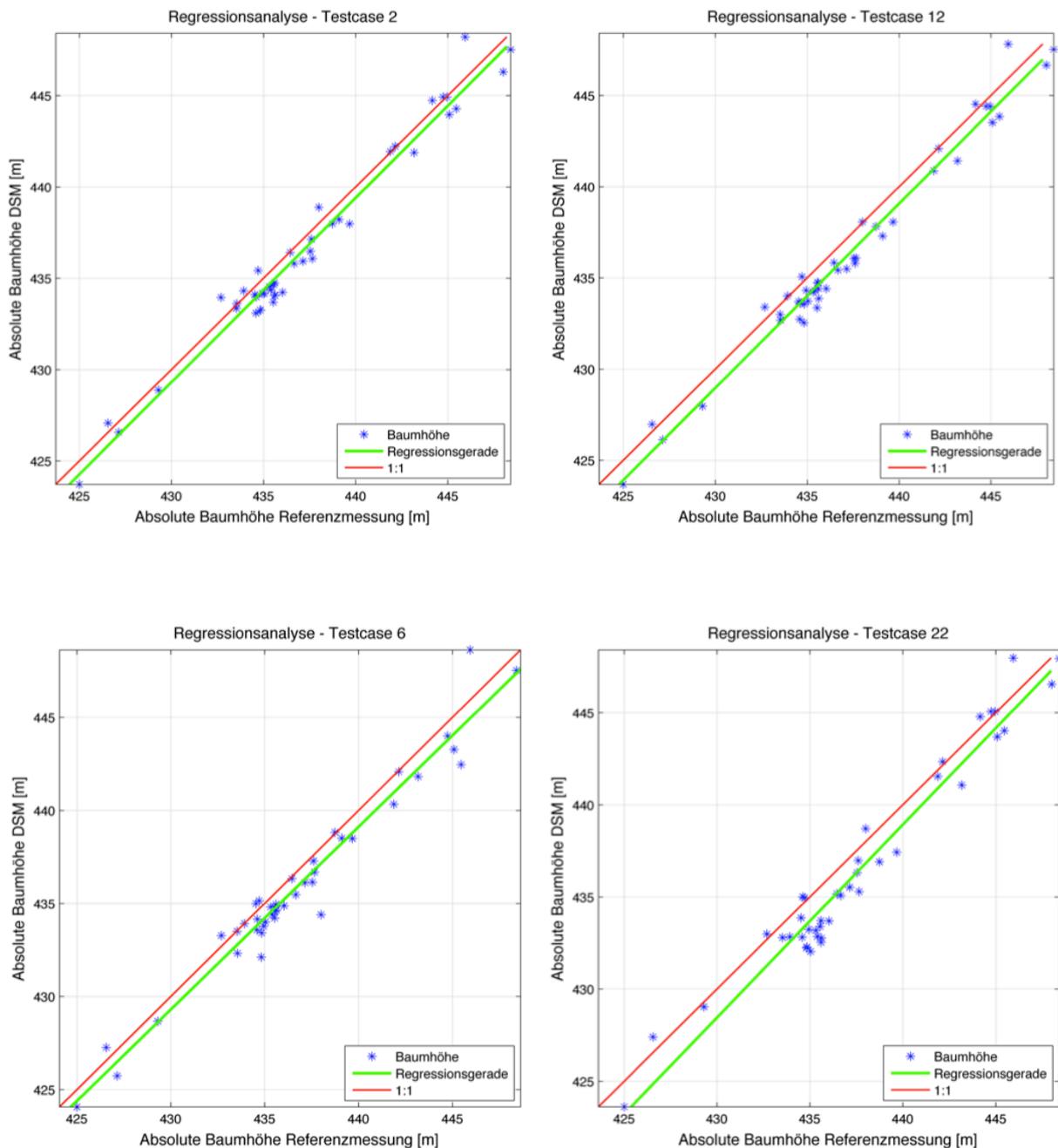


Abbildung 5.5: Lineare Regressionsgerade, Testszenario 2, 12 & 6 bzw. 22

Nachdem für alle Testszenarien und für das ALS-Modell die Differenzen gebildet wurden, wurde zuletzt noch der „*Root Mean Square Error*“ (RMS) der Differenzen berechnet und graphisch dargestellt (*Abbildung 5.6*)

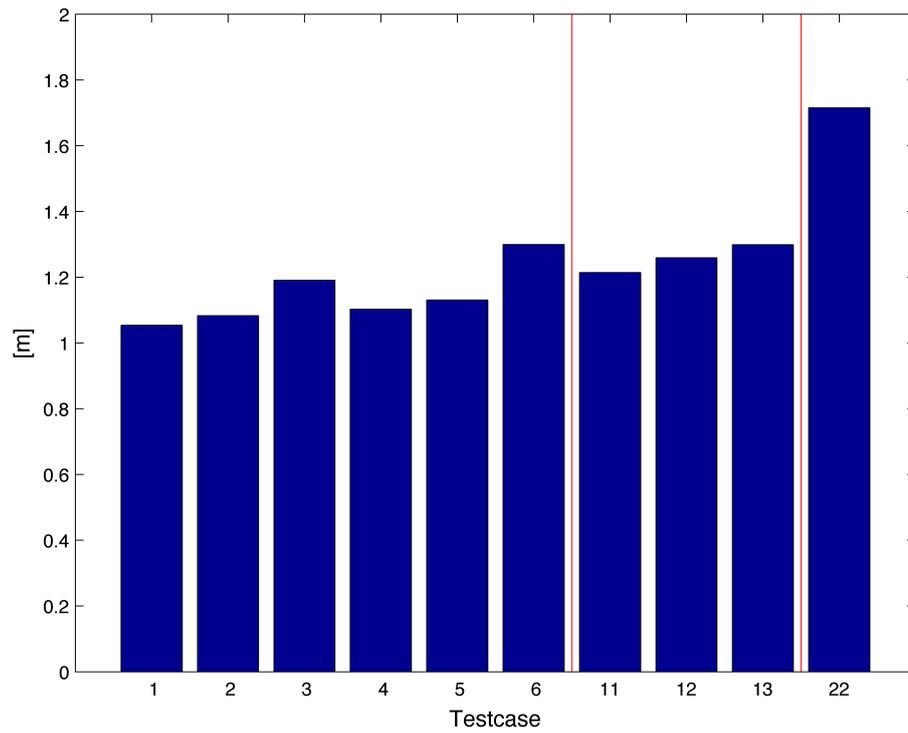


Abbildung 5.6: RMS der Differenzen

Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 6.

5.2 Modellbasierter Ansatz

Der zweite Teil der Validierung erfolgte modellbasiert. Bei visueller Betrachtung der berechneten digitalen Oberflächenmodelle konnte festgestellt werden, dass mit zunehmendem Bildüberlappungsbereich das Kronendach des Waldes im Testgebiet genauer rekonstruiert werden konnte. *Abbildung 5.7* bis *Abbildung 5.9* zeigen einen Ausschnitt aus drei digitalen Oberflächenmodellen vom Testgebiet. Bei näherer Betrachtung ist festzustellen, dass mit steigendem Bildoverlap Lichtungen im Kronendach detailreicher abgebildet werden (rote Kreise) und Baumwipfel deutlicher modelliert werden können (grüne Kreise).

Das Ziel des modellbasierten Ansatzes war es, einen Parameter für die Qualität eines Oberflächenmodells zu finden. Als Qualitätsparameter wurde die Oberflächenrauigkeit gewählt. Die Oberflächenrauigkeit beschreibt die Variation einer Oberfläche - in diesem Fall die Oberfläche („Täler“) zwischen den Baumwipfeln im Kronendach. Diese wurde für die Beurteilung der These, welche zuvor, basierend auf den visuellen Vergleich der unterschiedlichen Modelle getätigt wurde, herangezogen.

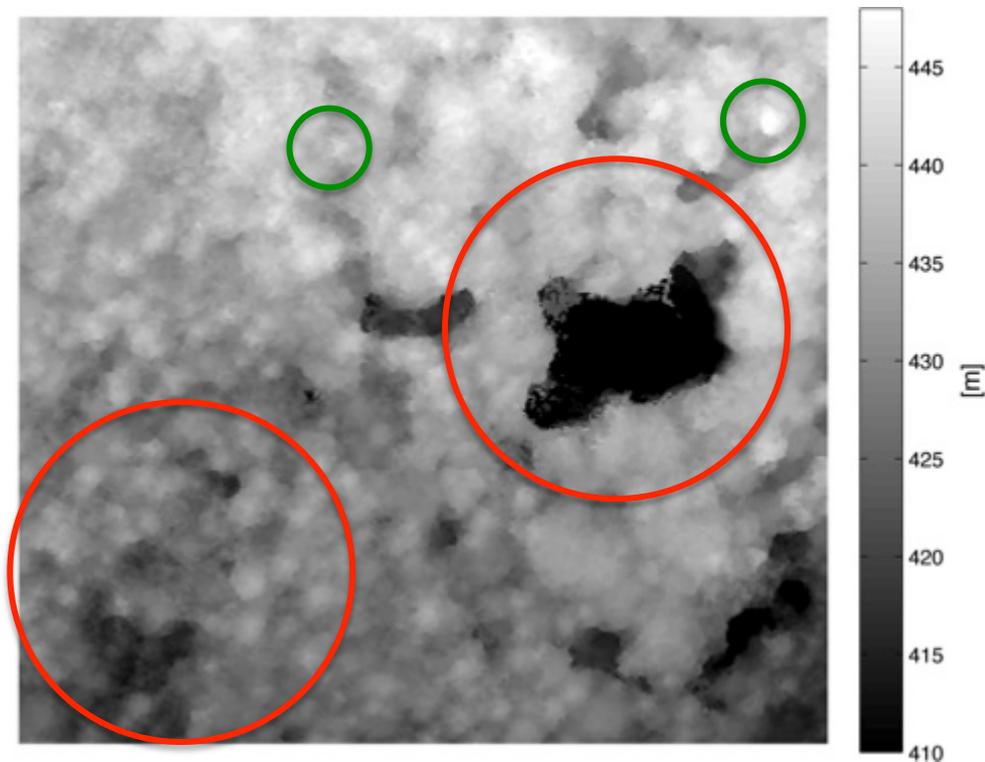


Abbildung 5.7: Subset DOM mit Bildüberlappungsbereich 62%, Testszenario 6

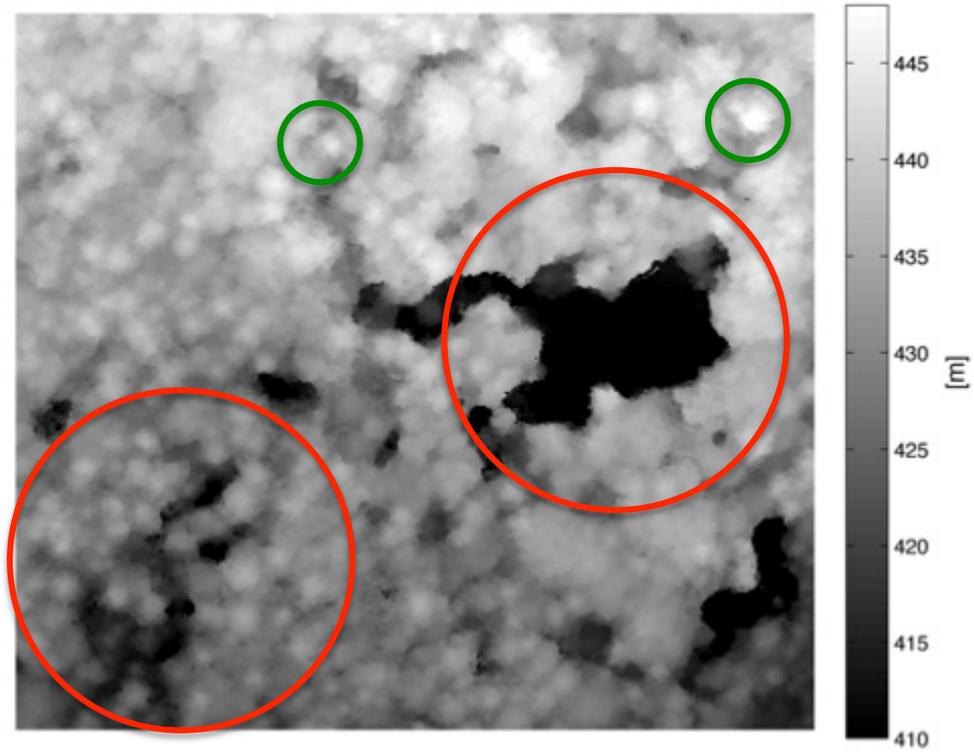


Abbildung 5.8: Subset DOM mit Bildüberlappungsbereich 82%, Testszenario 3

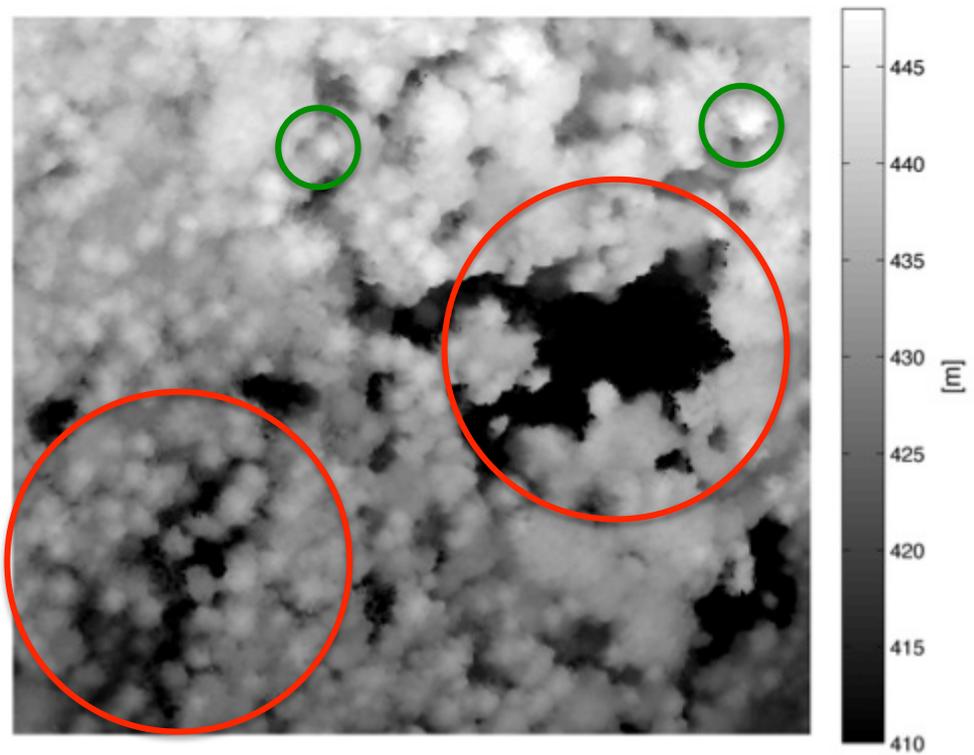


Abbildung 5.9: Subset DOM mit Bildüberlappungsbereich 93%, Testszenario 1

5.2.1 Oberflächenrauigkeit

Für die Bestimmung der Oberflächenrauigkeit wurde nach dem Ansatz von Dr. Christoph Straub (Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft – LWF) verfahren. An der Abteilung für Informationstechnologie (LWF) wurde die Software „SquareMetrics“ entwickelt.

SquareMetrics ist eine Validierungssoftware und wird für den Vergleich von photogrammetrischen- und ALS-Kronendachmodellen herangezogen. Mit diesem Programm ist es möglich, die Oberflächenrauigkeit eines Kronendachmodells zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird das zugrundeliegende Modell in gleich große Zellen aufgeteilt. Anschließend wird für jede Zelle eine Ebene berechnet (*Abbildung 5.10*). Die Baumhöhen dienen als Beobachtungen, um die Koeffizienten der Ebene mittels Ausgleichsrechnung bestimmen zu können. Im zweiten Schritt erfolgt die Berechnung der Standardabweichung der Höhenwerte von der Ebene, welche als Parameter für die Oberflächenrauigkeit herangezogen wird. Pro Zelle wird ein Wert ausgegeben (Straub C. , 2011).

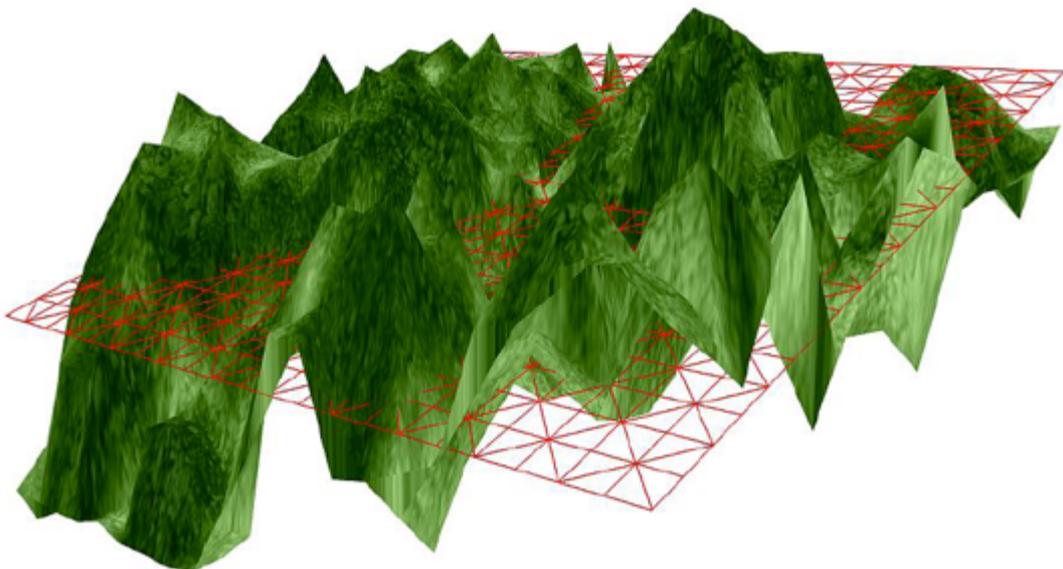


Abbildung 5.10: Ebene (rot) innerhalb einer Zelle, Quelle (Straub C. , 2011)

Ein hoher Wert bedeutet, dass eine starke Variation zwischen den Abständen von der Ebene zur Oberfläche vorhanden ist und somit eine detailreiche (raue) Fläche vorliegt. Im Gegensatz dazu beschreibt ein kleiner Wert eine homogenere Oberfläche mit nur einer geringfügigen Streuung der Abstände innerhalb der Zelle. Für die modellbasierte

Validierung bedeutet dass, das bei einer hohen Rauigkeit die Oberfläche zwischen zwei Baumwipfeln detailreicher rekonstruiert werden kann als bei einem geringeren Wert.

Dies wird in *Abbildung 5.11* bis *Abbildung 5.14* bzw. *Tabelle 5.2* verdeutlicht. Um dieses Verhalten dokumentieren zu können, wurden für drei Zellen jeweils die Werte der Oberflächenrauigkeit angegeben (*Tabelle 5.2*). Darüber hinaus wurden Profile entlang der Zelldiagonalen gelegt und graphisch dargestellt. Die Profile wurden aus den digitalen Oberflächenmodellen mit den Bildüberlappungsbereichen 93%, 78% und 62% erstellt.

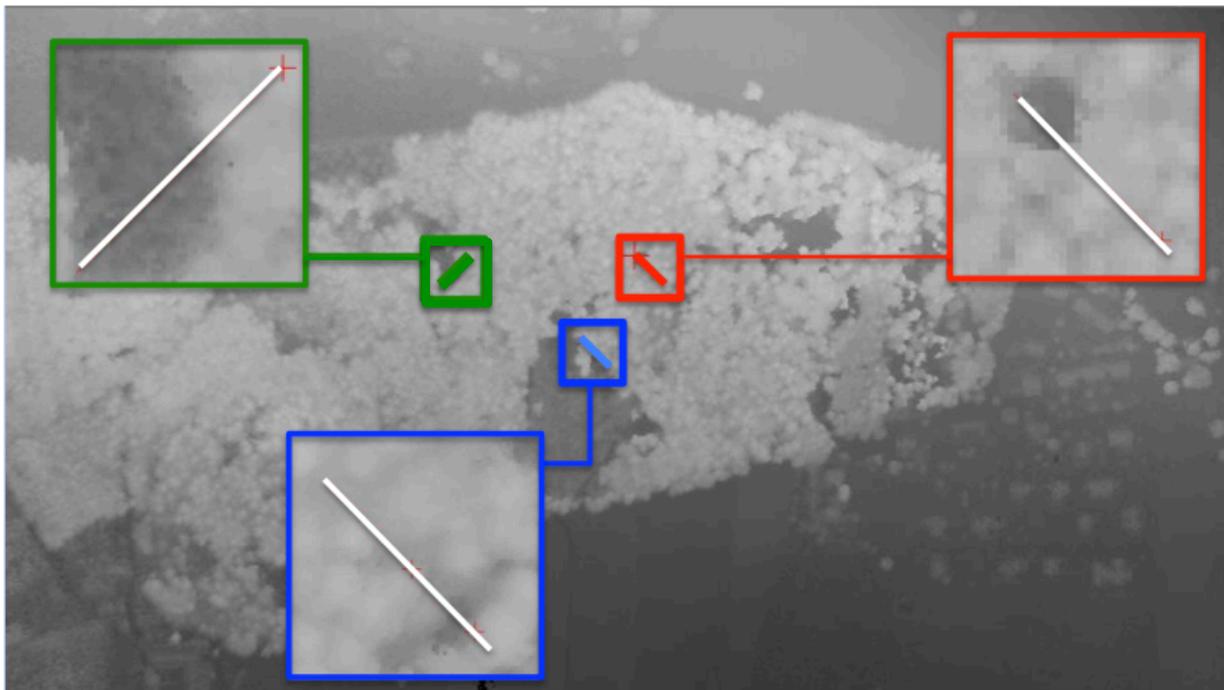


Abbildung 5.11: Profile entlang der Diagonalen, Profil 1 rot, Profil 2, grün, Profil 3 blau

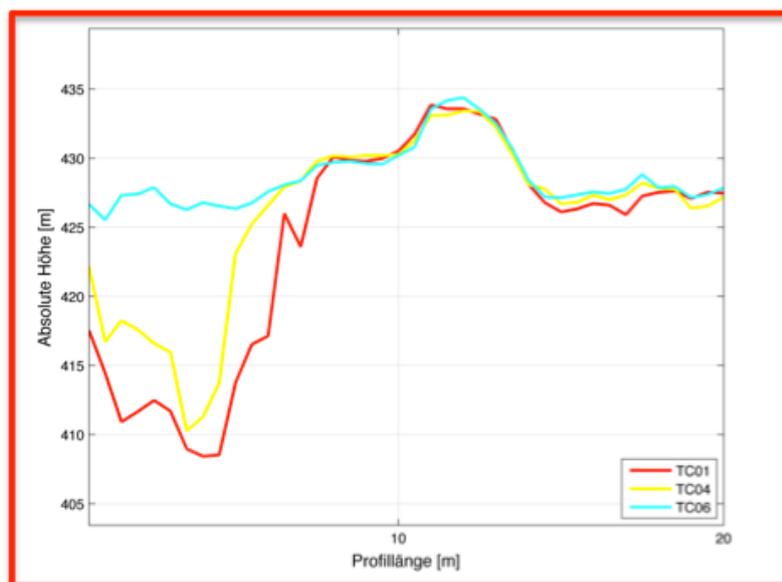


Abbildung 5.12: Profil 1

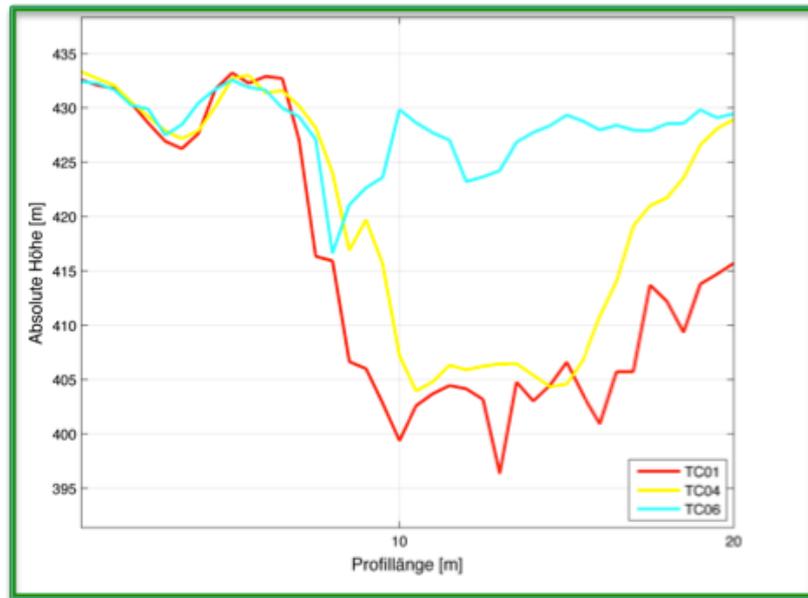


Abbildung 5.13: Profil 2

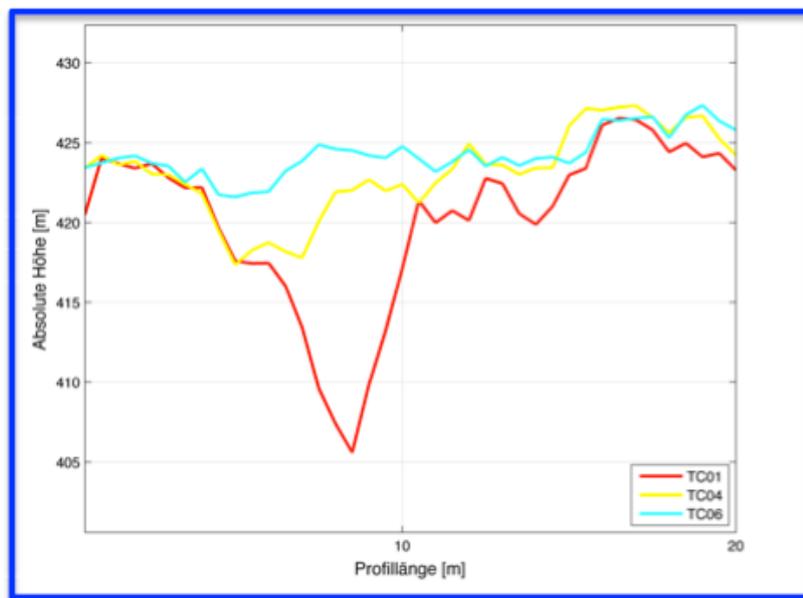


Abbildung 5.14: Profil 3

Tabelle 5.2: Oberflächenrauigkeiten der Zellen

Testszenario	Rauigkeit [m] pro Profil/Zelle		
	1	2	3
93%	4,82	2,48	1,48
76%	2,85	2,36	1,33
62%	2,35	2,22	1,26

Je geringer der Bildüberlappungsbereich, desto weniger Projektionsstrahlen stehen für den räumlichen Vorwärtsschnitt zur Verfügung. Deshalb können Einschnitte („Täler“)

zwischen zwei Baumwipfeln oder Lichtungen schlechter im Modell rekonstruiert werden. Dadurch entsteht bei geringerem Bildoverlap eine glattere, homogenere Oberfläche zwischen den Baumwipfeln da weniger Projektionsstrahlen für die Rekonstruktion vorhanden sind (siehe *Tabelle 5.2*). Dies wird zum Beispiel in *Abbildung 5.14* sehr deutlich anhand einer Lichtung gezeigt. Vergleicht man das Profil basierend auf 93% Bildüberlappungsbereich (rot) mit jenem basierend auf 62% Bildüberlappungsbereich (cyan) so fällt sofort auf, dass die Lichtung mit steigendem Bildoverlap besser modelliert wird. Im Falle von Testszenario 1 (rot) spricht man daher von einer raueren Oberflächen im Vergleich zu Testszenario 6 (cyan) mit einer geringeren (glatteren) Oberflächenrauigkeit.

5.2.2 Arbeitsschritte zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit

Im ersten Schritt erfolgte die Bildung von normalisierten digitalen Oberflächenmodellen durch Subtraktion eines digitalen Geländemodells von den digitalen Oberflächenmodellen (nach Formel 6.2). Dies war notwendig, da die Software als Inputgröße Baumhöhen und nicht die absolute Höhe der Wipfel benötigte. Dafür wurde das digitale Geländemodell (DGM) der ALS-Befliegung verwendet (siehe Kapitel 3.4).

$$nDOM_i = DOM_i - DGM_i \quad (6.2)$$

Die Rasterweite der nDOMs wurde aufgrund einer Programmvorgabe mit 1 m festgelegt. Dazu wurden die zuvor berechneten DOMs (Rasterweite 0,5 m) auf die geforderte Auflösung resampled. Das DGM lag bereits mit einer Rasterweite von 1 m vor. Somit konnten die nDOMs nach Formel 6.2 für alle photogrammetrisch abgeleiteten Oberflächenmodelle und für das ALS-Oberflächenmodell erstellt werden.

Danach erfolgte die eigentliche Berechnung der Oberflächenrauigkeiten für die normalisierten digitalen Oberflächenmodelle. Dies erfolgte, dankenswerterweise, direkt am LWF durch Dr. Christoph Straub. Die Rasterweite für eine Zelle, für welche die Rauigkeit bestimmt wurde, wurde mit 20 × 20 m festgelegt. Das Ergebnis dieses Schrittes war ein Shapefile mit einem Wert für die Oberflächenrauigkeit pro Zelle. Insgesamt wurden somit 10 Shapefiles (9 photogrammetrische- und 1 ALS-nDOM) erstellt.

Im nächsten Arbeitsschritt wurde anhand eines Orthophotomosaiks eine Maske definiert, welche das Testgebiet vom restlichen nDOM abgrenzte (*Abbildung 5.15*).



Abbildung 5.15: Orthophotomosaik mit AOI Layer

Dies wurde benötigt, da nur jene Zellen für die weitere Auswertung von Interesse waren, welche sich zur Gänze innerhalb der Waldfläche befunden haben (437 Zellen). Die Einträge innerhalb des AOI-Layers blieben unverändert, hingegen wurden alle anderen Zellenwerte auf 0 gesetzt. Diese Abfrage wurde im Model Maker (ERDAS Imagine) durchgeführt.

Zum Schluss wurden die Bilder in Matlab importiert und visualisiert (Abbildung 5.16).

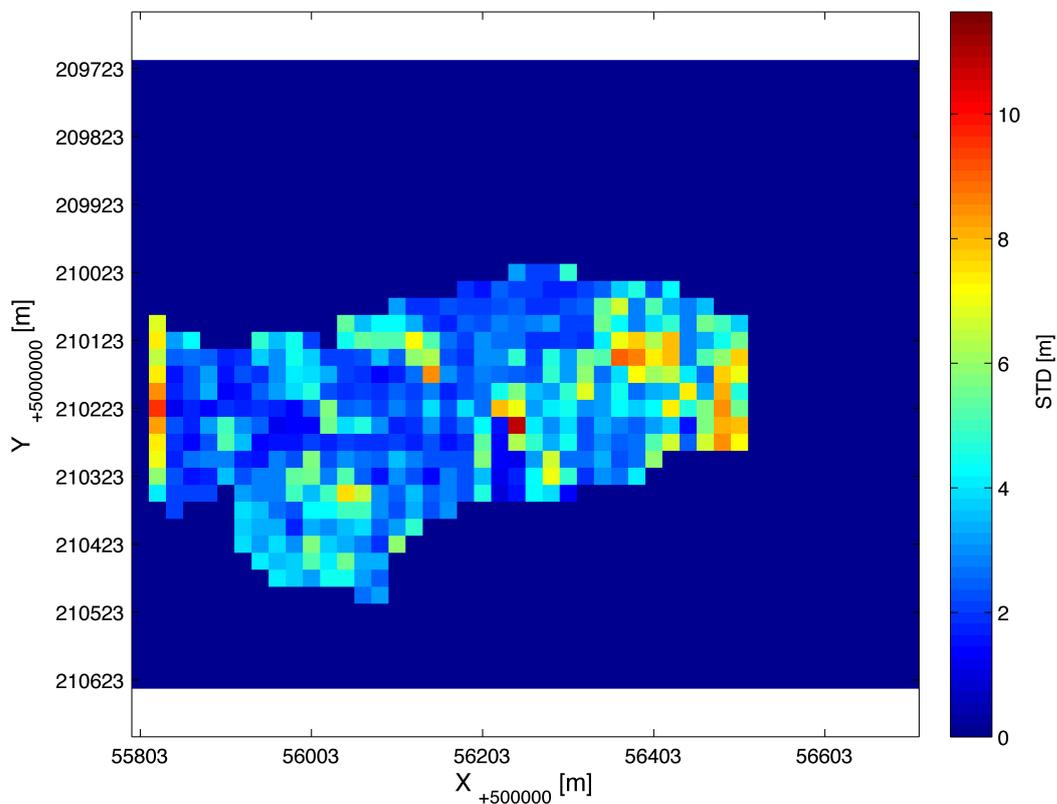


Abbildung 5.16: Standardabweichungen von der Ebene [m] (93% Bildüberlappungsbereich)

Darüber hinaus wurden aus allen Zelleinträgen $\neq 0$ eines Bildes das arithmetische Mittel bestimmt, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Bildüberlappungsbereiche auf die berechneten digitalen Oberflächenmodelle beurteilen zu können.

5.2.3 Ergebnis

Das Ergebnis der modellbasierten Validierung waren die Mittelwerte der Standardabweichungen der Höhenwerte von der Ebene. Diese sind in *Tabelle 5.3* und *Abbildung 5.17* dargestellt.

Tabelle 5.3: Mittlere Standardabweichung der Höhenwerte von der Ebene

Testszenario	$\overline{x_{STD}}$ [m]
1	3,55
2	3,45
3	3,31
4	3,14
5	3,02
6	2,80
11	3,49
12	3,36
13	3,57
22	4,40

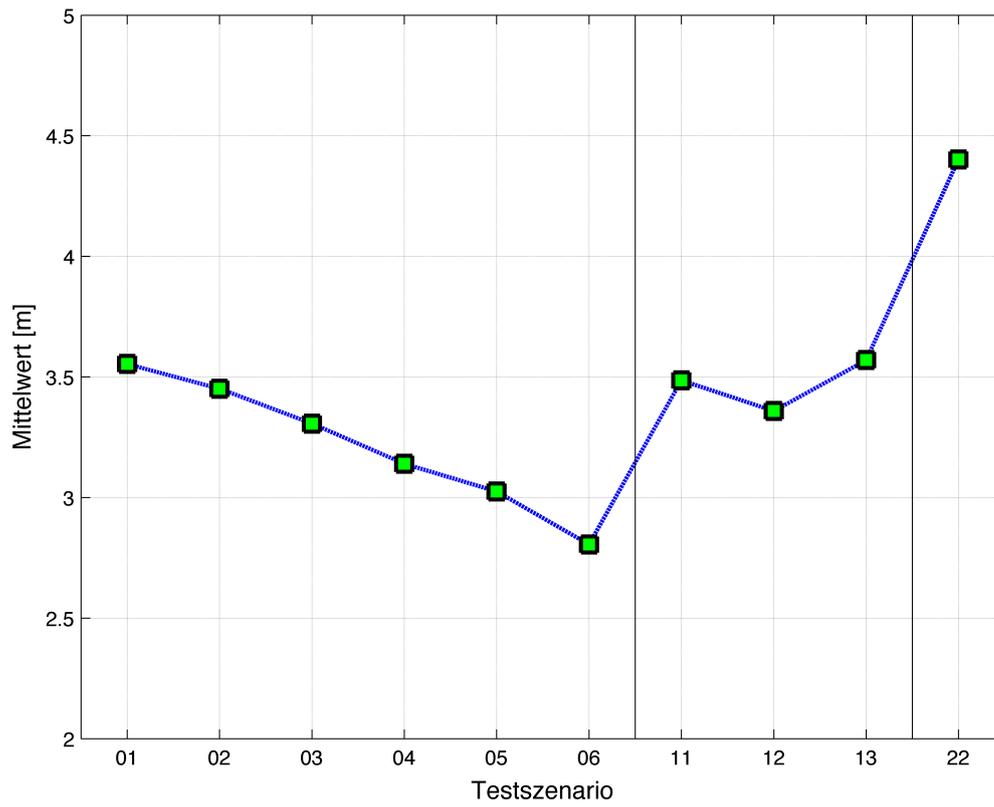


Abbildung 5.17: Mittelwerte der Standardabweichungen der Höhenwerte von der Ebene

6 Diskussion der Ergebnisse

In Kapitel 5 wurden die Ergebnisse anhand von drei Kriterien beurteilt. Diese waren die Referenzmessung, die visuelle Interpretation und die Oberflächenrauigkeit.

6.1 Baumweise Referenzmessung

Bei der Auswertung der Referenzmessung mit den einzelnen Oberflächenmodellen konnte festgestellt werden, dass sich mit zunehmendem Bildüberlappungsbereich die Differenzen zwischen dem jeweiligen Modell und den eingemessenen Baumwipfeln verringern (siehe *Abbildung 5.6*). Jedoch beträgt die Differenz zwischen dem maximalen und minimalen RMS nur 20 cm und liegt somit in der Größenordnung der Messunsicherheit der terrestrischen Referenzmessungen der Baumwipfel. Demnach kann keine zuverlässige Aussage über den Einfluss des Bildüberlappungsbereiches auf die berechneten Baumhöhen gemacht werden. Der Vergleich mit den ALS-Daten zeigt die größte Abweichung. Darauf wird auf den folgenden Seite eingegangen.

Generell ist anzumerken, dass sich die Größenordnung der Abweichungen der Modelle von den Referenzmessungen durchaus im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit befindet. In (Hirschmugl, 2008) wurden ebenfalls ein photogrammetrisches digitales Oberflächenmodell eines Kronendachs berechnet und Baumhöhen im Feld terrestrisch bestimmt. Die mittlere Abweichung der Baumhöhen von den Referenzmessungen betrug $-0,77\text{ m}$ mit einer Standardabweichung von $2,39\text{ m}$. Als Datengrundlage dienten Luftbilder (UltracamD) mit einer Bodenauflösung von $0,15\text{ m}$.

Um diese Ergebnisse mit jenen dieser Masterarbeit vergleichen zu können, wurden ebenfalls die mittlere Abweichung der Baumhöhen von den Referenzmessungen und die zugehörigen Standardabweichungen der einzelnen Testszenarien bestimmt. *Abbildung 6.1* und *Abbildung 6.2* zeigen ähnliche Ergebnisse für die photogrammetrischen DOMs (Testszenario 1- 13).

Die in *Abbildung 6.2* gezeigten Standardabweichungen sind um den Faktor 5 größer als jene der terrestrischen Referenzmessung. Dies ist einerseits auf die Aufsetzgenauigkeit der Blöcke (*Tabelle 4.2*) und andererseits auf den Matching- und Filterprozess zurückzuführen.

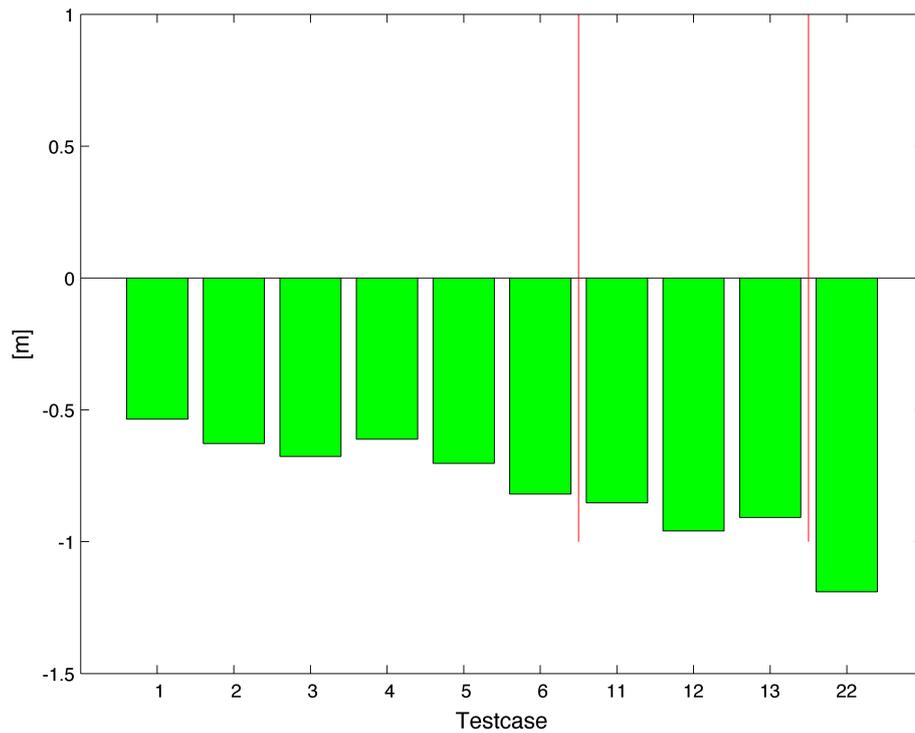


Abbildung 6.1: mittlere Abweichungen der Differenzen (Modell - Referenz)

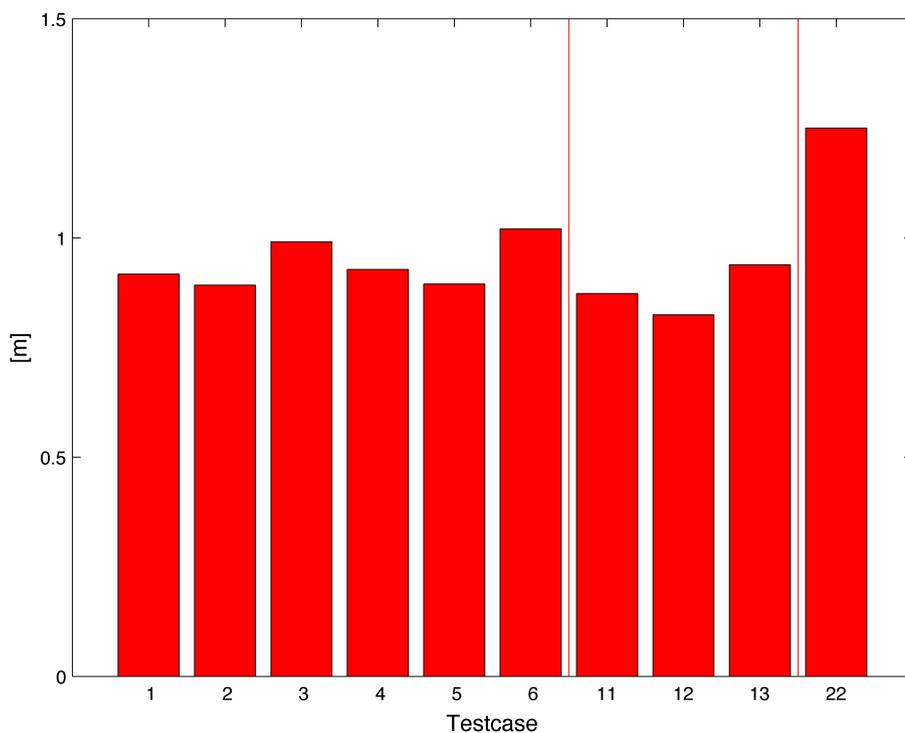


Abbildung 6.2: Standardabweichungen der Mittelwerte

Aus den negativen Vorzeichen der Mittelwerte in *Abbildung 6.1* bzw. der Regressionsgeraden in *Abbildung 5.5* geht eine allgemeine Unterschätzung der

Baumhöhen aus den Modellen hervor. Für die photogrammetrisch erzeugten Modelle gibt es dafür drei wesentliche Gründe:

- 1) Zeitliche Differenz zwischen Aufnahme der Luftbilder und Referenzmessung
- 2) Matching und Filteralgorithmen
- 3) Sichtbarkeit (Bodenauflösung)

Ad 1) Die Befliegung des Testgebietes erfolgte am 29.6.2011 (siehe Kapitel 3.2). Die Einmessung der Baumhöhen erfolgte jedoch erst am 24.6.2012. In (von Teuffel et al., 2005) wird für den Zuwachs einer Fichte pro Jahr rund 40 cm angegeben. Die zeitliche Differenz von fast einem Jahr erklärt einen Anteil der Unterschätzung. Im Falle des Testszenarios 22, DOM aus ALS-Daten, ist sowohl die mittlere Differenz zwischen Modell und Referenzmessung als auch die Unterschätzung am größten. Der Grund dafür liegt am Zeitpunkt der Befliegung. Die ALS-Daten wurden im Frühjahr 2009 aufgenommen. Somit liegen zwischen der Einmessung der Wipfel und der ALS-Datenaufnahme rund drei Jahre.

Ad 2) Ein weiterer Grund für die Unterschätzung ist der Matching- und Filterprozess. Während des Matchings werden Filteralgorithmen angewendet. Dabei werden jedoch die Baumwipfel „abgeschnitten“, weshalb bei der weiteren Erstellung des Oberflächenmodells die Baumhöhen generell zu tief berechnet werden.

Ad 3) Die Flughöhe über dem Testgebiet wurde so gewählt, dass die Luftbilder mit einer Bodenauflösung von 18 cm aufgenommen wurden. Bei dieser Auflösung ist es unmöglich einen Wipfel eines Nadelbaumes eindeutig im Matching zu identifizieren. Es ist davon auszugehen, dass der Grauwert des Pixels, welches den Wipfel enthält, durch die darunterliegenden Äste beeinflusst wird.

Eine ähnliche Problematik ergibt sich auch bei den ALS-Daten. Die Güte des berechneten digitalen ALS-Oberflächenmodells hängt von der mittleren Punktdichte pro m^2 ab (in diesem Fall 4). Deshalb kann auch hier nicht davon ausgegangen werden, dass der maximale Höhenwert eines Baumes im Wald der tatsächlichen Höhe eines Wipfels entspricht.

Vergleicht man die Testszenarien 1 bis 3 mit den Szenarien 11 bis 13 so fällt auf, dass 11 bis 13 geringfügig höhere RMS aufweisen. Dies wird auf das Multibaseline Matching zurückgeführt. Bei diesem Verfahren werden ebenfalls sehr viele Filterschritte angewendet. Die Bestimmung der Disparitäten bei diesem Verfahren beruht auf einer

Fusion von vielen zuvor bestimmten x – Parallaxen (siehe 4.7.2). Deshalb werden mehrere Filterschritte als beim sequentiellen Matching durchgeführt. Aufgrund dessen ist davon auszugehen, dass der in Punkt 2 beschriebene Einfluss verstärkt wird und Baumwipfel generell zu tief berechnet werden.

6.2 Visuelle Interpretation

In *Abbildung 5.7* bis *Abbildung 5.9* wurde visuell gezeigt, dass mit steigendem Bildüberlappungsbereich ein Kronendach detailreicher rekonstruiert werden kann. Für die Ableitung des Aufnahmekonzepts (Kapitel 7) wurde diese Erkenntnis berücksichtigt. Der visuelle Eindruck wurde quantitativ durch einen Qualitätsparameter in Kapitel 6.3 belegt.

6.3 Oberflächenrauigkeit

In *Abbildung 6.3* sind die Oberflächenrauigkeiten der Testszenarien 1 bis 6 graphisch dargestellt. Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass mit Abnahme des Bildüberlappungsbereiches auch die Standardabweichungen des Abstandes zur Ebene kleiner werden. Dies lässt den Schluss zu, dass mit abnehmendem Bildoverlap auch die Oberflächenmodelle glatter werden. Dieses Verhalten kann zusätzlich mit Profilen untermauert werden. Dies wurde bereits in Kapitel 5.2.1 für jeweils eine Zelle gezeigt.

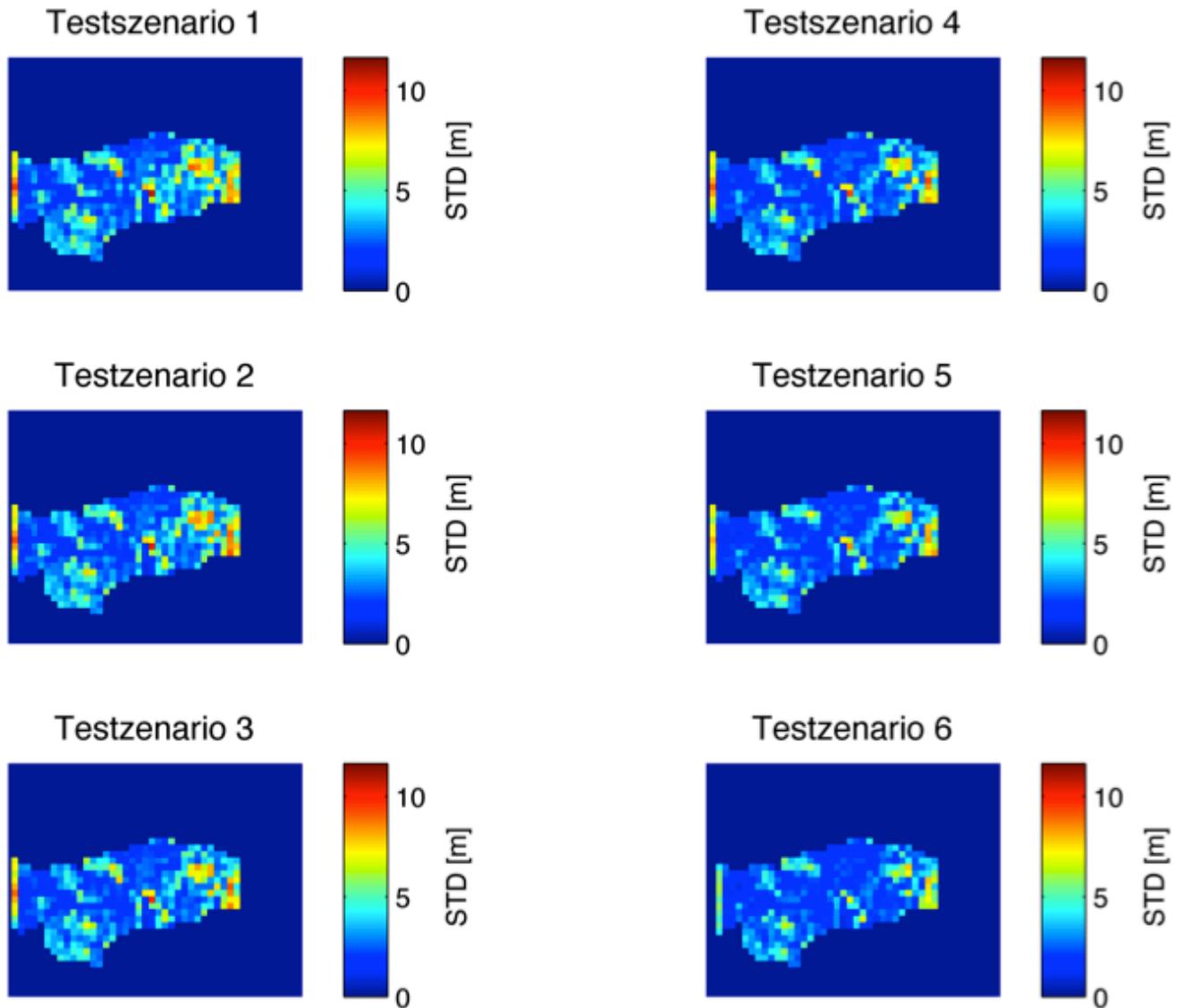


Abbildung 6.3: Oberflächenrauigkeiten 62% bis 93% Bildüberlappungsbereich, Stereomatching

Abbildung 6.4 zeigt die Gegenüberstellung der Testscenarien 1 bis 3 bzw. die korrespondierenden Szenarien 11 bis 13, welche den gleichen Bildüberlappungsbereich aufweisen, jedoch mit einem anderen Matchingverfahren berechnet wurden. Testscenario 1 und 11 bzw 2 und 12 zeigen keine signifikanten Differenzen, wogegen sich 3 und 13 deutlich voneinander unterscheiden. Die mittlere Standardabweichung in Testscenario 13 ist deutlich höher als in Szenario 3 und auch größer als in allen anderen photogrammetrischen Modellen (siehe *Tabelle 5.3*).

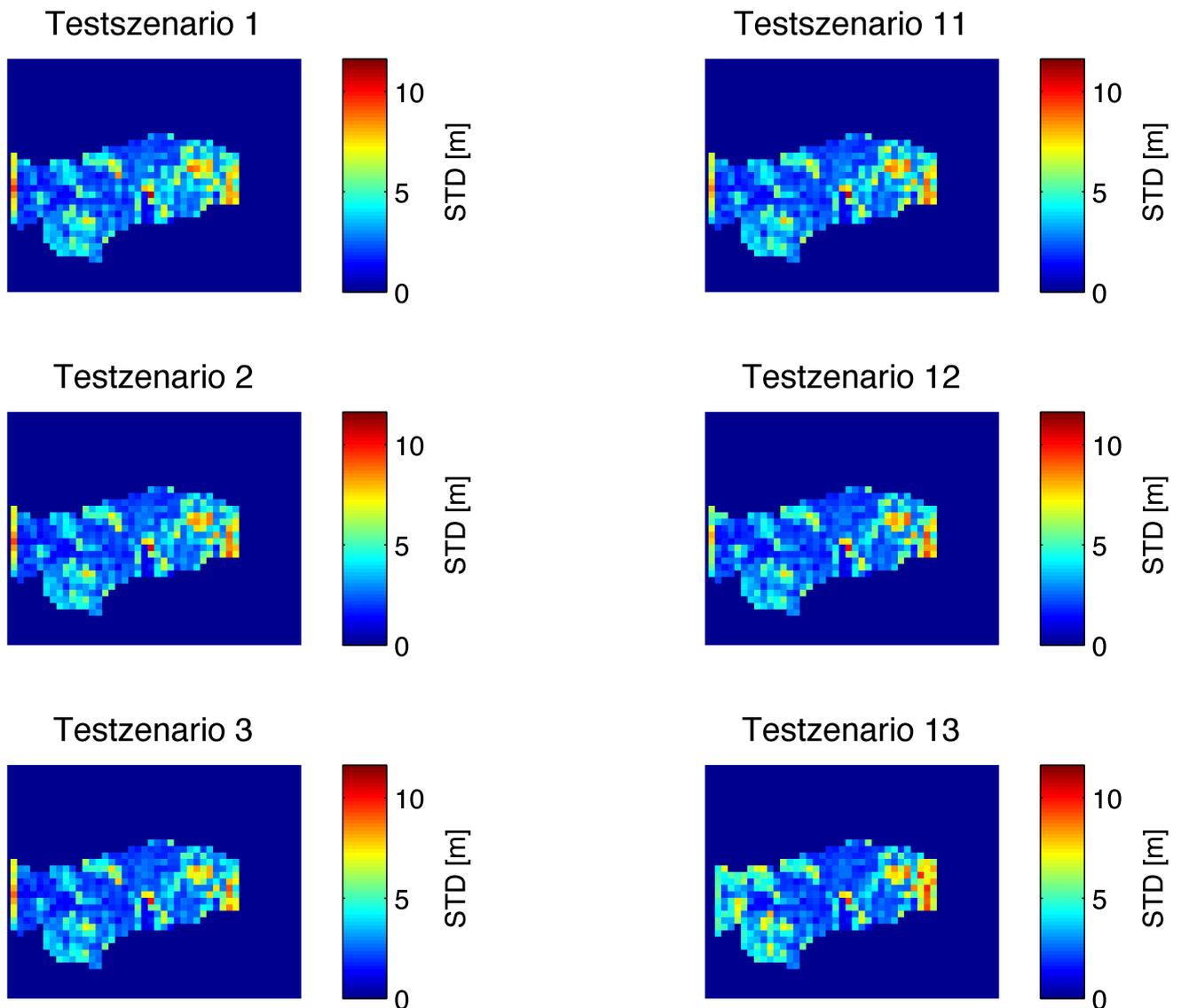


Abbildung 6.4: Gegenüberstellung der Oberflächenrauigkeiten der unterschiedl. Matchingalgorithmen

Der Grund dafür sind Fehler im digitalen Oberflächenmodell. Bei der Betrachtung des DOMs (Abbildung 6.5) fällt sofort auf, dass das Modell „Löcher“, welche auf Probleme beim Matching zurückzuführen sind, enthält. Diese werden fälschlicherweise als grobe Oberflächenrauigkeit ausgegeben.

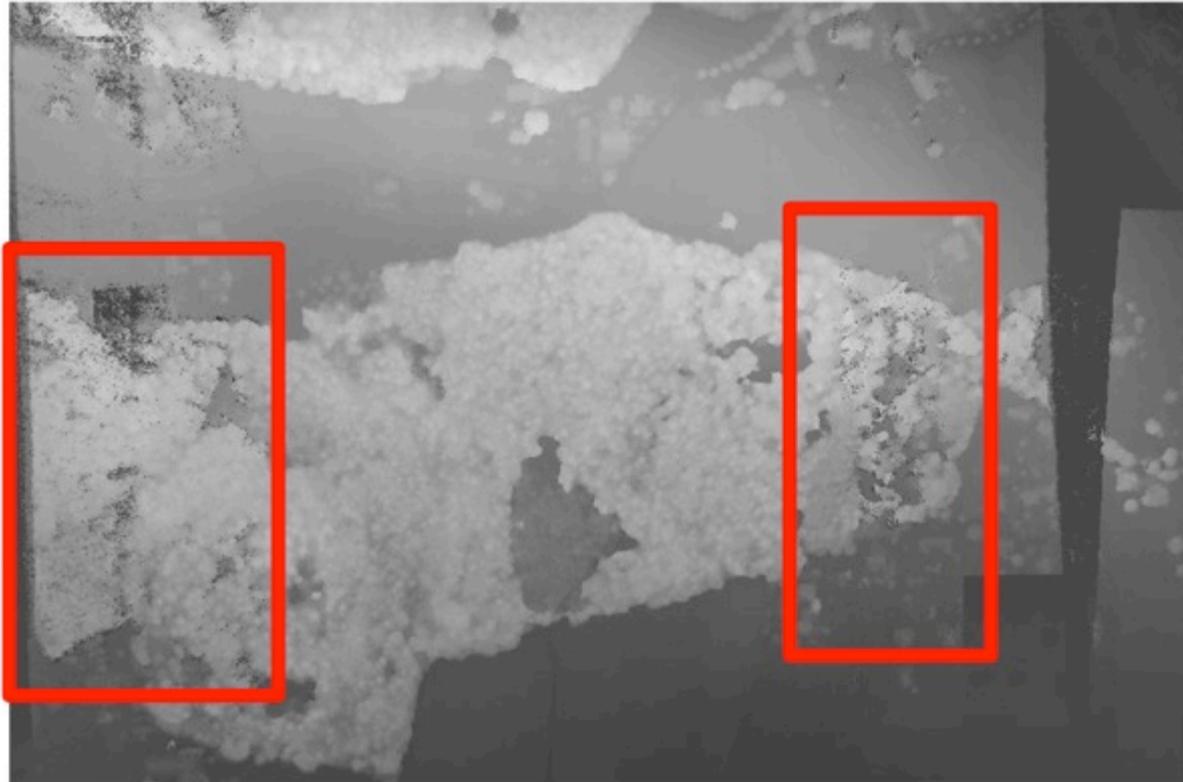


Abbildung 6.5: "Löcher" im digitalem Oberflächenmodell Teststzenario 13

Zuletzt wurde noch der Vergleich der Oberflächenrauigkeit mit dem ALS-Oberflächenmodell angestellt. In *Abbildung 6.6* ist auf der linken Seite das photogrammetrische DOM mit der größten Oberflächenrauigkeit (93% Bildüberlappungsbereich) und auf der rechten Seite die Rauigkeit des ALS-Modells dargestellt. Dabei ist deutlich zu sehen, dass bei dem ALS-DOM größere Standardabweichungen zu finden sind als beim Vergleichsmodell.

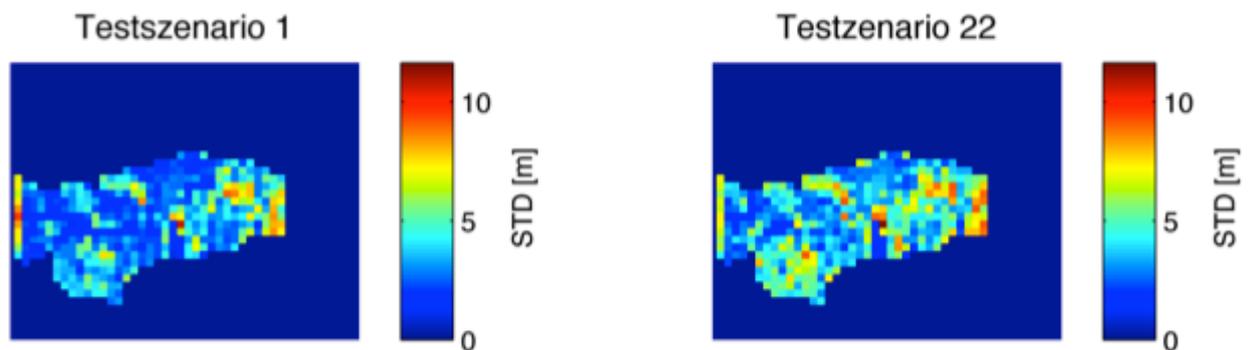


Abbildung 6.6: Gegenüberstellung der Oberflächenrauigkeiten der DOM mit 93% Overlap und ALS

Das wird auch in *Abbildung 6.7* ersichtlich. Bei Lichtungen werden zum Beispiel die Bruchkanten bei ALS deutlich schärfer definiert als bei den photogrammetrischen Modellen.

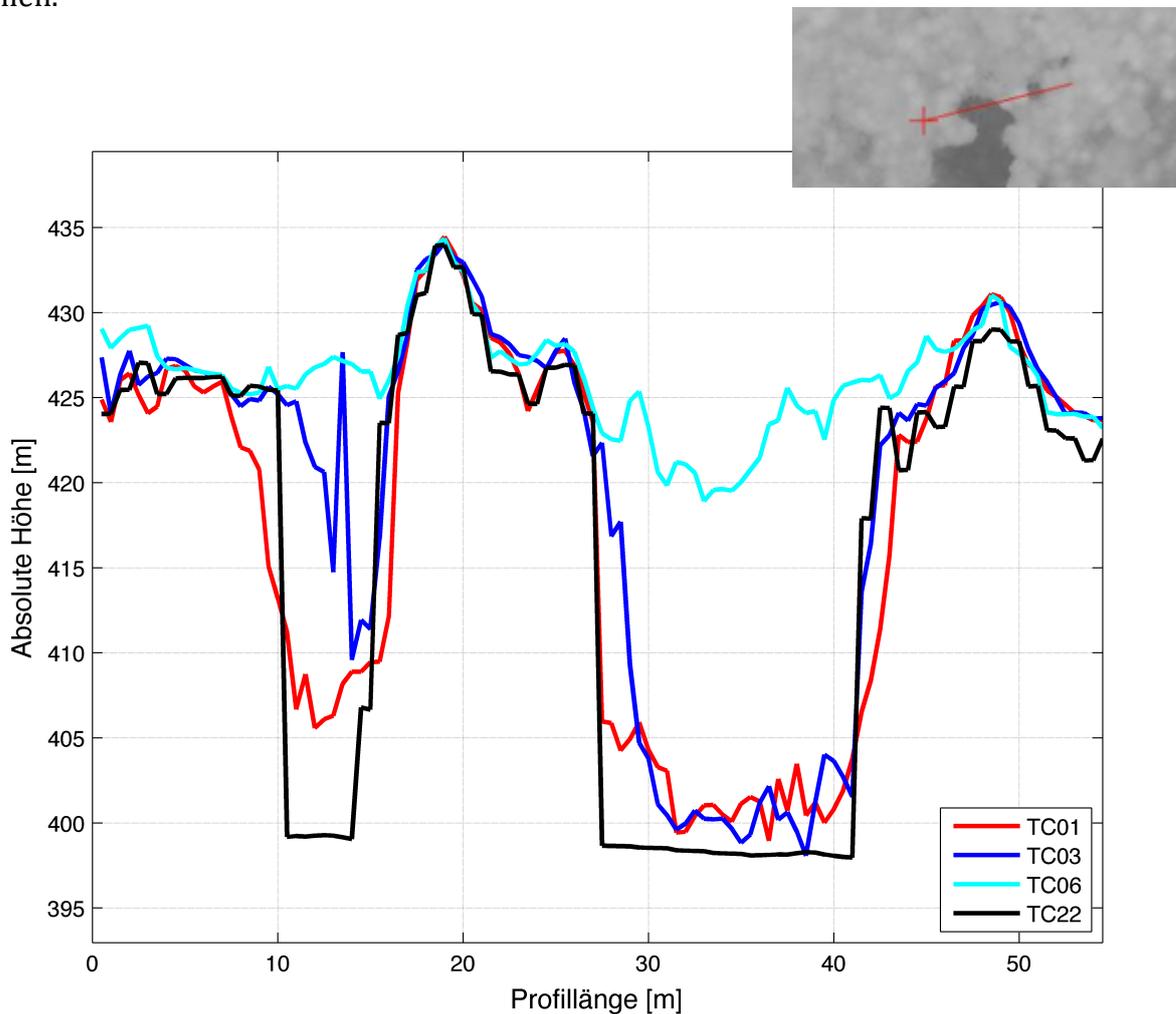


Abbildung 6.7: Gegenüberstellung der Profile aus photogrammetrischen DOMs und des ALS DOMs (schwarz)

Zusammenfassend kann zur Oberflächenrauigkeit folgendes gesagt werden:

Aufgrund der in *Abbildung 5.17* dargestellten Mittelwerte der Standardabweichungen der Höhenwerte von der Ebene (pro Testszenario) geht hervor, dass die Oberflächenrauigkeiten annähernd linear mit dem Bildüberlappungsbereich zusammenhängt. Deshalb ist es nicht möglich einen „break-even-point“ zu definieren, ab welchem die Steigerung des Bildüberlappungsbereiches keinen Sinn mehr ergibt.

6.4 Schlussfolgerung

Basierend auf den gezeigten Ergebnissen können zusammenfassend folgende zwei fundamentale Aussagen für die Wahl des Bildüberlappungsbereiches getroffen werden:

- 1) *Auf Basis der Vergleiche der digitalen Oberflächenmodelle mit den Referenzmessungen wurde gezeigt, dass sich **nur geringe Änderungen in den Baumhöhen aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmekonstellationen ergeben.***

- 2) *Mit steigendem Bildüberlappungsbereich kann ein Kronendach eines Waldes **besser modelliert werden**, da mit größerem Bildoverlap detailliertere Modelle berechnet werden können. Mit geringeren Überlappungsbereichen werden die digitalen Oberflächenmodelle zunehmend glatter.*

7 Ableitung des Aufnahmekonzepts

Das Ziel dieser Masterarbeit war die Ableitung eines Aufnahmekonzepts im Rahmen von Befliegungen mit der ADAM-Plattform im Forstbereich. Dieses Konzept stützt sich auf die im vorhergehenden Kapitel gewonnenen Erkenntnisse zur Auswahl des Bildüberlappungsbereichs.

Der enorme Vorteil der Flugplattform liegt darin, dass diese unabhängig vom Fluggerät betrieben werden kann. Das bedeutet, dass für Aufnahmen nicht ein Flugzeug mit dem Aufnahmeinstrumentarium an den Einsatzort gebracht werden muss, sondern nur die Aufnahmeplattform an sich. Das Flugzeug wird dann vor Ort angemietet und innerhalb von 20 Minuten kann die Plattform am Flügelholm montiert und einsatzfähig gemacht werden (*Abbildung 7.1*).



Abbildung 7.1: ADAM-Flugaufnahmeplattform an Cessna 182 Skyline

Die Stromversorgung erfolgt entweder über eine Batterie (eingeschränkte Reichweite, da die Plattform nur 30 Minuten betrieben werden kann) oder über einen Generator. Die Plattform ist somit, außer am Flügelholm, nicht mit dem Flugzeug verbunden. Die ADAM-Plattform ist für folgende Cessnas zertifiziert:

- 172 Skyhawk
- 177 Cardinal
- 182 Skyline
- 206 Stationair
- 208 Cargomaster

Aus den Schlussfolgerungen in Kapitel 6.4 geht hervor, dass digitale Oberflächenmodelle eines Kronendachs mit steigendem Bildüberlappungsbereich detailreicher modelliert werden können. Aus dieser Sicht sollte bei Aufnahmen im Forstbereich somit ein optimal möglicher Bildoverlap angestrebt werden.

Die Wahl des Bildüberlappungsbereiches hängt von folgenden Faktoren ab:

- Minimale Bildrate
- Minimale Fluggeschwindigkeit
- Flughöhe oder Bodenauflösung (miteinander korreliert)
- Kameraspezifikationen

Bei der ADAM-Plattform beträgt das minimale Auslöseintervall zwischen zwei Aufnahmezeitpunkte 3 s. Die minimale Fluggeschwindigkeit hängt von der Art der Stromversorgung ab. Im Generatorbetrieb sind das 100 Knoten, da bei geringeren Geschwindigkeiten nicht ausreichend Strom zur Versorgung der einzelnen Sensoren erzeugt werden kann. Im Batteriebetrieb hingegen hängt die minimale Fluggeschwindigkeit vom Flugzeugtyp ab. Bei der Cessna 172 „Skyhawk“ sind das 45 Knoten. Jedoch kann die Plattform derzeit mit dieser Einstellung nur für ca. 30 Minuten betrieben werden.

Darüber hinaus hängt der Überlappungsbereich auch von der Wahl der Flughöhe oder der Bodenauflösung ab. Aufgrund der Kameraspezifikationen (Brennweite und Pixelgröße am Sensor) kann entweder die Höhe über Grund oder die Auflösung am Boden vorgegeben werden. Der andere Faktor ist mit der Inputgröße korreliert (siehe Formel 3.1).

Für die Wahl des Bildüberlappungsbereiches ist auch noch ein weiterer Faktor zu berücksichtigen – die Rechenzeit. Die Steigerung des Überlappungsbereiches bedeutet auch eine steigende Prozessierungszeit. Die Dauer der Berechnung eines digitalen Oberflächenmodells hängt von der Anzahl der Luftbilder im Bildverband ab. Als Beispiel sind die Berechnungszeiten für dieses Projekt für das automatische Tiepointing (Kapitel 4.4) und für das Matching (Kapitel 4.7) pro Bildpaar in *Tabelle 7.1* bzw. die anschließende Berechnung des DOMs (in Abhängigkeit der Anzahl der Bilder) in *Tabelle 7.2* angegeben.

Tabelle 7.1: Berechnungsdauer Tiepoints & Matching pro Bildpaar

Bearbeitungsschritt	Berechnungsdauer [min]
Tiepointing	2
Matching	7

Tabelle 7.2: Berechnungsdauer Erstellung eines DOMs

Testszenario	Anzahl der Bilder	Dauer [min]
1	21	124
3	7	24
6	4	11

Für die Berechnung wurde folgende Hardware verwendet:

- Octa-Core-Prozessor
- Intel(R) Xeon(R) CPU E31245 @ 3,30GHz
- Arbeitsspeicher: 16,0 GB
- Systemtyp: 64bit
- Speicher: Intel(R) ICH8R/ICH9R/ICH10R/DO SATA-RAID-Controller

Aus Sicht der ökonomischen Datenauswertung sollte die Wahl des Bildüberlappungsbereiches immer dem Zweck und den Anforderungen an das digitale Oberflächenmodell angepasst werden. Bei größeren Bildverbänden von einigen hundert Luftbildern (für die Befliegung eines Regenwaldes zum Beispiel) steigt die Prozessierungsdauer erheblich. Alle zuvor beschriebenen Faktoren wurden in die Überlegungen zum Konzept eingebunden. Auf Basis der Formel 3.1 wurden für vorgegebene Flughöhen bzw. Bodenauflösungen die Bildüberlappungsbereiche berechnet und in den *Tabelle 7.3* bis *Tabelle 7.6* dargestellt. *Tabelle 7.3* und *Tabelle 7.4* liegt eine Fluggeschwindigkeit von 100 Knoten (Stromversorgung durch Generator) zu Grunde. *Tabelle 7.5* und *Tabelle 7.6* wurden anhand des batteriebetriebenen Plattformbetriebs (45 Knoten) berechnet. Das Auslöseintervall der Kamera wurde für alle Überlegungen mit 3 s festgelegt.

Tabelle 7.3: Vorgabe der Bodenauflösung, Fluggeschwindigkeit im Medium 100 Knoten

Bodenauflösung [cm]	Overlap [%]	Flughöhe [m]	Abdeckung „across“ [m]
15	68	1014	731
25	81	1690	1218
35	86	2365	1705

Tabelle 7.4: Vorgabe der Flughöhe, Fluggeschwindigkeit im Medium 100 Knoten

Flughöhe [m]	Overlap [%]	Bodenauflösung [cm]	Abdeckung „across“ [m]
1000	68	15	721
2000	84	30	1442
3000	89	44	2163

Tabelle 7.5: Vorgabe der Bodenauflösung, Fluggeschwindigkeit im Medium 45 Knoten

Bodenauflösung [cm]	Overlap [%]	Flughöhe [m]	Abdeckung „across“ [m]
15	86	1015	731
25	91	1690	1218
35	94	2365	1705

Tabelle 7.6: Vorgabe der Flughöhe, Fluggeschwindigkeit im Medium 45 Knoten

Flughöhe [m]	Overlap [%]	Bodenauflösung [cm]	Abdeckung „across“ [m]
1000	86	15	721
2000	93	30	1442
3000	95	44	2163

Aus *Tabelle 7.3* und *Tabelle 7.4* geht hervor, dass eine Bodenauflösung von 25 cm, aufgrund der Fluggeschwindigkeit bereits eine Flughöhe von annähernd 1700 m über Grund erfordert und lediglich einen Bildüberlappungsbereich von 81% liefert. Da diese Höhe aber speziell bei Aufnahmen im Regenwald schon über der Wolkengrenze liegt, wird derzeit an einer Verbesserung der Generatorleistung gearbeitet. Dadurch sollten geringere Fluggeschwindigkeiten erreicht werden können. Das Ziel ist es, die Aufnahmen mit 65 Knoten durchführen zu können. Für diese Flugparameter wurden die *Tabelle 7.7* und *Tabelle 7.8* erstellt.

Tabelle 7.7 Vorgabe der Bodenauflösung, Fluggeschwindigkeit im Medium 65 Knoten

Bodenauflösung [cm]	Overlap [%]	Flughöhe [m]	Abdeckung „across“ [m]
15	86	1015	731
25	91	1690	1218
35	94	2365	1705

Tabelle 7.8 Vorgabe der Flughöhe, Fluggeschwindigkeit im Medium 65 Knoten

Flughöhe [m]	Overlap [%]	Bodenauflösung [cm]	Abdeckung „across“ [m]
1000	86	15	721
2000	93	30	1442
3000	95	44	2163

Mit diesen getroffenen Einstellungen könnte die Flughöhe um 700 m reduziert werden, und gleichzeitig könnte der Bildüberlappungsbereich in Flugrichtung, bei gleichbleibender Bodenauflösung (15 cm), von 68% auf 86 % gesteigert werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war die Ableitung eines Konzepts für die Aufnahmekonstellation von Luftbildern im Forstbereich. Dieses Konzept soll in Zukunft für die Durchführung von Luftbildaufnahmen mit der ADAM Flugaufnahmeplattform im Forstbereich herangezogen werden.

Für die Ableitung der Ergebnisse dieser Masterarbeit stand ein hoch redundanter Bilddatensatz (93% Überlappungsbereich in Flugrichtung) von einer Befliegung eines Forstgebietes zur Verfügung. Zuerst erfolgte die Auswahl eines geeigneten Testgebietes. Für die Lagerung des Bilddatensatzes wurden Passpunkte im Feld durch eine terrestrische Vermessung bestimmt. Diese wurden anschließend in den Luftbildern eingemessen.

Um unterschiedliche Aufnahmekonstellationen simulieren zu können, wurde der vorhandene Bilddatensatz ausgedünnt und verschiedene Testszenarien in Abhängigkeit des Bildüberlappungsbereiches definiert. Bevor die eigentliche Berechnung der Oberflächenmodelle durchgeführt werden konnte, mussten die Bilddaten vorverarbeitet werden um systematische Einflüsse wie die Verzeichnung und die Vignettierung zu entfernen. Darüber hinaus wurden für den gesamten Bilddatensatz vorweg einheitliche Verknüpfungspunkte mit Hilfe des „SURF“-Algorithmus automatisch berechnet. Damit wurde sichergestellt, dass bei jeder Aufnahmekonstellation die identen Verknüpfungspunkte verwendet wurden. Anschließend wurde für jedes Testszenario ein digitales Oberflächenmodell berechnet. Insgesamt wurden neun photogrammetrische Oberflächenmodelle mit zwei unterschiedlichen Matchingalgorithmen berechnet.

Im nächsten Schritt erfolgte die Validierung der Modelle. Dafür wurden einerseits Referenzmessungen im Feld durchgeführt, andererseits erfolgte die Evaluierung der Ergebnisse modellbasiert.

Die eingemessenen Baumwipfel wurden in den digitalen Oberflächenmodellen lokalisiert und es wurden die Höhendifferenzen bestimmt. Zusätzlich wurde auch ein digitales Oberflächenmodell aus einer ALS-Befliegung herangezogen und mit den photogrammetrischen Modellen gegenübergestellt. Die Erkenntnis aus diesem Schritt war, dass es Unterschiede in den Baumhöhen aufgrund der unterschiedlichen

Aufnahmekonstellation gab, diese sich jedoch nicht zu stark auswirkten. Die Differenz zwischen der größten und der kleinsten mittleren Abweichung betrug 0,2 m.

Beim modellbasierten Ansatz wurde als Qualitätsparameter für den Vergleich von Oberflächenmodellen die Oberflächenrauigkeit definiert. Bei diesem Ansatz wurde das Testgebiet in gleich große 20×20 m Zellen aufgeteilt. Pro Zelle erfolgte die Bestimmung eines Wertes für die Oberflächenrauigkeit. Dafür wurde innerhalb der Zelle eine Ebene bestimmt und die Standardabweichung der Höhenwerte von dieser Fläche berechnet. Die Bestimmung der Oberflächenrauigkeit erfolgte für jedes digitale Höhenmodell (inkl. dem ALS-Modell). Pro Testszenario wurde aus allen Zellen des Testgebietes ein mittlerer Wert für die Oberflächenrauigkeit berechnet. Dabei wurde festgestellt, dass mit steigendem Bildüberlappungsbereich das Kronendach des Waldes detailreicher rekonstruiert werden konnte. Der Vergleich mit dem ALS-Modell zeigte jedoch, dass im Falle des Laserscanner Modells, speziell im Bereich von Lichtungen, die Bruchkanten besser definiert werden konnten.

Ausgehend von den Erkenntnissen für die photogrammetrisch erzeugten Modelle wurde ein Aufnahmeconcept für die Durchführung von Luftbildaufnahmen mit der ADAM-Plattform erstellt.

Aus zeitlichen Gründen und wegen des nicht vorhandenen Datenmaterials erfolgten die Untersuchungen des Bildüberlappungsbereichs bei dieser Masterarbeit nur in Flugrichtung. Die getätigten Aussagen zur Aufnahmegeometrie sind daher nur für Streifenbefliegungen gültig. Ausgehend von den Erkenntnissen dieser Abschlussarbeit besteht die Möglichkeit, den Einfluss quer überlappender Flugstreifen in die Überlegung miteinzubeziehen.

9 Literaturverzeichnis

- Allied Vision Technologies. (2010). GE4900/GE4900C Technical Manual 700031A. Burnaby, Canada.
- Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten. (2012). Das digitale Luftbild - ein Praxisleitfaden für Anwender im Forst- und Umweltbereich. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Band 7. Universitätsverlag Göttingen.
- Baltsavias, E., Gruen, A., Eisenbeiss, H., Zhang, L., & Waser, L. (2008). High-quality image matching and automated generation of 3D tree models. *International Journal of Remote Sensing* Vol 29, No. 5, 1243-1259.
- Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., & Van Gool, L. (2008). Speed-Up Robust Features (SURF).
- Bayer, B. E. (1976). Color image array. U.S. Patent 3.971.065.
- Fusiello, A., & Irsara, L. (2008). Quasi-Euclidean Uncalibrated Epipolar Rectification. *International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*.
- Gruen, A., & Zhang, L. (2003). Automatic DTM generation from TLS data.
- Hirschmüller, H. (2008). Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 30, No. 2.
- Hirschmugl, M. (2008). Derivation of Forest Parameters from UltracamD Data. Dissertation. Technische Universität Graz
- Hofmann-Wellenhof. (2008). GNSS - Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo and more. Springer, Wien.
- Hofmann-Wellenhof, Bernhard; Legat, Klaus; Wieser, Manfred. (2003). Navigation. Principles of Positioning and Guidance. Springer, Wien.
- Kaufmann, V. (2010). Bildmessung (LV 509.516, VO, 2010). Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, Technische Universität Graz.
- Kaufmann, V. (2011). Photogrammetrie (LV 509.503, VO, 2011). Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, Technische Universität Graz.
- Kraus, K. (2004). Photogrammetrie. Band 1: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7., vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage. Walter de Gruyter, Berlin.
- Leberl, F., Irschara, A., Poch, T., Meixner, P., Gruber, M., Scholz, S., et al. (2010). Point Clouds: Lidar versus 3D Vision. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 76, No. 10, pp. 1123-1134.
- Leica Geosystems AG. Leica TPS 1200+ Series High performance Total Station (Produktbroschüre). Heerbrugg.
- Lottmann, W. (2000). Untersuchungen und Realisierung eines Programms zur Lichtabfallkorrektur in digitalen Bildern. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung, Universität Hannover.

- Luhmann, T. (2010). *Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. 3., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Wichmann, Berlin.
- Mikhail, E., Bethel, J., & McGlone, J. (2011). *Introduction to modern photogrammetry*. John Wiley & Sons, Inc., New York
- Paar, G., & Pölzleitner, W. (1992). Robust disparity estimation in terrain modelling for spacecraft navigation. *Pattern Recognition, 1992. Vol.I. Conference A: Computer Vision and Applications, Proceedings, 11th IAPR International Conference*.
- Paparoditis, N., Souchan, J., Martinoty, G., & Pierrot-Dedeilligny, M. (2006). High-end digital cameras and their impact on the automation and quality of the production workflow *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. 60, Issue 6, Pages 400-412*.
- Perko, R. (2004). *Computer Vision for large digital aerial cameras*. Dissertation, Institute for Computer Graphics and Vision, Technische Universität Graz.
- Raggam, H. (2006). Surface Mapping Using Image Triplets: Case studies and Benefit Assessment in Comparisson to Stereo Image Processing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 72, No. 5, pp. 551-563*.
- RSG. (2003). *RSG Software Documentation*. Versionsnummer 7.05. Joanneum Research, Graz.
- Schardt, M. (2008). *Umweltmonitoring mittels Fernerkundung*. Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, Technische Universität Graz.
- Straub, C. (2011). Generation of digital surface models from aerial images in Bavaria. Invited presentation for the seminar "DSM creation from digital aerial images" at the Norwegian Forest and Landscape Institute, Ås-Norway.
- Straub, C., & Seitz, R. (2012). Möglichkeiten der Schätzung von Bestandsoberhöhen und des Holzvorrats auf der Grundlage von digitalen Stereo-Luftbildern - ein Vergleich mit flugzeuggetragenen Laserscannerdaten. Beitrag im Tagungsband der 32. GIL Jahrestagung (Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft), Weihenstephan.
- von Teuffel, K., Baumgarten, M., Konold, W., Sauter, U. H., Spiecker, H., & von Wilpert, K. (2005). *Waldumbau für ein zukunftsorientierte Waldwirtschaft*. Springer, Berlin-Heidelberg.
- Waypoint Products Group. (2007). *Inertial Explorer User Guide*.
- Zhang, L., & Gruen, A. (2006). Multi-Image matching for DSM generation from IKONOS imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing Vol. 60, No. 3*.