



DIPLOMARBEIT

Ableitung von Geländemodellen aus UAV-Daten am Beispiel der Deponie Rautenweg

zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplomingenieurs (Dipl. Ing.)

ausgeführt am

Department für Geodäsie und Geoinformation
Forschungsgruppe Photogrammetrie
der Technische Universität Wien

unter der Anleitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Norbert Pfeifer

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Briesse
Dipl.-Ing. Dr. techn. Camillo Ressler
Dipl.-Ing. Martin Wieser

durch

Boris Bogensberger
Hahngasse 18/4-5
1090 Wien

20.10.2015

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Norbert Pfeifer und meinem Betreuersteam Martin Wieser, Camillo Ressler und Christian Briese, die mir in jeder Phase meiner Diplomarbeit eine große Unterstützung waren.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Studienkollegen Andi und Gerhard für ihre Unterstützung und die unterhaltsamen und diskussionsreichen Mittagspausen, die mich von Anfang bis zum Ende meines Studiums begleitet haben.

Ein großes Dankeschön auch an Hubert Lehner, stellvertretend für die Stadtvermessung MA41, für die zur Verfügungsstellung der ALS Daten und die Organisation weiterer Messkampagnen im Zuge meiner Diplomarbeit. Weiters bedanke ich mich bei der Deponieleitung der MA48, für die gute Kooperation und die Zutrittsgenehmigung zur Deponie für meine Messeinsätze.

Last but not least gebührt mein Dank all meinen Freunden und Familienmitgliedern die mich während der letzten Monate moralisch unterstützt haben, allen voran Angelika. Vielen Dank für eure großartige Unterstützung!

Gewidmet meinen Eltern.

Kurzfassung

Große Gebiete, wie z.B. Deponien oder Tagebaue, lassen sich vom Boden aus - beispielsweise mittels GNSS - kaum wirtschaftlich vermessen. Es wird daher häufig auf luftgestützte Verfahren, wie das ALS (engl.: Airborne Laserscanning) oder auf photogrammetrische Verfahren, bei denen Luftbilder ausgewertet werden, zurückgegriffen. Heute kommen für derartige Vermessungen vermehrt autonom fliegende kleine Luftfahrzeuge, sogenannte UAVs (engl.: Unmanned Aerial Vehicle), die mit digitalen Amateurkameras bestückt werden, zum Einsatz.

Inhalt dieser Diplomarbeit ist der Vergleich von digitalen Höhenmodellen der Deponie Rautenweg in Wien, welche mit Hilfe von ALS einerseits und UAV-Photogrammetrie andererseits, erstellt wurden. Es werden dazu digitale Geländemodelle (DGMe) aus UAV- und ALS-Daten verglichen. Zusätzlich werden Höhendifferenzen zwischen gemessenen GNSS-Kontrollpunkten und den abgeleiteten DGMe ermitelt. In einem kleinen Testgebiet innerhalb der Deponie wird genauer untersucht, welchen Einfluss die Vegetation, die bei der Vermessung aus der Luft stets einen Störfaktor darstellt, auf die erstellten Geländemodelle besitzt.

Es wird ein Lösungsansatz vorgestellt, der mit Hilfe des Vegetationsindex NDVI, eine stufenweise Ermittlung von DGMe aus Luftbildern vorschlägt. Hierfür wird das Messgebiet in zwei Klassen (vegetationsfrei und mit Vegetation), welche auf den NDVI-Werten beruhen, eingeteilt. Für Gebiete mit Vegetation wird eine Reduktionsmethode getestet, bei der versucht wird Bodenpunkte in Vegetationslücken zu finden, um so das DGM zu verbessern. Es wird gezeigt, dass durch diese Methode eine Verbesserung des UAV-DGMe in bewachsenen Gebieten erzielt werden kann.

Das Ergebnis dieser Diplomarbeit ist ein, aus UAV-Luftbildern abgeleitetes, DGM. Die Analysen zeigen, dass die Messmethode der UAV-Photogrammetrie sehr genaue Ergebnisse liefern kann und somit eine wirtschaftliche Alternative zum ALS darstellt.

Systematische Fehler zwischen den Messmethoden werden analysiert. Die Analysen zeigen, dass ein eindeutiges und wohl definiertes Koordinatensystem für alle beteiligten Messmethoden eine Grundvoraussetzung genauerer Gegenüberstellungen verschiedener Messmethoden darstellt.

Schlagwörter: Deponievermessung, Luftbildvermessung, UAV, ALS, NDVI, DGM

Abstract

Large areas, such as landfills or open pits, are almost impossible to economically survey from the ground through e.g. GNSS. This is why airborne techniques, such as ALS (Airborne Laserscanning) or aerial photogrammetry are often used. Today small autonomously flying aircraft, so called UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) with non-professional digital cameras are frequently used for this type of surveying job.

Content of this thesis is the comparison of digital elevation models of the landfill Rautenweg in Vienna, which were created based on data from ALS, on the one hand, and UAV photogrammetry, on the other hand. Digital terrain models (DTMs) from UAV and ALS data are also compared to GNSS control points. The influence of the vegetation, which is always an interfering factor in aerial surveying, on the terrain model is explored on a small test area within the landfill.

Moreover, an approach is introduced, which suggests a gradual calculation of DTMs based on the Normalized Differenced Vegetation Index. For this purpose the surveying area is divided into two classes (free from vegetation and with vegetation) based on the NDVI values. A reduction method for areas with disperse vegetation is tested. In this method the point with the greatest distance below the digital surface model is calculated, in order to improve the DGM. It will be shown that through this application an improvement of the UAV-DTM can be achieved in overgrown areas.

The result of this thesis is a DTM derived from UAV aerial photos. It will be shown that the method of UAV photogrammetry provides very precise results and is thus an economical alternative to ALS.

Moreover, systematic errors between the derived DTMs are investigated. The analysis shows that it is very important to define a proper reference coordinate system for all involved surveying methods.

Keywords: landfill survey, aerial surveying, UAV, ALS, NDVI, DTM

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Begriffsbestimmung.....	1
1.1	Motivation und Ziel der Arbeit.....	1
1.2	Methodik.....	2
1.3	Aufbau der Arbeit.....	3
2	Grundlagen.....	5
2.1	UAV.....	5
2.1.1	Definition und Typen.....	5
2.1.2	Rechtliche Situation in Österreich.....	6
2.2	Photogrammetrische Auswertung.....	6
2.3	Aerotriangulation.....	8
2.3.1	Bündelblockausgleichung.....	10
2.3.2	Bestimmung der Verknüpfungspunkte.....	11
2.3.2.1	Interest Operatoren.....	12
2.3.2.2	Merkmalsbasierte Korrelation.....	13
2.3.2.3	Kleinste-Quadrate-Korrelation.....	13
2.4	Dense Image Matching.....	13
2.4.1	Semi Global Matching.....	14
2.5	ALS.....	14
2.5.1	Qualitätsprüfung von ALS-Projekten.....	17
2.5.2	ALS-Streifenausgleichung.....	18
2.5.3	ICP.....	18
2.6	Prinzipienvergleich - ALS versus Photogrammetrie.....	20
3	State of the Art und Referenzprojekte.....	23
4	Projektgebiet und Daten.....	33
4.1	Projektgebiet.....	33
4.2	ALS-Flug.....	34
4.2.1	ALS-Passflächen.....	35
4.3	UAV-Flüge.....	35
4.3.1	UAV-Flugplanung.....	36
4.3.2	UAV-Passpunkte.....	37
4.3.3	Das Flugsystem Asctec Falcon 8.....	38
4.3.4	Kamera <i>Sony Nex-7</i>	38
4.4	Orthofoto Flug.....	39
4.5	Abrechnungsgrenze.....	39
4.6	GPS Kontrollpunkte.....	40
4.7	Vegetation.....	41
4.8	Projektverlauf – Zeitleiste.....	45
5	Datenprozessierung.....	47
5.1	ALS-Auswertung.....	47
5.1.1	Software.....	47
5.1.2	Qualitätskontrolle.....	48
5.1.3	ALS-Streifenausgleichung.....	49
5.1.4	Eigenschaften der ALS-DOM-Punktvolke.....	53
5.1.5	ALS-DGM.....	54
5.2	Photogrammetrische UAV-Auswertung.....	55

5.2.1 Software.....	55
5.2.2 Bestimmung der Kamerakalibrierung.....	56
5.2.3 Aerotriangulation.....	60
5.2.4 UAV-DOM.....	62
5.3 Infrarotdaten Auswertung und Bestimmung des NDVI.....	63
5.3.1 NDVI Klassifizierung.....	64
5.4 Schwierigkeiten.....	69
6 Analysen.....	71
6.1 Vegetationsfreie Flächen.....	72
6.1.1 ALS vs. UAV.....	72
6.1.2 Einschub – <i>SCOP++</i> vs. <i>OPALS</i> in glatten Bereichen.....	76
6.1.3 GPS vs. ALS und GPS vs. UAV.....	77
6.2 Flächen mit Vegetation.....	79
6.2.1 GPS vs. ALS und UAV in lockerer Vegetation.....	79
6.2.2 GPS vs. ALS und GPS vs. UAV in dichter Vegetation.....	81
6.2.3 Auswirkung der Vegetation auf das Gesamtvolumen.....	81
6.3 DGM Berechnung aus UAV-Daten im Testfeld TG150.....	84
6.3.1 Manuelle Bereinigung des DOMs (TG150).....	88
6.3.2 Klassifizierung (TG150).....	89
6.3.3 Berechnung des UAV-DGM in vegetationsfreien Flächen (TG150).....	90
6.3.4 Berechnung des UAV-DGMs in Flächen mit Vegetation (TG150).....	93
6.3.5 Mosaikierung der UAV-DGMe (TG150).....	95
7 Endergebnis.....	99
7.1 GPS vs. finalem UAV-DGM.....	101
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	103
Anhang:	I
Literaturverzeichnis.....	V

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten.....	7
Abbildung 2: Bildverband einer Blockausgleichung.....	9
Abbildung 3: Grundprinzip der Bündelblockausgleichung.....	10
Abbildung 4: Gruberpunkte in ebenem Gelände.....	11
Abbildung 5: ALS-Komponenten und Koordinatensysteme.....	15
Abbildung 6: Auswirkung der Boresight Winkel.....	16
Abbildung 7: Rangeoffset und Smiley-Effekt.....	17
Abbildung 8: Farbcodierte Höhendifferenzen zweier ALS-Streifen.....	18
Abbildung 9: Ausgangssituation vor der Ausgleichung mittels ICP Verfahren.....	19
Abbildung 10: Vergleich der verschiedenen ICP Auswahlmethoden.....	20
Abbildung 11: UAV Stereo Photogrammetrie.....	21
Abbildung 12: Airborne Laser Scanning.....	21
Abbildung 13: Forschungsprojekt "DredgDike".....	24
Abbildung 14: Cloud Compare Differenzmodell.....	25
Abbildung 15: 3D-Vergleich von Geländemodellen aus Socet Set und PMS.....	27
Abbildung 16: Differenzen zwischen den Punktwolken "Halde Humbert".....	28
Abbildung 17: Höhendifferenzen zwischen Singlet Pix4d und LiDAR DGM.....	30
Abbildung 18: Schrägluftaufnahme der Deponie Rautenweg mit Blick in Richtung Norden.....	33
Abbildung 19: Planung der ALS-Flugstreifen durch die Firma Airborne Technologies.....	34
Abbildung 20: Ursprüngliche ALS-Passflächenbereiche (li.).....	35
Abbildung 21: ALS-Passflächenbereiche der neuerlichen Messkampagne im Frühjahr 2015 (re.).....	35
Abbildung 22: Übersicht der UAV-Passpunkte.....	37
Abbildung 23: Asctec Falcon 8.....	38
Abbildung 24: Sony Nex-7 mit 16mm Objektiv.....	38
Abbildung 25: Deponie Abrechnungsfläche.....	40
Abbildung 26: Übersicht Photostandorte zur Kartierung der Vegetation.....	41
Abbildung 27: Flora I.....	43
Abbildung 28: Flora II.....	44
Abbildung 29: Projektverlauf von 08/2013 – 09/2015.....	45
Abbildung 30: Histogramm sämtlicher Streifendifferenzen.....	48
Abbildung 31: Mosaik der Streifendifferenzen im Untersuchungsgebiet.....	49
Abbildung 32: Differenzen von ALS-ALT und ALS-NEU nach ICP und Einmessung zusätzlicher Dachflächen.....	50
Abbildung 33: Diagramme der ALS-Streifendifferenzen nach der Streifenausgleichung mittels OPALS ICP.....	51
Abbildung 34: Große Streifendifferenzen am Parkplatz verursacht durch Bewegungen der Autos während des ALS-Flugs.....	53
Abbildung 35: ALS-Punktdichte innerhalb der Abrechnungsgrenzen.....	53
Abbildung 36: Schritte der UAV-Datenprozessierung.....	55
Abbildung 37: Untersuchte Kameraverkantungen.....	57
Abbildung 38: Kalibrierbild mit horizontaler Ausrichtung ($k \sim 0$ gon).....	57
Abbildung 39: Lage des Bildhauptpunkte bei unterschiedlichen Kantungen.....	58
Abbildung 40: Übersicht UAV-Verknüpfungspunkte.....	61
Abbildung 41: Punktdichte UAV-DOM.....	62
Abbildung 42: UAV-DOM mit absolutem Höhenfarbverlauf und Höhenschichtlinien.....	63
Abbildung 43: Musterflächen zur Klassifizierung mittels Bayes-Filter.....	65
Abbildung 44: Ergebnis der Bayes Klassifizierung mit zwei Klassen.....	66
Abbildung 45: Musterpolygon für Klasse 2 für dichte Vegetation.....	66
Abbildung 46: Ergebnis der Bayes Klassifizierung mit drei Klassen.....	67
Abbildung 47: NDVI inkl. vektorisierter Vegetationsmaske.....	68
Abbildung 48: Streifendifferenzen mit Modelldeformationen.....	70
Abbildung 49: Testfelder: Rot 10x10m, Geld 2x2m.....	73
Abbildung 50: Höhendifferenzen in glatten vegetationsfreien Gebieten.....	74
Abbildung 51: Höhendifferenzen ALS vs. UAV in glatten vegetationsfreien Gebieten.....	75

Abbildung 52: UAV-Passpunkt 5.....	75
Abbildung 53: Histogramm der Höhendifferenzen zw. SCOP++ mit angepasstem Thinout Filter und OPALS „Moving Planes“ Interpolation.....	76
Abbildung 54: Korrelation zwischen NDVI und Vegetationshöhe.....	81
Abbildung 55: Übersicht Position Testgebiet 150.....	84
Abbildung 56: RGB Orthofoto, aus zusätzlichen Luftbildern des ALS Flugs, imTG150.....	85
Abbildung 57: Schattierung ALS-DOM im TG150.....	86
Abbildung 58: Schattierung ALS-DGM mit SCOP++ "Lidar DTM Default" Filter im TG 150.....	86
Abbildung 59: Schattierung UAV-DOM im Testgebiet 150.....	87
Abbildung 60: Kochrezept DGM aus UAV-Daten mittels NDVI.....	88
Abbildung 61: Höhenschichtlinien von Müllballen im UAV-DOM (linkes Bild).....	89
Abbildung 62: zRange von Abfallmulden im UAV-DOM (rechtes Bild).....	89
Abbildung 63: Testgebiet TG150: Vegetationsmaske mit 2 Klassen.....	90
Abbildung 64: Histogramm der Höhendifferenzen zwischen den ALS- und UAV DGMen in vegetationsfreien Gebieten des Testgebiets TG150.....	91
Abbildung 65: Höhendifferenzen zwischen den ALS- und UAV DGMen in vegetationsfreien Gebieten.	91
Abbildung 66: Höhendifferenzen ALS vs. UAV (Datumskorrigiert durch Höhenversatz).....	92
Abbildung 67: Profilschnitt durch Testgebiet TG10.....	93
Abbildung 68: Profilschnitt durch Testgebiet TG150.....	93
Abbildung 69: Höhendifferenzen ALS-DGM vs. UAV-DOM mit OPALS MP vor der „dZmin“ Reduktion.....	94
Abbildung 70: Höhendifferenzen ALS-DGM vs. UAV-DGM mit „dZmin" Reduktion.....	94
Abbildung 71: Mosaikierung des UAV-DGMs.....	95
Abbildung 72: Vegetationsmaske mit OPALS „Statfilter“.....	96
Abbildung 73: Finales UAV-DGM im Testgebiet TG150.....	96
Abbildung 74: Histogramm ALS-DGM vs. finalem UAV-DGM (TG150).....	97
Abbildung 75: Histogramm Differenzen ALS-DGM vs. UAV-DGM der Deponie.....	99
Abbildung 76: Finales Differenzmodell ALS-DGM vs. UAV-DGM der Deponie.....	100
Abbildung 77: Ausschnitt Baumgruppe mit großer Höhendifferenz.....	101
Abbildung 78: Höhendifferenzen ALS-SCOP++ LD DGM vs. ALS-MA41 DGM.....	105
Abbildung 79: Schattierung ALS-DGM innerhalb der Abrechnungsgrenzen.....	106
Abbildung 80: Schattierung ALS-DGM der gesamten Deponie (MA41).....	107

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Kategorisierung der Luftfahrzeuge anhand von Einsatzgebiet und Gewicht.....	6
Tabelle 2: Technische Spezifikationen der Kamera.....	39
Tabelle 3: Technische Spezifikationen Objektiv.....	39
Tabelle 4: Residuen der UAV-Passpunkte bei der Bestimmung der GPS Transformationsparameter (Messkampagne 09/2015).....	40
Tabelle 5: Streifenanalyse.....	52
Tabelle 6: ALS Return Echos.....	54
Tabelle 7: Erklärung der Histogramm-Kennwerte von OPALS Histo.....	71
Tabelle 8: Histogramm-Kennwerte ALS – UAV-Differenzen in den Testfeldern.....	72
Tabelle 9: Höhendifferenzen zwischen GPS-Kontrollhöhen und ALS, sowie zwischen GPS- Kontrollhöhen und UAV im Bereich von vegetationsfreien Flächen.....	78
Tabelle 10: Höhendifferenzen GPS vs. ALS vs. UAV in lockerer Vegetation.....	80
Tabelle 11: Höhendifferenzen GPS vs. ALS vs. UAV in dichter Vegetation >50cm.....	83
Tabelle 12: Höhendifferenzen ALS vs. UAV in vegetationsfreien Gebieten.....	92
Tabelle 13: Histogramm-Kennwerte der Höhendifferenzen von ALS vs. UAV in vegetationsfreien Gebieten.....	95
Tabelle 14: Höhendifferenzen GPS vs. finalem UAV in lockerer Vegetation.....	102
Tabelle 15: Höhendifferenzen GPS vs. finalem UAV in dichter Vegetation.....	102

Verzeichnis des Anhangs

Anhang I: Ergebnisse der Kamerakalibrierung.....	I
Anhang II: Ergebnisse des ALS-Streifenausgleichs mittels ICP Algorithmus.....	II
Anhang III: Ergebnisse der Aerotriangulation mittels Orient.....	III

Verzeichnis der Formeln

Formel 1: Mathematischer Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten.....	8
Formel 2: Faustformel ALS-Höhengenaugigkeit.....	21
Formel 3: Vegetationsindex NDVI.....	64
Formel 4: Bayes-Theorem.....	64
Formel 5: Wahrscheinlichkeit nach Bayes dass das Muster i zur Klasse j gehört.....	64

Verzeichnis der Abkürzungen

ALS	Airborne Laser Scanning
DEM	Digital Elevation Model
DGM	Digitales Geländemodell
DHM	Digitales Höhenmodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DSM	Digital surface model
DTM	Digital Terrain Model
FBM	Feature based Matching
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Globales Positionsbestimmungssystem
GSD	Ground Sampling Distance
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertiales Navigations System
LSM	Least Squares Matching
SIFT	Scale- Invariant Feature Transform
TLS	Terrestrial Laser Scanning
UA	Unmanned Aircraft
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

1 Einleitung und Begriffsbestimmung

Bei der Aufnahme von großflächigen Anlagen und Objekten, wie z.B. Deponien, Tagebaue, Pipelines und ganzen Landstücken wird heute vermehrt mittels **UAV** (engl. Unmanned Aerial Vehicle) photogrammetrisch aus der Luft vermessen. Damit können in kurzer Zeit Orthofotos und dreidimensionale Oberflächenmodelle erstellt werden [Eisenbeiss 2009].

Aus den erzeugten Luftbildern kann mit automatisierten Bildzuordnungsalgorithmen (engl. Image Matching) ein dreidimensionales Oberflächenmodell, ein sogenanntes **DOM** (engl.: Digital Surface Model, **DSM**), erstellt werden. DOME enthalten neben der Geländeoberfläche die Oberflächeninformationen von allen sichtbaren Objekten wie Straßen, Fahrzeugen, Gebäuden, Vegetation, Gewässer usw. Für viele Anwendungen (wie z.B. Abflussmodelle oder Massenermittlungen von Deponien) interessiert jedoch nur die reine Geländeoberfläche, die als digitales Geländemodell bezeichnet wird (**DGM** bzw. engl.: Digital Terrain Model, **DTM**), und aus einem DOM abgeleitet wird. Als Überbegriff, sowohl für DOM als auch für DGM, wird die Bezeichnung digitales Höhenmodell (**DHM** bzw. engl.: Digital Elevation Model, **DEM**) verwendet.

Die Ableitung digitaler Oberflächenmodelle aus Luftbildern ist heute dank der hohen Rechenleistung moderner PCs und neuen Algorithmen aus dem Bereich der Computer Vision weitgehend automatisiert. Ein großer Nachteil bei der Erstellung von digitalen Geländemodellen mittels bildgebender Verfahren, ist die Erfassung der Geländeoberfläche in Gebieten mit Vegetation. Im Gegensatz zu Aufnahmen mit terrestrischen (engl.: Terrestrial Laser Scanning, **TLS**) oder flugzeuggetragenen Laserscannern (engl.: Airborne Laser Scanning, **ALS**), bei welchen auch in Bereichen von Vegetation meist einzelne Reflexionen des Messimpulses bis zum Boden durchdringen [Kraus 2004] [Mücke 2008], kann bei der Luftbildvermessung schon bei geringer Vegetation oft keine Aussage über das darunterliegende Gelände getroffen werden. Verfügt die Messkamera über ein zusätzliches Infrarotband können Bereiche mit Vegetation durch Berechnung des Vegetationsindex **NDVI** (engl.: Normalized Differenced Vegetation Index) ermittelt werden [O A 2015] [Rouse *et al* 1973].

1.1 Motivation und Ziel der Arbeit

Die Wiener Stadtvermessung (MA41) lässt jedes Jahr die Deponie Rautenweg, zur Ermittlung des Schüttvolumens, befliegen. Die Befliegung mittels bemannter Flugzeuge und Laserscanner (ALS) ist relativ teuer und kann daher häufig, innerhalb eines wirtschaftlichen Kostenrahmens, nur in größeren Zeitabständen durchgeführt werden. Als Alternative zu ALS existiert die UAV-Photogrammetrie, welche mit Hilfe von unbemannten Luftfahrzeugen Geländeaufnahmen aus der Luft innerhalb eines weitaus geringeren Kostenrahmens ermöglicht. Im Falle der Deponie Rautenweg könnten hier rund ein Drittel bis die Hälfte der jährlichen Vermessungskosten eingespart werden [Lehner 2015].

Ziel dieser Diplomarbeit ist es anhand eines konkreten Beispiels zu untersuchen, ob die wirtschaftlichere UAV-Messmethode auch vergleichbare Ergebnisgenauigkeiten zu ALS-Aufnahmen liefern kann. Als Versuchsgebiet dient dazu die etwa 60 Hektar große Mülldeponie Rautenweg in Wien, welche von der Stadt Wien jährlich mittels ALS vermessen wird. Ein daraus abgeleitetes digitales Geländemodell dient als Basis für die Massenberechnungen.

Vergleichend dazu soll eine Befliegung mittels UAV durchgeführt werden und in weiterer Folge ein UAV-DGM berechnet werden.

Um die zu erwartenden Höhendifferenzen der beiden Oberflächenmodelle aufgrund der vorhandener Vegetation am Testgebiet der Deponie zu minimieren, soll eine Methode entwickelt werden, die den NDVI aus Infrarotbildern, sowie Vegetationsmuster nutzt, um das UAV-Modell zu korrigieren. Abschließend sollen noch die beiden Volumenmodelle miteinander verglichen werden.

Am Markt existieren sehr viele kostengünstige proprietäre und Open-Source Softwarelösungen zur automatisierten Erstellung von DHMen aus Luftbildern. Diese kommen vorwiegend aus dem Bereich der Computer Vision und liefern typischerweise kaum Genauigkeitswerte für generierte Punktwolken, sehr weit verbreitet ist z.B. das Programm *Photoscan* der Firma Agisoft. Angaben zur Genauigkeit von berechneten Einzelpunkten werden erst bei teurerer Software mit photogrammetrischem Hintergrund (z.B. *Trimble Application Master*) berechnet. Im Zuge dieser Diplomarbeit sollen auch die in *Photoscan* und mit *Trimble Application Master* generierten DOME einander gegenübergestellt werden.

1.2 Methodik

Um einen akkuraten Genauigkeitsvergleich zwischen ALS- und UAV-Modellen anstellen zu können, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit zeitgleich mit dem ALS-Flug der Stadt Wien im Oktober 2013, ein UAV-Flug über der Deponie Rautenweg absolviert. Zusätzlich wurde mittels Globalem Navigations satellitensystem GNSS (engl.: Global Navigation Satellite System) an 70 Punkten die Geländeoberfläche vermessen. GNSS ist ein Sammelbegriff für die Verwendung sämtlicher Satellitennavigationssystemen, wie z..b. GPS, GLONASS oder Galileo. Diese Datensätze lieferten die Grundlage für die weitere wissenschaftliche Untersuchung. Um Aussagen zur Stabilität der verwendeten UAV-Kamera machen zu können, wurde diese in einem Messlabor der TU Wien kalibriert.

Innerhalb der Abrechnungsgrenze wurden Volumendifferenzen zwischen den durch ALS und UAV ermittelten DGMen berechnet. Die Abrechnungsgrenze ist durch ein Polygon definiert und stellt jenen Bereich dar, innerhalb dessen die jährlichen Volumenänderungen seitens des Deponiebetreibers zu dokumentieren sind. Um den Einfluss der Vegetation zu analysieren wurden Vegetationsmasken und die Differenzen in den verschiedenen Vegetationsklassen berechnet. Verschiedene Aufnahmemethoden und die zu erwartenden Messgenauigkeiten wurden gegenübergestellt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im ersten Teil (Kapitel 2) werden zunächst die Grundlagen der UAV-Vermessung, sowie die rechtliche Situation von unbemannten Flügen in Österreich dargestellt. Im darauf folgenden Teil „State of the Art“ (Kapitel 3) wird auf aktuelle Entwicklungen im Bereich der digitalen Bildauswertung eingegangen. Kapitel 4 beschreibt das Projektgebiet und die Datengrundlagen für die Messauswertung, sowie das eingesetzte Flugsystem. Die Auswertung wird in Kapitel 5 genauer dargestellt, eine detaillierte Analyse eines kleinen Ausschnitts folgt in Kapitel 6. Die Resultate der Vergleiche von den genierten Höhenmodellen der gesamten Deponie werden in Kapitel 7 präsentiert. Abschließend wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse und ein weiterer Ausblick gegeben.

2 Grundlagen

2.1 UAV

2.1.1 Definition und Typen

Unter **UAV** (engl.: Unmanned Aerial Vehicle) versteht man ein unbemanntes Flugobjekt, also ohne menschlichen Piloten. Weitere Bezeichnungen sind: **UAS** (engl.: Unmanned Aerial System) oder **UA** (engl. Unmanned Aircraft). Unbemannte Flugsysteme zeichnen sich dadurch aus, dass sie entweder vom Boden aus ferngesteuert werden, oder aber vollständig autonom fliegen können [Anon 2013] [Eisenbeiss 2009].

Für den Zweck der UAV-Photogrammetrie existiert eine Vielzahl geeigneter Fluggeräte. Die wichtigsten Vertreter sind:

- Starrflügler bzw. Flächenflugzeuge
- Rotorgestützte Fluggeräte:
 - Singlerotorsysteme
 - Multirotorsysteme

Die Vorteile von Starrflüglern sind, bedingt durch ihre Bauform, verhältnismäßig lange Flugzeiten und daher große Reichweiten, sowie ein besseres Vibrationsverhalten im Vergleich zu rotorgestützten Systemen. Hingegen benötigen sie aber mehr Platz für Start- und Landemanöver. Die mögliche große Reichweite kann in der Praxis der Luftbildvermessung aufgrund von Behördenauflagen nur bedingt genutzt werden, da in den meisten Anwendungsfällen eine direkte Sichtverbindung vom Piloten zum Flugobjekt vorgeschrieben ist.

Für kleinräumige Luftvermessungen werden daher meist rotorgestützte Fluggeräte, insbesondere Multirotor-Flugsysteme wie Quadrocopter, Hexakopter oder Oktokopter eingesetzt. Die vergleichsweise geringen Anschaffungskosten zu einem bemannten Flugzeug, die relativ hohen Nutzlasten, sowie die einfache Manövrierung der Fluggeräte sprechen für diese Systeme. Zudem können Start- und Landevorgänge bereits bei sehr beschränkten Platzverhältnissen durchgeführt werden, da Rotorsysteme senkrecht in die Luft steigen und genauso wieder landen können. Die Steuerung gelingt mit wenigen Vorkenntnissen, welche im Zuge einer einmaligen mehrstündigen Schulung erlernt werden können. Die derzeit am Markt befindlichen Systeme sind mit GNSS-Sensorik für die Navigation und Wegpunktplanung, mit einer **IMU** (Inertiale Messeinheit mit Beschleunigungsgebern, engl.: Inertial Measurement Unit) zur Berechnung der Roll-, Nick- und Gierwinkel, einem Kompass und einem Barometer für die Höhenstabilisierung ausgestattet [Briese *et al* 2013].

2.1.2 Rechtliche Situation in Österreich

Am 1. Jänner 2014 wurde in Österreich ein neues Luftfahrtgesetz (LFG) beschlossen [BMVIT 2013]. In Abschnitt 4 des LFG werden die unbemannten Luftfahrzeuge in folgende Kategorien eingeteilt [O A 2010]:

1. „Flugmodell (ausschließlich unentgeltlich, nicht kommerziell und nur zum Zwecke des Fluges in einem Umkreis von maximal 500m) - §§ 24d, 24e LFG
2. Unbemanntes Luftfahrzeug (uLFZ) der Klasse 1 (mit direkter Sichtverbindung zum Piloten ohne irgendein technisches Hilfsmittel, maximale Höhe 150m über Grund) - §§ 24f, 24h LFG
3. Unbemanntes Luftfahrzeug der Klasse 2 (alle anderen UAS, auch ohne direkte Sichtverbindung) -§ 24g LFG“

Zusätzlich werden die Luftfahrzeuge anhand der jeweiligen Gewichtsklasse und dem Einsatzgebiet kategorisiert (siehe Tab.1; [Austro Control 2013b]).

Für die Befliegung von unbesiedelten Gebieten, wie beispielsweise Deponien und Steinbrüchen, ist somit eine Bewilligung der Kategorie A erforderlich (d.h. Luftfahrzeuge bis 5kg im Einsatzgebiet I und II oder Luftfahrzeuge bis 25kg im Einsatzgebiet I).

Für Bewilligungen in höheren Kategorien müssen die Hauptkomponenten des Luftfahrzeugs mehrfach redundant ausgeführt sein, um den Sicherheitsanforderungen der Luftfahrtbehörde zu genügen (d.h. sämtliche flugrelevanten Komponenten, wie z.B. Akkus und Steuereinheit müssen in mindestens zweifacher Ausführung vorhanden sein).

	Einsatzgebiet			
	I unbebaut	II unbesiedelt	III besiedelt	IV dicht besiedelt
Betriebsmasse bis einschließlich 5 kg	A	A	B	C
Betriebsmasse bis einschließlich 25 kg	A	B	C	D
Betriebsmasse über 25 kg und bis einschließlich 150 kg	B	C	D	D

Tabelle 1: Kategorisierung der Luftfahrzeuge anhand von Einsatzgebiet und Gewicht

Quelle: [Austro Control 2013a]

2.2 Photogrammetrische Auswertung

Mit den Formeln und Methoden der Photogrammetrie können Objekte im dreidimensionalen Raum mit Hilfe von Bildern rekonstruiert werden. Wir gehen von idealisierten Messbildern aus, die Verzeichnung der Messbilder, die durch geometrische Abbildungsfehler optischer Kameras entstehen, werden vorerst nicht berücksichtigt. Die Messbilder können als Zentralprojektionen hinreichend genau angese-

hen werden. [Kraus 2004] Der mathematische Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten wird in Abbildung 1 veranschaulicht. Formel 1 beschreibt den mathematischen Zusammenhang der Bildkoordinaten ξ und η eines Punktes P' und den Koordinaten X, Y, Z eines Objektpunktes P .

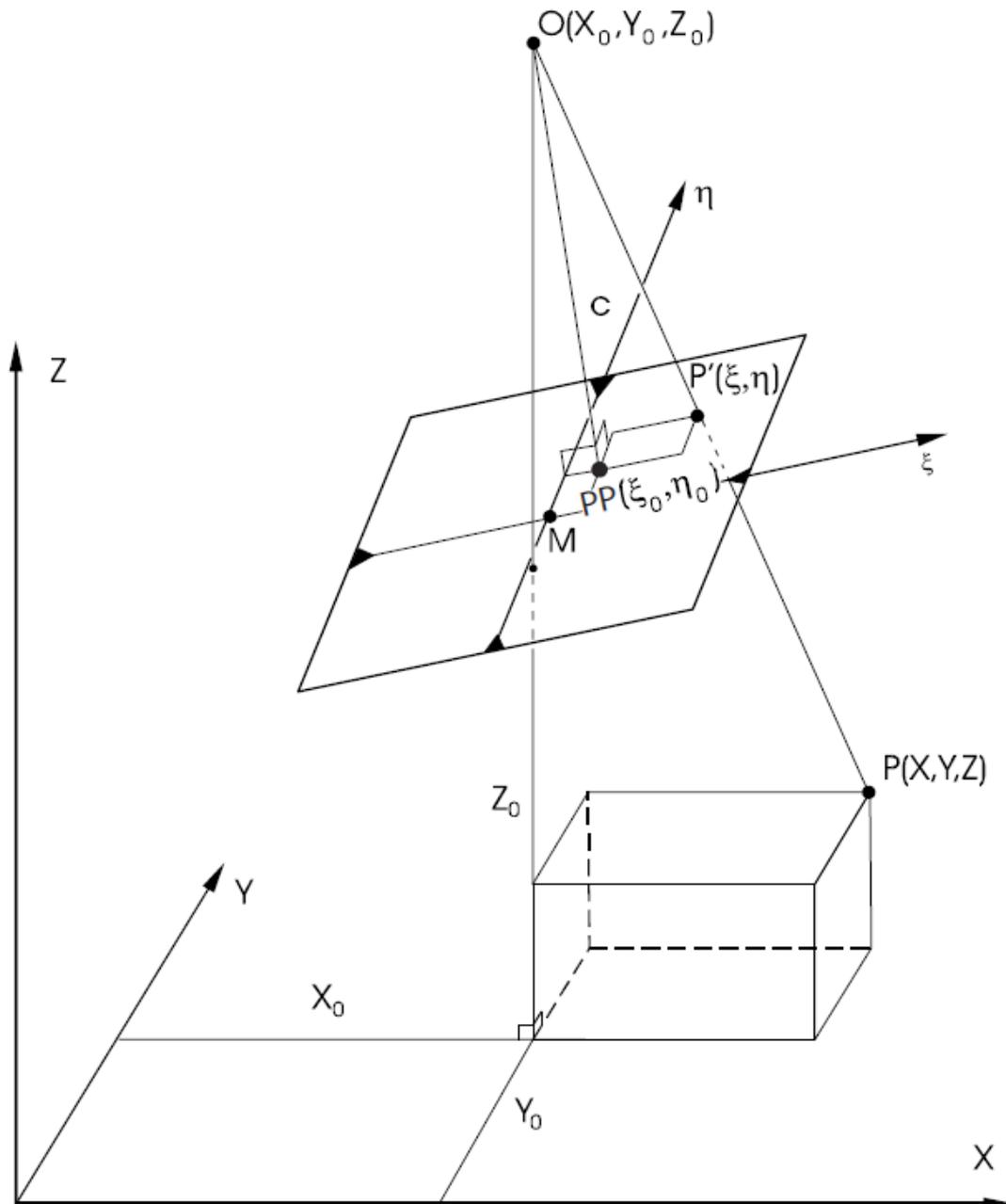


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten

Quelle: [Kraus 2004]

- O Projektionszentrum eines räumlichen Strahlenbündels
- H Bildhauptpunkt
- c Kamerakonstante
- M Bildmittelpunkt

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

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

Formel 1: Mathematischer Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten

Quelle: [Kraus 2004]

Die Parameter r_{ik} sind Elemente einer Drehmatrix welche die räumliche Stellung des Bildes in Bezug zum Objektkoordinatensystem beschreiben.

Die Kamerakonstante c sowie die Bildkoordinaten (ξ_0, η_0) des Bildhauptpunktes H werden als die inneren Orientierungsparameter bezeichnet. Die Objektkoordinaten des Aufnahmestandortes (X_0, Y_0, Z_0) sowie die drei Drehwinkel des Bildes werden als die äußeren Orientierungsparameter bezeichnet.

Es beschreiben somit neun Parameter ein zentralperspektivisches Bild. Die inneren Orientierungsparameter sind kameraspezifische Größen und können entweder im Labor oder im Zuge der Bündelblockausgleich (vgl. Kapitel 2.3.1) bestimmt werden. Die äußeren Orientierungsparameter können durch Passpunkte bestimmt werden. Dazu müssen von mindestens drei Passpunkten Objekt- und Bildkoordinaten gemessen werden.

Um ein räumliches Objekt rekonstruieren zu können werden mindestens zwei Messbilder benötigt, welche das Objekt enthalten, oder andere Zusatzinformation über die Lage des Objekts.

Bei UAV-Luftbildern handelt es sich typischerweise um genäherte Senkrechtaufnahmen. Je nach Anwendung, Geländeneigungen und Geländetextur wird die Basis (Abstand von einem Bild zum nächsten) so gewählt, dass sich die Bilder um 60-80% überdecken. Ein solches Bildpaar wird räumlich betrachtet als „Stereomodell“ der aufgenommenen Objekte bezeichnet.

2.3 Aerotriangulation

Eine überlappende Anordnung von Stereobildpaaren wird als Bildverband bezeichnet. Die Aerotriangulation, auch unter dem Namen photogrammetrische Triangulation bekannt, ermöglicht es größere Gebiete mittels Bildverbandes ohne Festpunkte zu überbrücken. Somit müssen nicht in jedem Stereomodell eines Bildverbandes (Abb. 2) drei Vollpasspunkte terrestrisch bestimmt werden. Vollpasspunkte sind Referenzpunkte, welche in Lage- und Höhe eingemessen werden, wohingegen Höhenpasspunkte nur eine Höhenkomponente besitzen. Die Neu- bzw. Verknüpfungspunkte dienen zur relativen Orientierung des Bildverbandes [Kraus 2004].

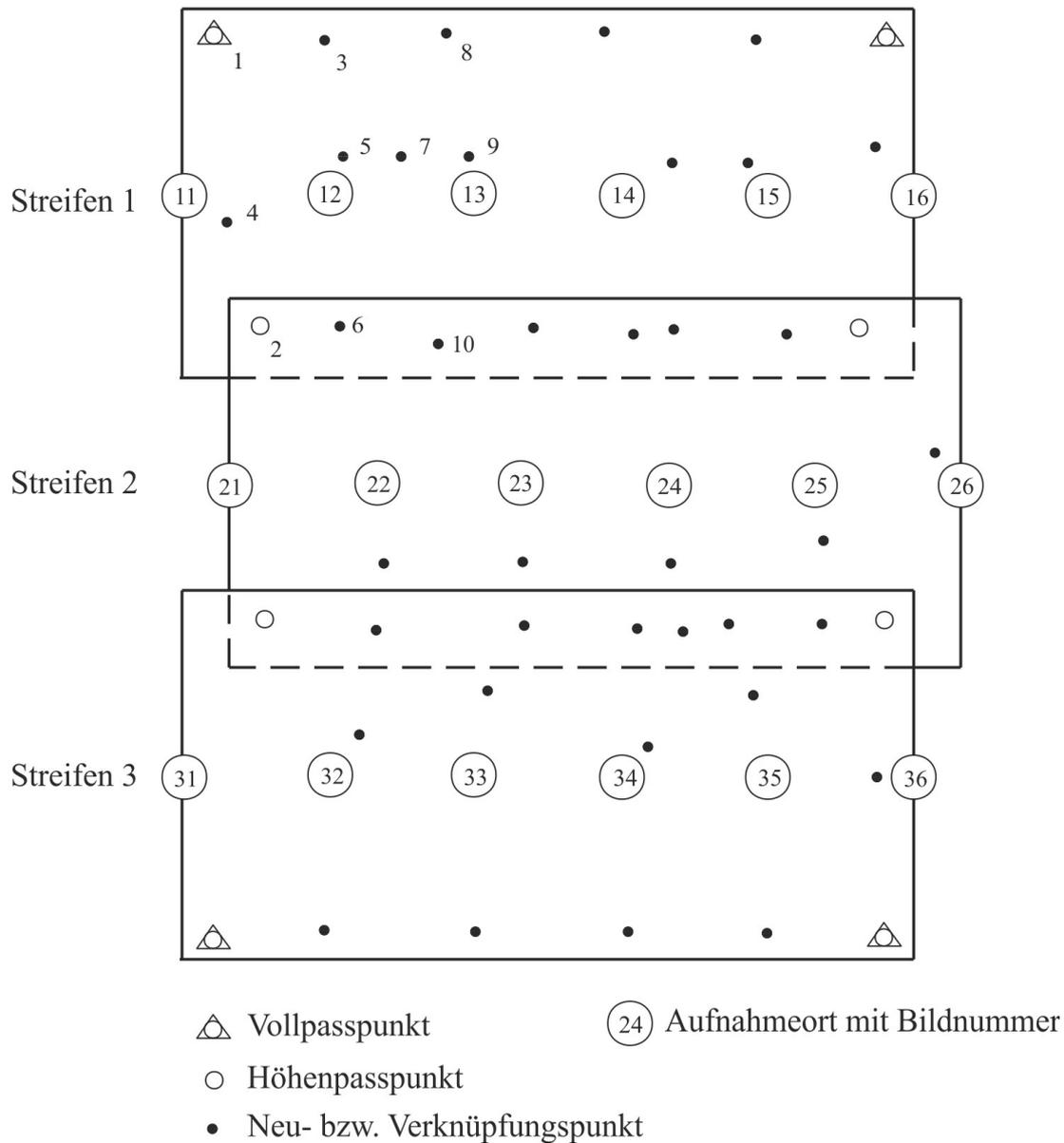


Abbildung 2: Bildverband einer Blockausgleichung

Quelle: [Kraus 2004]

Die Aerotriangulation liefert als Ergebnis sämtliche äußeren Orientierungsparameter aller Bilder, sowie die Koordinaten von Neu- bzw. Verknüpfungspunkten im übergeordneten Koordinatensystem - typischerweise im Landeskoordinatensystem. Es gibt mehrere Ansätze zur Bestimmung der Orientierungsparameter: In der UAV-Photogrammetrie wird zumeist die Methode der Bündelblockausgleichung zur Bestimmung unbekannter Orientierungselemente gewählt [Kraus 2004].

2.3.1 Bündelblockausgleichung

Die Methode der Bündelblockausgleichung wurde bereits in 1960-70iger Jahren konzipiert und ist seither die Standardlösung für die 3D-Objektrekonstruktion aus Bildern [Brown 1976]. Die Bündelblockausgleichung stellt den rechnerischen Zusammenhang zwischen den Bildkoordinaten und den Objektkoordinaten dar. In Abb. 3 wird das Grundprinzip der Bündelblockausgleichung eines Bildverbandes dargestellt [Kraus 2004].

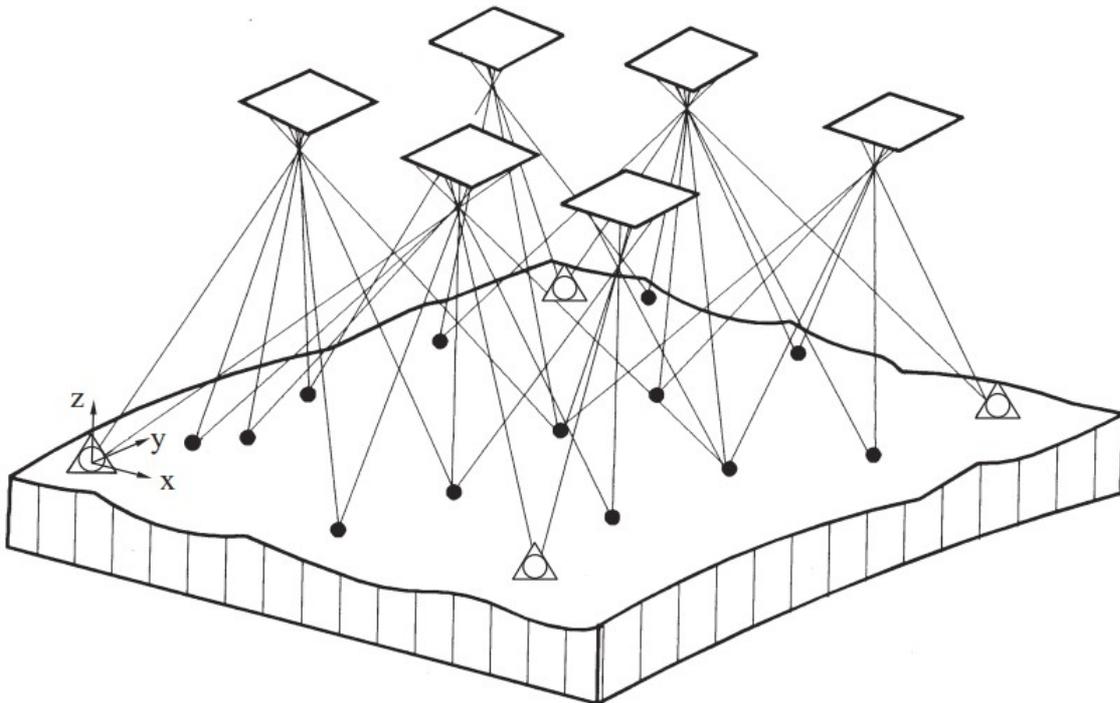


Abbildung 3: Grundprinzip der Bündelblockausgleichung

Quelle: [Kraus 2004]

Jedes Bild definiert mit seinem Projektionszentrum und den Bildkoordinaten ein räumliches Strahlenbündel. Aufgabe des Bündelblockausgleichs ist es, die äußeren Orientierungsparameter sämtlicher Strahlenbündel in einem Guss auszugleichen. Die gemessenen Bildkoordinaten von Verknüpfungspunkten liefern hierfür die notwendigen Beobachtungen, um die Gleichungen aufzulösen. Zusätzlich stehen Bildkoordinaten und Landeskoordinaten von Passpunkten zur Verfügung. Bildlich ausgedrückt werden die Strahlenbündel solange gedreht und verschoben, bis sie bestmöglich an den Verknüpfungspunkten zum Schnitt kommen und gleichzeitig die Abweichungen an den Passpunkten möglichst gering sind. Den mathematischen Zusammenhang zwischen den Bildkoordinaten und den übergeordneten Objektkoordinaten liefern die Kollinearitätsbeziehungen (siehe Formel 1).

Üblicherweise werden bei der UAV-Photogrammetrie handelsübliche Amateurkameras mit instabiler Innerer Orientierung verwendet. Mit Hilfe der Bündelblockausgleichung können auch die Elemente der Inneren Orientierung als Unbekannte eingeführt und bestimmt werden. Werden neben der Verschiebung des Hauptpunktes und der Kamerakonstanten auch die Verzeichnungsparameter bestimmt, spricht man von einer Bündelblockausgleichung mit zusätzlichen Parametern bzw. von Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung. Bei UAV-Projekten wird häufig eine Kameraselbstkalibrierung (auch als „on the job“ bezeichnet) durchgeführt, was bedeutet, dass die Kameraparameter im Zuge des Bündelblockausgleichs mit bestimmt werden [Kraus 2004] [Harwin *et al* 2015].

2.3.2 Bestimmung der Verknüpfungspunkte

Eine grundlegende Aufgabe der Photogrammetrie und Computer-Vision (dt.: Maschinelles Sehen) ist die automatisierte computergestützte Suche nach korrespondierenden (homologen) Verknüpfungspunkten in digitalen Messbildern [Kraus 2004].

In den letzten Jahren ist es durch gesteigerte Rechnerleistungen gelungen, diesen Prozess weitgehend zu automatisieren. Es werden dazu in einem Bild Referenzmatrizen ausgewählt und in allen anderen Bildern ebenso gesucht. Um eine gute Verteilung von Verknüpfungspunkten zu erhalten, wird bei genäherten Senkrechtaufnahmen versucht, Referenz- und Suchmatrizen in den sogenannten Gruberpunkten (Pkt. 1-6 in Abb. 4) zu legen. O_1 und O_2 sind die Aufnahmestandorte zweier sich überlappender Bilder. Der mittlere Streifen stellt den Überlappungsbereich dar.

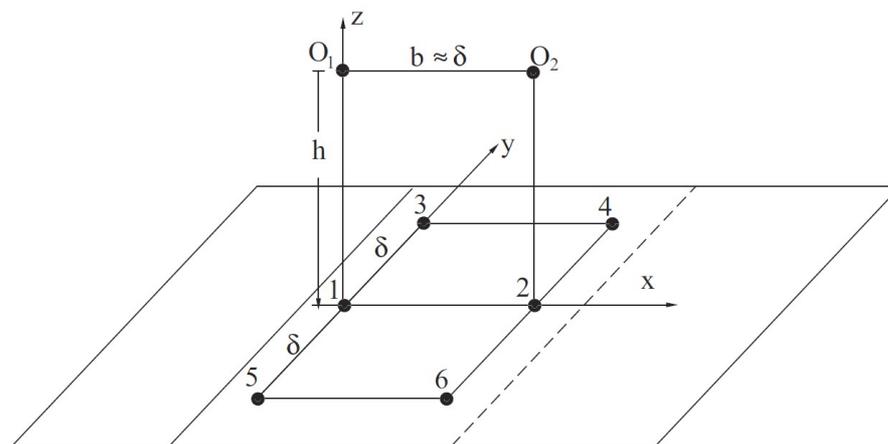


Abbildung 4: Gruberpunkte in ebenem Gelände

Quelle: [Kraus 2004]

Eine Referenzmatrix (oder Mustermatrix) ist ein kleiner Bildausschnitt (z.B. 12x12 Pixel). Jedes Pixel wird durch seinen Grauwert beschrieben. Ziel ist es jetzt die Referenzmatrix in einem anderen Bild zu

finden. Diese Aufgabe kann mit Hilfe von Korrelationsalgorithmen gelöst werden. Als Ähnlichkeitsmaß wird häufig der Korrelationskoeffizient verwendet. Er wird aus den Standardabweichungen und den Grauwerten zweier Bilder sowie aus der Kovarianz zwischen den Grauwerten der beiden Bilder berechnet. Der Korrelationskoeffizient wird im Suchbereich für jede Position berechnet. Jene Stelle mit dem größten Korrelationskoeffizient ist somit die gesuchte Position im Suchbild [Kraus 2004].

2.3.2.1 Interest Operatoren

Die Qualität der Korrelationen hängt sehr stark von der Textur des verwendeten Bildmaterials ab. Um geeignete Bildstellen für die Korrelationberechnung auszuwählen kommen sogenannte „Interest-Operatoren“ zum Einsatz. Interest-Operatoren suchen in Bildern nach markanten Punkten, die sich gegenüber der Umgebung besonders stark hervorheben. Dies erfolgt im Wesentlichen über die Suche nach Schnittpunkten von Grauwertkanten. Einige Beispiele von Interest-Operatoren sind:

- Der Moravec-Operator berechnet innerhalb eines Fensters entlang der Bildzeilen, Bildspalten und der Diagonalen die Varianzen der Grauwertdifferenzen benachbarter Pixel. Markante Punkte liegen über einem gewissen Schwellwert. Nachteil des Moravec-Operators ist, dass dieser nicht rotationsinvariant ist [Moravec 1976].
- Förstner hat einen Operator entwickelt, welcher zur Suche von Merkmalspunkten, die Spur einer invertierten Normalgleichungsmatrix von Grauwertdifferenzen als Beurteilungskriterium heranzieht [Förstner und Gülch 1987].
- In der UAV-Photogrammetrie mit Amateurkameras ist der **SIFT** Operator (engl.: Scale-Invariant Feature Transform) weit verbreitet, der 1999 von David G. Lowe auf der British Columbia Universität entwickelt und in weiterer Folge auch als US-Patent angemeldet wurde. Der Operator ist eine Methode zur automatisierten Merkmalsanalyse, bei der lokale Merkmale aus Bildern extrahiert werden können. Um den SIFT Operator gegenüber Bildrauschen zu stabilisieren, werden die Bilder zuerst mittels Gauß-Filter geglättet ($\sigma = \sqrt{2}$). Über mehrere Pyramidenebenen hinweg werden unterschiedlich große Pixelkacheln auf markante Merkmale hin untersucht. Die optimalen Abtast- und Glättungsparameter können aus einem Bildpaar bestimmt werden. Dazu wird auf ein natürliches Bild eine Affintransformation angewandt, Kontrast und Helligkeit verändert und zudem ein Bildrauschen aufgebracht. Die Parameter werden dann so lange variiert, bis möglichst viele Merkmale in beiden Bildern exakt gefunden werden. Der SIFT Operator ist robust gegenüber Skalierung, Rotation und Beleuchtungsänderungen. Zudem ist er invariant gegenüber Blickwinkeländerungen von bis zu 30 Grad [Lowe 1999] [Lowe 2004].

Schwierigkeiten macht der SIFT-Operator bei starken Helligkeitsänderungen, bei reflektierenden Oberflächen (z.B. Wasseroberflächen, Autodächer, Fensterscheiben), bei sehr stark strukturiertem Gelände, bei sich wiederholenden Objekten (z.B. gestrichelte Fahrbahntrennlinien) und bei sehr unterschiedlichen Betrachtungswinkeln der Bilder. Um diese Probleme zu überwinden,

wurden deshalb eine Reihe von Abwandlungen des SIFT-Operators entwickelt. Einen Überblick und einen Vergleich der entwickelten Algorithmen liefert [Apollonio *et al* 2014].

2.3.2.2 Merkmalsbasierte Korrelation

Die Suche nach Merkmalspunkten, mit Hilfe der im vorherigen Kapitel beschriebene Operatoren, kann in jedem Messbild unabhängig durchgeführt werden. Die Positionierung erfolgt im Subpixelbereich. Die Korrelation von zwei homologen Merkmalspunkten wird als Merkmalsbasierte Korrelation (engl. Feature Based Matching, **FBM**) bezeichnet.

Im Gegensatz dazu existiert noch die Flächenbasierte Korrelation, welche die Bildelemente von Referenz- und Suchbild durchgehend für ein ganzes Gebiet miteinander verknüpft. Die Merkmalsbasierte Korrelation liefert eine Genauigkeit von 1/3 Pixel [Kraus 2004].

2.3.2.3 Kleinste-Quadrate-Korrelation

Gefundene Merkmale lassen sich im Suchbild mittels Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate subpixel-genau positionieren. Dabei geht man davon aus, dass schon eine zuvor bestimmte Näherungslösung für die Einpassung z.B. durch FBM (engl.: Feature Based Matching) vorliegt. Bildlich gesprochen wird das Referenzbild solange verschoben, bis die Summe der Grauwert-Differenzen minimal ist. Mathematisch entspricht das der Lösung des Normalgleichungssystem einer Ausgleichung nach vermittelten Beobachtungen. Die Gleichungen können durch zusätzliche Parameter für Kontrast- und Helligkeitsunterschiede erweitert werden. Bei sehr verrauschten Bildern ist es empfehlenswert vorab eine Kontrast- und Helligkeitsanpassung der Bilder durchzuführen, da sonst die Konvergenz sehr beeinträchtigt werden kann.

Die beschriebene Methode wird als Kleinste-Quadrate-Korrelation (engl. Least squares matching, **LSM**) bezeichnet. Die Genauigkeit ist um eine Größenordnung genauer als die Pixelgröße und somit um ein Vielfaches genauer als die Merkmalsbasierte Korrelation. LSM ist hingegen weniger robust und benötigt für eine erfolgreiche Korrelation gute Näherungswerte [Kraus 2004].

2.4 Dense Image Matching

Die Dense Image Matching Entwicklung stellt Methoden zur Verfügung, die eine dreidimensionale Rekonstruktion von Flächen mit Hilfe von Bildern ermöglicht, welche von verschiedenen Standorten eines Gebietes aufgenommen wurden [Wenzel *et al* 2013].

Ursprünglich wurden Punktwolken aus den einzelnen Stereomodellen berechnet. Um die Genauigkeit vor allem der Höheninformation erhöhen zu können, werden zunehmend Algorithmen eingesetzt, welche die Triangulation der 3D Punkte aus mehreren Bildern berechnen.

Wesentliche Voraussetzung hierfür ist, dass mit einer ausreichend hohen Überdeckung geflogen wird. Eine Verbesserung in der Höhengenaugkeit wird dadurch erzielt, dass auch Bildpaare mit längeren Basen, und die damit verbundenen besseren Schnittwinkel, in die Berechnung eingehen. Durch die Ver-

wendung von mehreren Bildern für das Matching kann nicht nur die Robustheit der Punktwolke erhöht werden, sondern auch eine Aussage zur Genauigkeit für jeden berechneten 3D Punkt gemacht werden. Ebenso nimmt die Dichte und Vollständigkeit der Punktwolke durch dieses Verfahren zu. [Rumpler *et al* 2013] zeigten, dass die Verwendung eines „True Multiview Triangulation“ Ansatzes gegenüber der Kombination von Stereomodellen das Ergebnis sehr stark verbessert [Rumpler 2011].

Eine sehr weit verbreitete Matching Methode ist das „Semi Global Matching“, welches ursprünglich aus dem Bereich der Computer Vision kommt. (→ *Eine Übersicht aktueller Entwicklungen im Bereich des „Dense Image Matching“ liefert* [Remondino *et al* 2014]).

2.4.1 Semi Global Matching

Der **SGM** (engl. Semi Global Matching) Algorithmus wurde von [Hirschmuller 2008] entwickelt. Bildpaare mit bekannter Innerer und Äußerer Orientierung werden dabei berücksichtigt. Für jedes Bildpaar werden mit Hilfe einer Kostenfunktion pixelweise die Kosten zwischen dem Referenzbild und dem Vergleichsbild berechnet. Als Kostenfunktion werden oft Grauwert-Differenzen verwendet.

Die ursprünglich nur für Bildpaare entwickelte Methode wurde später auf Mehrbild- Vorwärts-Schnitte erweitert und im Softwarepaket *SURE* implementiert, welches an der Universität Stuttgart, am Institut für Photogrammetrie entwickelt wurde [Wenzel *et al* 2013]

2.5 ALS

Zur Erstellung von sehr großflächigen digitalen Geländemodellen werden heute fast ausschließlich flugzeuggetragene Laserscan-Systeme (**ALS**, engl.: Airborne Laserscanning) verwendet [Wehr und Lohr 1999].

Um das gewünschte Gebiet vollständig zu erfassen, wird es streifenförmig abgeflogen, sodass sich an den Streifenrändern jeweils Überlappungsbereiche ergeben. Häufig werden orthogonal zu den Längsstreifen noch zusätzlich einige Querstreifen, zur Verbesserung der Genauigkeit und Erhöhung der Punktdichte, geflogen. Durch die zusätzlichen Querstreifen und die daraus resultierenden größeren Überlappungsbereiche können sehr gute Qualitätsaussagen der erzeugten Punktwolke gemacht werden. Durch die größeren Überlappungsbereiche zusätzlicher Querstreifen kann zudem auch die Genauigkeit durch eine Streifenausgleich erheblich verbessert werden (vgl. folgenden Abschnitt 2.5.2) [Ressl *et al* 2009].

Ein am Flugzeug montierter Laserscanner tastet die Geländeoberfläche mit einem stark gebündelten Laserstrahl zeilenweise ab.

Die Hauptkomponenten eines ALS sind neben dem Laserscanner ein globales Navigationssatellitensystem, GNSS (in Abb. 5 GPS), sowie eine inertielle Messeinrichtung, **INS**. INS und GNSS werden als dynamisches Positionierungs- und Orientierungssystem (**POS**, engl.: Position and Orientation System)

bezeichnet und liefern die Trajektorien der Laserscanstreifen. Jede dieser Komponenten verfügt über ein eigenes Koordinatensystem (siehe Abb. 5).

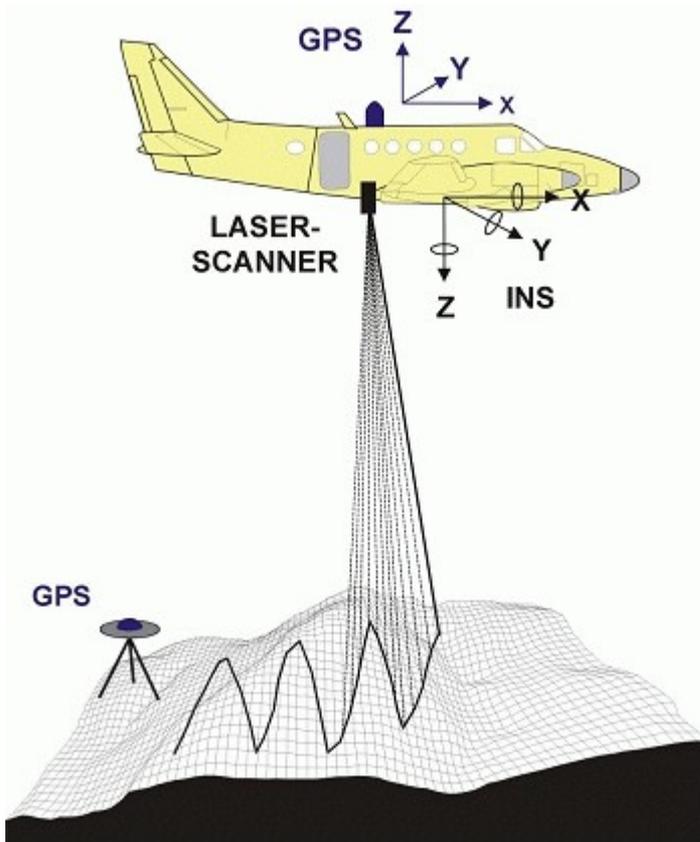


Abbildung 5: ALS-Komponenten und Koordinatensysteme

Quelle: [Kraus 2004]

Zusätzlich existiert in der Regel ein Referenzkoordinatensystem, in welches die Punktwolke gelagert wird. Für die Berechnung der Koordinaten der gewünschten Objektpunkte liefern Drehmatrizen und Verschiebungsvektoren den mathematischen Zusammenhang zwischen den einzelnen Koordinatensystemen.

Trotz sorgfältiger Kalibrierung der ALS-Systeme verbleiben systematische Fehler des Aufnahmesystems [Glira *et al* 2007]. Systematische Fehler können in der Ausgleichung durch Einführung von Parametern geschätzt werden. Diese können in drei Gruppen gegliedert werden:

- Vom Scanner abhängige Parameter
- Korrekturparameter der Trajektorie
- Montage-abhängige Kalibrierparameter
 - Boresight- oder Misalignment Winkel (engl.: boresight angles) – Ausrichtungsfehler zwischen INS und Laserscanner
 - Hebelarm (engl. Leverarm) zwischen GNSS- und Scannerzentrum

Je nach Gebiet, verwendetem Scannersystem und Flugkonfiguration sind die gesuchten Parameter mehr oder weniger korreliert.

[Skaloud und Lichti 2006] beschreiben ein Verfahren, um die montageabhängigen Boresight Winkel zu ermitteln:

In einem Kalibrierungsgebiet mit möglichst vielen unterschiedlich geneigten ebenen Flächen (z.B. Wohnhaussiedlung) werden zunächst möglichst ebene Regionen definiert. Die Ebenenparameter werden dann gemeinsam mit den Kalibrierungsparametern bestimmt. Unter der Annahme, dass alle Punkte aus verschiedenen Streifen in den definierten Ebenen-Bereichen in derselben Ebene liegen müssen, können so die gesuchten Boresight Winkel ermittelt werden.

Abbildung 6 zeigt zwei ALS-Flugstreifen. Die durchgezogenen Linien repräsentieren die tatsächliche Geländeoberfläche, die gestrichelte Linie stellt die gemessenen ALS-Punkte dar. Bereits sehr kleine Fehler im Stellwinkel des Lasers wirken sich, aufgrund der hohen Flughöhe, stark in Form einer Verkipfung $\Delta\alpha$ des Streifens aus.

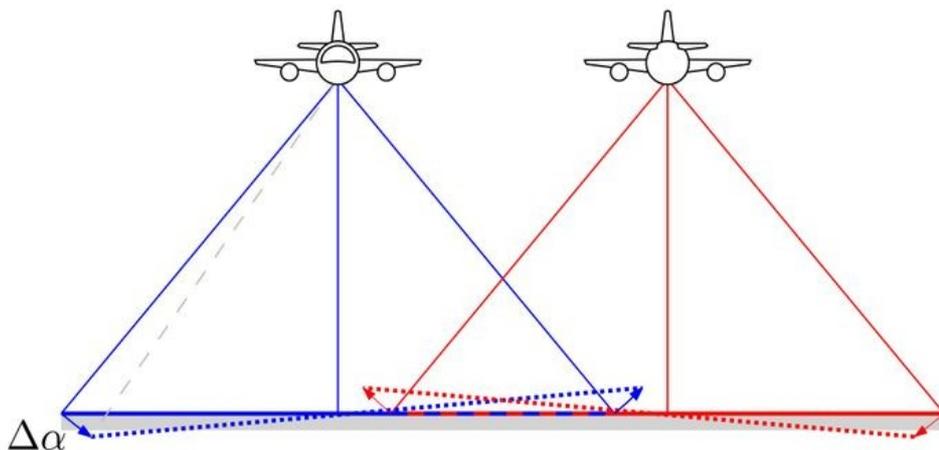


Abbildung 6: Auswirkung der Boresight Winkel

Quelle: P. Glira, TU Wien, 2015

In Abb. 7 wird ein weiterer systematischer Fehler, der sogenannte Streckenfehler (engl. Range-offset $\Delta\phi$) dargestellt. Dieser ist konstant und resultiert aufgrund der unterschiedlichen Einfallswinkel des Laserstrahls in einer seitlichen Aufbiegung in den Randbereichen der Laserscanstreifen. Dieser sehr häufig auftretende Effekt bei ALS-Daten wird auch als „Smiley-Effekt“ bezeichnet.

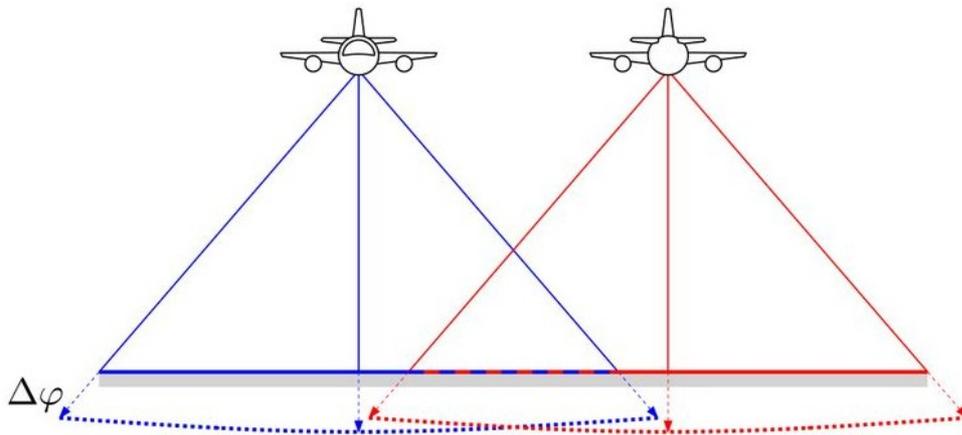


Abbildung 7: Rangeoffset und Smiley-Effekt

Quelle: P. Glira, TU Wien, 2015

2.5.1 Qualitätsprüfung von ALS-Projekten

Um sich ein Bild über die Qualität der einzelnen ALS-Streifen machen zu können, wurde von [Ressl *et al* 2008] folgende Methode entwickelt: Zunächst wird für jeden Streifen ein DHM-Raster berechnet. Für jede Rasterzelle wird eine Höhe interpoliert. Als Interpolations-Methode wird die sogenannte „Moving Planes Interpolation“ [Kraus 2000] verwendet. Für jeden Rasterpunkt wird zusätzlich ein Rauigkeitsmaß aus den Abständen der Punkte zur Ebene, sowie ein Maß für die Exzentrizität ε berechnet. Unter Exzentrizität versteht man den Abstand des Schwerpunkts zum Gitterpunkt. Ein hoher Wert deutet darauf hin, dass die Zelle an einem Streifenrand oder im Sichtschatten z.B eines Gebäudes liegt.

Es wird weiters eine Maske berechnet, welche alle nicht ebenen (sehr rauen) Bereiche, sowie alle Bereiche an den Streifenrändern und innerhalb von Sichtschatten entfernt. Dazu werden Schwellwerte für die maximale Rauigkeit sowie für die maximale Exzentrizität vorgegeben.

In den verbleibenden Bereichen werden nun die Höhendifferenzen in den Überlappungsbereichen der Streifen gebildet. Abbildung 8 zeigt das Ergebnis einer solchen Qualitätsanalyse. Es ist zu erkennen dass an den Dachflächen ein Vorzeichenwechsel stattfindet (Rote und Blaue Linien). Dies deutet auf eine Lageverschiebung der beiden Streifen hin.

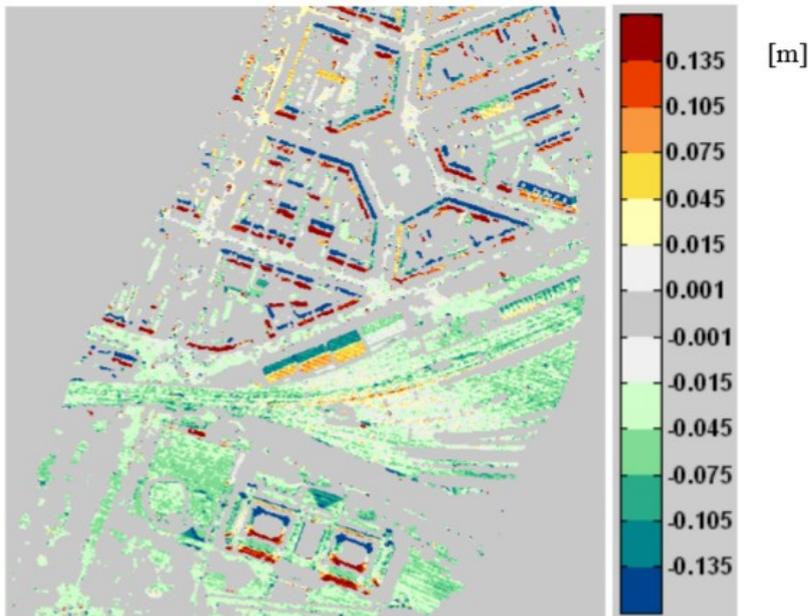


Abbildung 8: Farbcodierte Höhendifferenzen zweier ALS-Streifen

Quelle: [Ressl et al 2008]

2.5.2 ALS-Streifenausgleichung

Grundsätzlich existieren zwei Lösungsansätze, um die Fehler der einzelnen ALS-Streifen, welche aufgrund von systematischen Fehlern auftreten, auszugleichen [Ressl et al 2009]:

1. Rigorose ALS-Streifenausgleichung mit Trajektorien-Informationen:
Stehen Trajektorien-Daten, sowie die Zeitinformation für jeden Oberflächenpunkt zur Verfügung, können die Streifen über eine rigorose Streifenausgleichung berichtigt werden. Mittels iterativer Verfahren können systematische Fehler weitgehend ausgeglichen werden. Der Smiley-Effekt können so vermieden werden.
2. ALS-Streifenausgleichung ohne Trajektorien-Daten:
Hier können nur die Differenzen, welche sich in den Überlappungsbereichen der Streifen ergeben, für eine Qualitätsverbesserung herangezogen werden. Es kann eine Verformung des Gesamtblocks entstehen (z.B. Globale ICP Methode).

2.5.3 ICP

Um die Abstände zwischen mehreren Punktwolken (z.B. von zwei ALS-Streifen, siehe Abb. 9) zu minimieren und diese miteinander zu verknüpfen, wurde von [Besl und McKay 1992] und [Chen und Medioni 1991] der **ICP** (engl. Iterative Closest Point) Algorithmus entwickelt.

[Rusinkiewicz und Levoy 2001] sprechen davon, dass die Bezeichnung „Iterative Corresponding Point“ den ICP Algorithmus treffender beschreiben würde, da in den wenigsten Fällen identische Punkte in zwei Punktwolken zur Verfügung stehen.

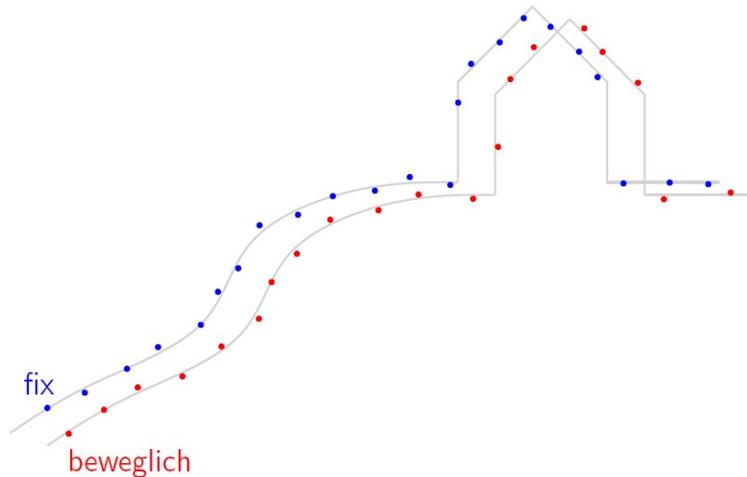


Abbildung 9: Ausgangssituation vor der Ausgleichung mittels ICP Verfahren

Quelle:[Glira 2014]

Schritte des ICP Verfahrens:

1. Auswahl korrespondierender Punkte
2. Suche nach den beweglichen Punkte in der zweiten fixen Punktwolke
3. Gewichtung der Korrespondenz
4. Verwerfung von Punktpaaren nach zuvor definierten Plausibilitäts-Regeln
5. Aufstellen einer Fehlermetrik
6. Minimierung der Fehlermetrik

Für jeden der aufgezählten Schritte wurden seit der Originalpublikation von 1991 zahlreiche Varianten entwickelt. Vergleiche der einzelnen Varianten in den verschiedenen Stufen wurden von [Rusinkiewicz und Levoy 2001] durchgeführt. Die verschiedenen Methoden unterscheiden sich sehr stark in ihrer Rechengeschwindigkeit. Ein sehr wichtiger Punkt ist die Auswahl geeigneter Kandidatenpunkte für die Korrelierung. Die Palette reicht hier von der Auswahl zufällig verteilter Punkte (engl.: Random Sampling), über gleichmäßig verteilte Punkte (engl.: Uniform sampling), bis hin zur Auswahl von Punkten, die möglichst unterschiedliche Normalvektoren aufweisen (engl.: Normal space sampling). [Glira *et al* 2015] schlagen eine Auswahlmethode vor, bei der gezielt jene Punkte, die den größten Einfluss auf das Ergebnis der Streifenausgleichung (engl. Maximum leverage sampling) haben, für das Matching herangezogen werden. Abbildung 10 zeigt, wie die Punktkorrespondenzen nach den vorgeschlagenen Methoden gewählt werden. Es handelt sich dabei um eine synthetisch erzeugte ebene Fläche mit zwei orthogonalen Gräben.

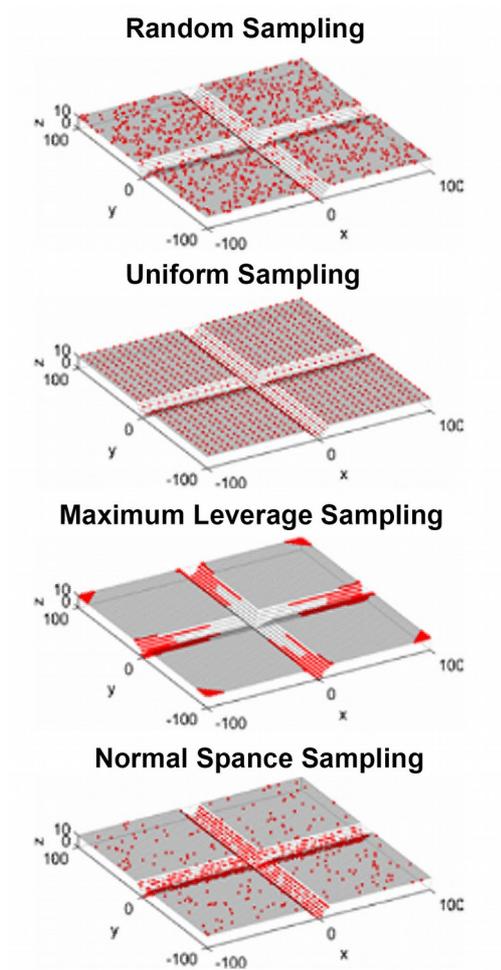


Abbildung 10: Vergleich der verschiedenen ICP Auswahlmethoden

Quelle: [Glira et al 2015]

2.6 Prinzipienvergleich - ALS versus Photogrammetrie

ALS sowie Photogrammetrie liefern eine dreidimensionale Rekonstruktion von Oberflächen bzw. Objekten. Die Photogrammetrie verwendet hierfür einen passiven Sensor, wohingegen beim ALS ein aktiver Sensor installiert ist. In den Abbildungen 12 und 11 sind beide Prinzipien grafisch dargestellt. Nach [Kraus 2004] können die wesentlichen Vor- und Nachteile beider Verfahren folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Das Laserscanning ist aufgrund des aktiven Sensors unabhängig vom natürlichen Sonnenlicht und kann daher auch in der Nacht durchgeführt werden.
- Das Laserscanning benötigt im Gegensatz zur Photogrammetrie keine Textur auf der Oberfläche.
- In Gebieten mit Vegetation und Bebauung ist das ALS überlegen. Alle Punkte können von einem Standpunkt ermittelt werden. Zudem dringt der Laserstrahl selbst bei sehr dichter Vegetation zumeist noch bis zum Boden durch.

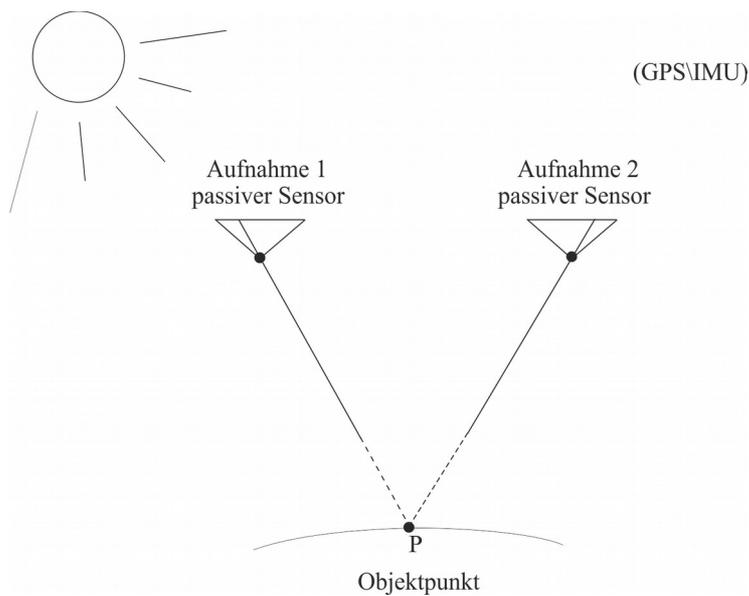


Abbildung 11: UAV Stereo Photogrammetrie

Quelle:[Kraus 2004]

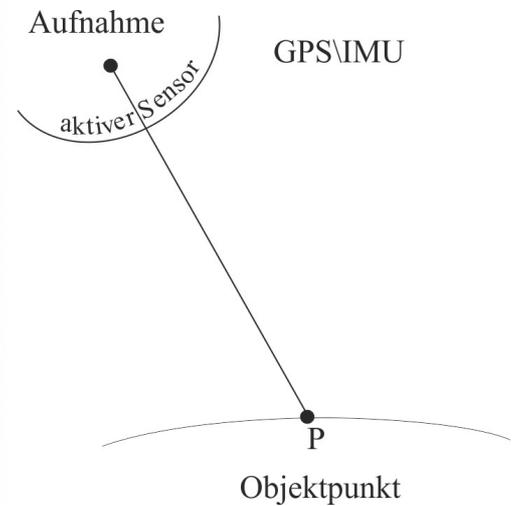


Abbildung 12: Aiborne Laser Scanning

Quelle: [Kraus 2004]

- Die Genauigkeit der Laserscan-Punktwolke ist relativ unabhängig von der Flughöhe und hängt viel mehr von der Punktdichte (Punkte/m²) ab. Als Faustformel für die Höhengenaugigkeit von ALS Flügen kann folgende Formel¹ angesetzt werden:

$$s_H [cm] = \pm \left(\frac{6}{\sqrt{n}} + 120 \cdot \tan(\alpha) \right)$$

Formel 2: Faustformel ALS-Höhengenaugigkeit

Quelle: [Kraus 2004]

tan α Geländeneigungn ... Punktdichte / m²

- Im Gegensatz dazu ist die Höhengenaugigkeit bei der Photogrammetrie sehr stark von der Flughöhe abhängig. Für gut signalisierte Punkte kann folgende Faustformel angesetzt werden:

$$\sigma_H = \pm 0.06\% \text{ der Aufnahmeentfernung (Normalweitwinkel – Weitwinkel)}$$

¹ Die Formel kommt aus einer Zeit in der die Punktdichte von ALS-Flügen noch nicht so hoch war wie heute. Bei einer Böschung mit 45° Neigung und einer Punktdichte von 13 Punkten würde man mit der Faustformel eine Höhengenaugigkeit von 123cm berechnen. Es ist anzunehmen, dass die tatsächlich erzielbare Genauigkeit um ein Vielfaches besser ist.

- Die Bodenauflösung (engl. Ground sampling distance, **GSD**) ist beim Laserscanning sehr viel geringer als bei photogrammetrisch abgeleiteten DGMen.
- ALS liefert normalerweise nur 1-25 Punkte/m², wohingegen bei UAV-Modellen die Bodenauf- lösung sehr viel höher ist (bis zu mehrere Hundert Punkte/m²) [Remondino *et al* 2014].
- Die Photogrammetrie liefert gegenwärtig bessere Lagegenauigkeiten, das Laserscanning besse- re Höhengenaugkeiten.
- Es sind nur beschränkt Genauigkeitsaussagen für Einzelpunkte von Laserscan-Messungen möglich, da jeder Punkt nur durch eine einzige Messung bestimmt ist.
- Bei der Photogrammetrie hingegen werden die Einzelpunkte in mehreren Bildern gemessen - die Messungen sind also redundant - und eine Aussage zur Genauigkeit der Punktwolke ist möglich.

3 State of the Art und Referenzprojekte

Mit dem Aufkommen von Laserscannern wurde die Rekonstruktion aus Fotos etwas zurückgedrängt. Durch höhere Rechenleistungen moderner Computer, verbesserte Kameras und neue Ansätze im Bereich der Computer Vision ist die Photogrammetrie heute wieder im Vormarsch [Leberl *et al* 2009] [Leberl *et al* 2010]. Der nachfolgende Abschnitt soll einen Überblick über einige aktuelle Forschungsarbeiten aus dem Bereich der Luftbildvermessung liefern:

- Von der ISPRS/EuroSDR wurde kürzlich das Projekt „*Benchmark on High Density Aerial Image Matching*“ initiiert. Die Plattform stellt Softwareentwicklern Luftbild-Datensätze zur Evaluierung ihrer Matching-Ergebnisse, inklusive einem terrestrischen Laserscanmodell als Referenzfläche, zur Verfügung [Cavegn *et al* 2014].
- Peter Hartmann [Hartmann 2012] lieferte in seiner Arbeit am Beispiel einer Kiesgrube in Ballwill (CH) einen Vergleich unterschiedlicher Softwareprodukte (*Trimble Inpho*[®] *Application Master*², *Photomodeller Scanner*³ und *Pix4D UAV Cloud*⁴). Bewertet wurden dabei DOM, Orthofoto, Automatisierungsgrad, sowie Funktionalitätsumfang der verschiedenen Programme. Zusätzlich wurden Differenzen der generierten DOME zu zwei Epochen untersucht. Die Daten der beiden Epochen stammen aus der Dissertation von Dr. Herni Eisenbeiss, „*UAV Photogrammetry*“ [Eisenbeiss 2009].

Bei der Befliegung für Epoche 1 im Februar 2009 lag Schnee. Bei Epoche 2 im April 2009 wurden die Fotos aus zwei unterschiedlichen Flughöhen aufgenommen. Weiters existierten während der Befliegung in Epoche 2 keine jener Passpunkte mehr, die in Epoche 1 eingemessen worden waren. Es wurde daher versucht Identpunkte aus Epoche 1 zu verwenden.

Alle generierten DOME wurden als xyz-Files in *Geomagig Studio 12*⁵ importiert und miteinander verglichen. Da keine Referenzfläche zur Verfügung stand, wurden nur relative Differenzen zwischen den generierten Modellen und den beiden Epochen getroffen. Konkrete Abweichungen in Zahlenwerten wurden innerhalb der Forschungsarbeit nicht genannt. Der Softwarevergleich vergleicht DOM, Orthofoto und Mosaikierung, Automatisierungsgrad, Benutzerfreundlichkeit, Funktionalitätsumfang und Prozessieraufwand.

Als benutzerfreundlichste Software wurde das Programm *Pix4d UAV Cloud* bewertet.

Für zu erwartende Genauigkeitsverluste bei der Auswertung von UAV-Bilddaten aufgrund von Vegetation wurden vom Autor keine Aussagen getroffen.

- [Eisenbeiss 2009] etablierte den Begriff der UAV-Photogrammetrie als neues Messwerkzeug. Die vielen realen Anwendungsbeispiele in seiner Dissertation zeigen, dass die UAV-Photo-

² Trimble Inpho[®], <http://www.trimble.com/Imaging/Inpho.aspx?tab=Overview> (Letzter Zugriff: 20.09.2015)

³ Photomodeller Scanner, <http://photomodeler.com/products/scanner/default.html> (Letzter Zugriff: 14.10.2015)

⁴ Pix4UAV Cloud, <https://pix4d.com/> (Letzter Zugriff: 14.10.2015)

⁵ Geomagig Studio 12, <http://www.geomagic.com/en/> (Letzter Zugriff: 14.10.2015)

grammetrie ein sehr großes Potential in den verschiedensten Anwendungsgebieten besitzt. Eisenbeiss legte dabei den Fokus auf Anwendungsbereiche der Archäologie und des Umweltsektors.

- [Naumann *et al* 2013] führten an der Universität Rostock Genauigkeitsanalysen von UAV-Modellen am Beispiel von Deichbauwerken durch. Ähnlich der innerhalb dieser Arbeit vorgestellten Untersuchung wurde als Referenzfläche eine Laserscan-Punktwolke herangezogen. Diese stammte allerdings von einem terrestrischen Laserscanner (TLS).

Die Abmessungen des untersuchten Schutzbauwerks mit insgesamt drei Deichbecken betragen ca. 40x140m. Die Dammkrone und die Böschungen waren zum Zeitpunkt der UAV-Befliegung bis auf einen kleinen Teil (ca. 5% der Gesamtfläche) nicht begrünt. Passpunkte für TLS und UAV wurden mittels RTK-GPS eingemessen. Die UAV-Vermessung wurde mit einer MD4-1000 der Firma Microdrones GmbH und einer Olympus PEN e-P2 Amateurkamera durchgeführt. Die Flughöhe lag bei rund 80m über Grund, was zu einer GSD von 2cm führte. Es wurde mit einer Längsüberlappung von 90% und einer Querüberlappung von 80% geflogen. Die Bilder wurden mittels des oben erwähnten Softwarepakets *Pix4D UAV Cloud* ausgewertet (siehe auch [Hartmann 2012]). Drei Wochen nach der UAV-Befliegung wurden die Deiche mittels TLS vermessen. Im direkten Vergleich der zwei Messmethoden stellte sich heraus, dass die Erstellung des UAV-DOM fast doppelt so schnell war, als die Erstellung des TLS-DOM (5h:10h). An zwölf definierten Stellen, sowie in vier Querschnittsprofilen wurden die generierten DOME miteinander verglichen. Über das ganze Modell gerechnet wurde eine Standardabweichung von 2,2cm erreicht. Die Differenzen lagen zwischen +1,4m und -2m. Problematisch

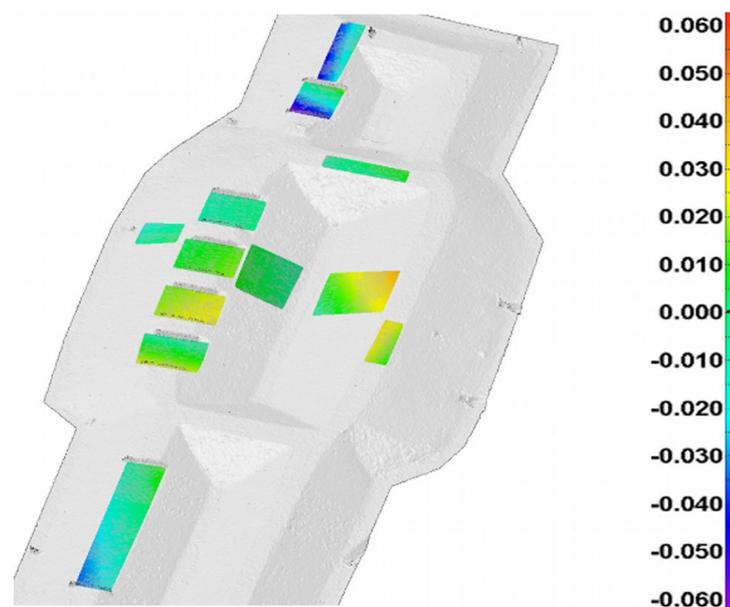


Abbildung 13: Forschungsprojekt "DredgDike"
Einheiten in [m]

Quelle: [Naumann *et al* 2013]

waren erwartungsgemäß jene Stellen, welche sich in der Zeit zwischen UAV-Flug und TLS-Vermessung verändert hatten. An zwölf Stellen wurden in beiden Modellen Ebenen interpoliert (Siehe Abb. 13). Diese differieren im Mittel um 0.7cm (im Bereich von -6,2 bis +4,3cm). Gebiete mit Vegetation wurden nicht genauer untersucht.

- [González-Aguilera *et al* 2012] führten Genauigkeitstests an UAV-generierten Geländemodellen anhand von Aufnahmen eines Granitsteinbruchs durch. Als Referenzfläche diente ein TLS abgeleitetes Modell, welches in weiterer Folge mit UAV-Messungen verglichen wurde. Die UAV-Bilder wurden mit einer handelsüblichen Amateurkamera, einer *Olympus E-P1*, aufgenommen. Die Luftbilder wurden mittels *VisualSFM*⁶ [Wu 2007] orientiert. Das Dense Matching wurde anschließend mit dem Softwarepaket *PMVS2* [Furukawa und Ponce 2010] durchgeführt. Für die Berechnung der Euklidischen Distanzen zwischen den nächsten beieinander liegenden Punkten aus TLS und UAV, wurde auf das Open-Source Programm *Cloud Compare*⁷ [Girardau-Montaut *et al* 2015] zurückgegriffen. Verglichen wurden dabei 3 Millionen TLS Punkte mit 19 Millionen UAV generierten Punkten. Für die Nächste-Punkte-Untersuchung ergab sich eine Standardabweichung von 3,8cm. Abb. 14 zeigt die Differenzen zwischen den beiden Punktwolken.

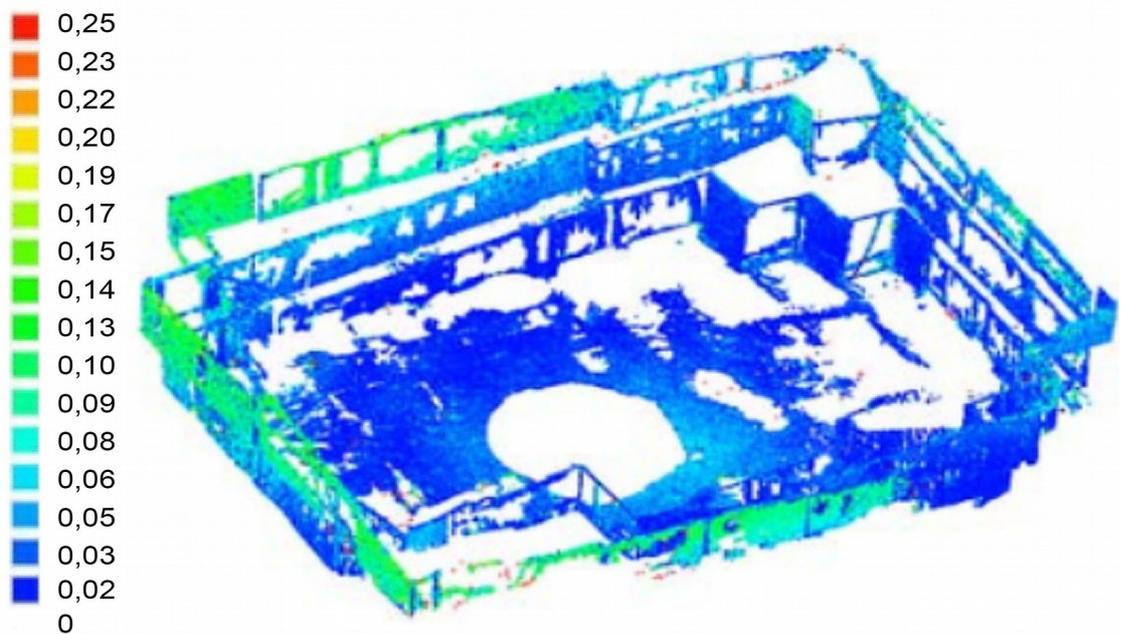


Abbildung 14: Cloud Compare Differenzmodell
Einheiten in [m]

Quelle: [González-Aguilera *et al* 2012]

⁶ VisualSFM, <http://ccwu.me/vsfm/> (Letzter Zugriff: 14.10.2015)

⁷ Cloud Compare, <http://www.danielgm.net/cc/> (Letzter Zugriff: 14.10.2015)

- Einen kritischen Überblick über die automatisierte Generierung von 3D-Punktwolken mittels Low-Cost und Open-Source Softwarelösungen liefern [Remondino und Kersten 2012]
Sie untersuchten das Leistungspotential und die Zuverlässigkeit einiger Open-Source im Vergleich zu kommerziellen Softwarepaketen, die eine große Anzahl an Bildern automatisch verarbeiten können. Als Bilddatensätze wurden sowohl reale Aufnahmen, als auch Laboraufnahmen verwendet. Folgende Softwareprodukte wurden verglichen: *Agisoft Photoscan*⁸, *Photosynth*, *Bundler*,⁹ *Apero* [Deseilligny und Clery 2011] und *VisualSFM*. Im Zuge der Analyse stellte sich heraus, dass vor allem Programme mit SfM (engl.: Structure from Motion) Algorithmus für jedes Bild eigene Kameraparameter der Inneren Orientierung berechneten und die Ergebnisse dabei stark variierten. Koordinatendifferenzen zu bekannten Punkten waren trotz oszillierender Inneren Orientierung überraschend gering. Es wurde angenommen, dass falsch angesetzte Parameter der Inneren Orientierung durch die berechneten äußeren Orientierungsparameter kompensiert wurden.
Als wesentliche Schlussfolgerung der Programmanalyse wurde festgehalten, dass eine genaue Rekonstruktion von Punktwolken nur mit einer ausreichenden Anzahl von Passpunkten und einer guten Netzgeometrie garantiert werden kann. Modelldeformationen könnten ansonsten - mit Hilfe von Software - nur mehr sehr schwer kompensiert werden.
- [Brechtken *et al* 2012] untersuchten verschiedene Lösungsansätze und Softwarepakete für die Bearbeitung von Bildverbänden. Das Untersuchungsgebiet, die Deponie Eyler Berg in Nordrhein-Westfalen (D), besaß Ausmaße von rund 200x180m mit Höhenunterschieden von bis zu 35m. Verglichen mit dem Testgebiet dieser Diplomarbeit, der Deponie Rautenweg in Wien (siehe Kapitel 4), ist sie etwa halb so groß. Mit einem Hexakopter, der eine 12 MP Kamera trug, wurden in rund 100m über dem tiefsten Bauabschnitt 84 Senkrechtaufnahmen erstellt. Die Längs- und Querüberdeckung betrug jeweils 60%. Zusätzlich wurden noch Schrägaufnahmen auf einer Kreisbahn in 100m und 75m Höhe geschossen. Über die gesamte Deponie wurden 30 Passpunkte verteilt und vom Boden aus per GPS eingemessen. Folgende Softwareprodukte wurden untersucht: *Socet Set*¹⁰ von BAE-Systems, *Photomodeler Scanner (PMS)* der Firma Eos System Inc und *Bundler/PMVS2*.
Das erzeugte Geländemodell aus *Socet Set* diente als Referenzmodell für die weitere Analyse. Die Abweichungen waren in den meisten Bereichen < +/- 10cm. Größere Differenzen ergaben sich in Bereichen mit Vegetation und bei Geländekanten. Abbildung 15 zeigt die Höhendifferenzen zwischen *Socet Set*- und dem *PMS*-Geländemodell.
- [Lemaire 2008] untersuchte anhand von zwei Luftbilddatensätzen den Einfluss der Quer- und Längsüberdeckung auf das erzeugte DOM. Bei einer großen Bildüberlappung wird die Basisli-

⁸ Agisoft Photoscan, <http://www.agisoft.com/> (Letzter Zugriff: 14.10.2015)

⁹ Bundler, <http://www.cs.cornell.edu/~snave/bundler/> (Letzter Zugriff: 14.10.2015)

¹⁰ Socet Set, <http://www.geospatialexploitationproducts.com/content/products/socet-set> (Letzter Zugriff: 14.10.2015)

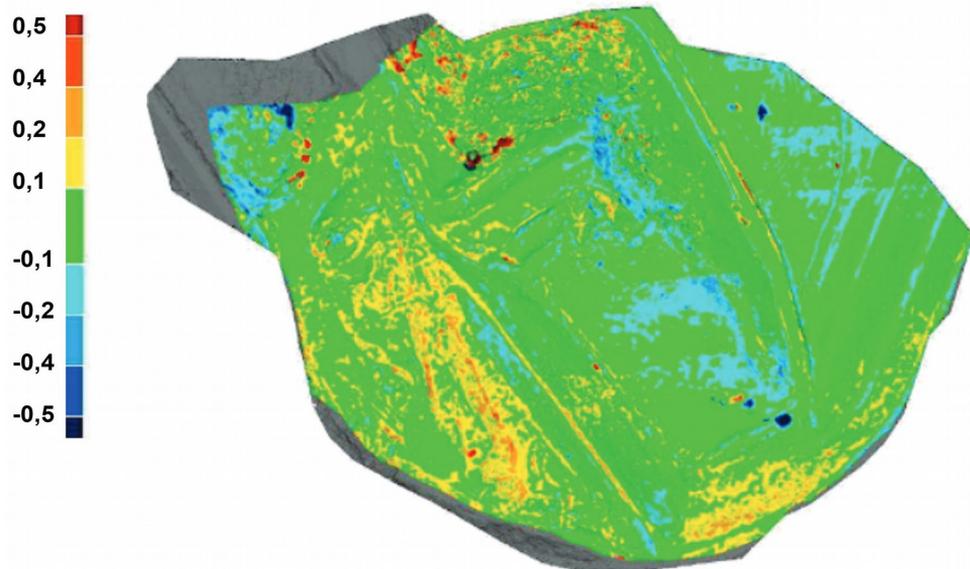


Abbildung 15: 3D-Vergleich von Geländemodellen aus *Socet Set* und *PMS*
Einheiten in [m]

Quelle: [Brechtken *et al* 2012]

nie zwischen den Fotos kleiner, dies reduziert zwar die Höhengenaugigkeit, vermindert aber Lücken durch Sichtschatten – das Geländemodell wird vollständiger. Die Auswertung erfolgte mit dem Programm *Match-T* von Trimble. Das Programm *Match-T* wählt für jede Berechnungseinheit bei der DOM-Erzeugung jene Bildpaare mit den besten Schnittwinkeln aus. Stehen Bilddaten mit hoher Überlappung zur Verfügung, werden für jede Berechnungseinheit „n“ Bildpaare für die Berechnung verwendet. Es wurden weiters Genauigkeitsanalysen für unterschiedliche Überlappungs-Varianten durchgeführt. Eine sehr große Anzahl (mehrere Hundert) Kontrollpunkte am Boden und auf Dächern standen für die Auswertung zur Verfügung.

Es konnte gezeigt werden, dass durch eine höhere Überlappung (80/60) fast doppelt so viele DOM-Punkte generiert werden können, als bei Überlappungen in geringerem Ausmaß (80/30). Die mittlere Höhendifferenz konnte von -6,5cm auf -2,2cm reduziert werden. Für ein zweites Testgebiet wurde ein, aus Luftbildern einer kalibrierten Messkamera erzeugtes DOM, mit ALS-Daten verglichen. Für strukturierte Dachflächen ergaben sich mittlere Höhendifferenzen von -25,5cm und für ebenes Gelände -6cm.

- [Greiwea *et al* 2013] nahmen die sogenannte Halde Humbert - die Abräumhalde eines stillgelegten Bergwerks im Ruhrgebiet (D) - mittels Kleinformatkamera auf, welche auf einem Oktopter montiert war. Die Halde besaß vergleichbare Ausmaße wie die Deponie Rautenweg (600m x 300m) und eine Höhe von etwa 40m.

Als Kamera wurde eine *Sigma DPI* mit 16mm Objektiv und einem 4MP Sensor verwendet. Die Flughöhe betrug rund 100m über dem höchsten Punkt. Die Flugplanung definierte 80% Längs- und 30% Querüberdeckung. Zusätzlich wurden seitlich der Halde noch zwei Streifen mit um

45° geneigten Schrägaufnahmen erfasst.

Die aufgenommenen Bilder wurden mit unterschiedlichen Softwarepaketen prozessiert (*Leica Photogrammetry Suite(LPS)*¹¹, *Socet SET*, *Agisoft Photoscan*). 16 Bodenpunkte wurden zur Georeferenzierung markiert und vom Boden aus mit GPS eingemessen. In *Agisoft* konnten auch die Schrägaufnahmen in die Auswertung mit einbezogen werden, was jedoch zu keiner Genauigkeitssteigerung der Aerotriangulation führte. Die generierten DOME aus den drei verschiedenen Softwareprodukten wurden miteinander verglichen. Abbildung 16 zeigt die Differenzen zwischen den beiden Punktwolken (*LPS* und *Photoscan*). Rote Punkte stehen für Abweichungen von > 1m. Randbereiche und Bereiche mit Vegetation wiesen die höchsten Differenzen auf.

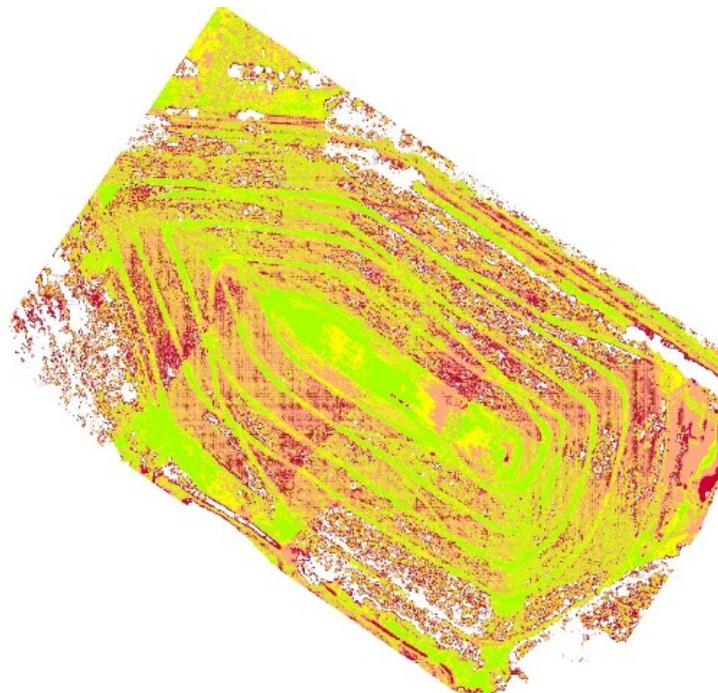


Abbildung 16: Differenzen zwischen den Punktwolken "Halde Humbert" LPS und Photoscan (Grün 0.1m, Gelb 0.2m, Rosa 0.5m und Rot >1m)

Quelle: [Greiwea *et al* 2013]

- [Haala *et al* 2013] verfolgten einen anderen Forschungsansatz und untersuchten Höhendifferenzen von zwei unterschiedlichen UAV-Systemen mit unterschiedlichen Kameras anhand eines einheitlichen Testgebiets. Verglichen wurden zwei Bilddatensätze, wobei der erste von einer handelsüblichen Kleinbildkamera *Canon Ixus 100 IS* stammte und der andere mit einer weitaus hochwertigeren *Ricoh GXR Mount A12* Kamera erstellt wurde. Ein 1000 x 400m großes Testgebiet wurde dabei mit 80% Längs- und 70% Querüberdeckung überflogen. Die Flüge wurden zu sehr unterschiedlichen Jahreszeiten durchgeführt. Der „Ri-

¹¹ Imagine Photogrammetry (vormals Leica Photogrammetry Suite), <http://www.hexagongeospatial.com/products/producer-suite/imagine-photogrammetry> (Letzter Zugriff: 14.10.2015)

coh-Flug“ fand im August 2013 statt, der „Canon-Flug“ im März 2013. Insgesamt 33 Passpunkte wurden mittels GPS eingemessen, 22 davon wurden als Referenzpunkte, 11 davon als Kontrollpunkte für die Genauigkeitsuntersuchungen herangezogen.

- Für die Canon Kamera ergaben sich als quadratisches Mittel folgende Werte: (RMS, engl. Root mean square) 3cm, 2.3cm, und 5cm für die Ost-, Nord- und Höhenkomponente.
- RMS-Werte der Ricoh Bilder waren um einige Millimeter besser.

Aufgrund der veränderten Vegetation im Jahreszeitverlauf, wurden nur entlang von Straßen und 33 ausgewählten Stellen Genauigkeitsuntersuchungen durchgeführt. An diesen Stellen lagen die Unterschiede bei < 10cm.

- [Vallet *et al* 2011] testeten in einer Studie zur Genauigkeit von UAV-Modellen das System *Swinglet* der Firma senseFly (CH). Dabei handelt es sich um einen ultraleichten Starrflügler mit < 500g Abfluggewicht. Als Aufnahmesystem wurde eine *Canon Ixus* mit 12 Megapixeln und unterschiedlichen Fokusslängen (von 5mm bis 20mm) verwendet. Längs- und Querüberlappung variierten zwischen 50-80%. Die Ground Sampling Distance (GSD) lag bei 4cm. Ein Dutzend Passpunkte wurden zur Georeferenzierung am Boden eingemessen. Beflogen wurde ein Testgebiet in zwei verschiedenen Flughöhen von 100m und 150m über Grund.

Drei Monate nach dem UAV-Flug wurde ein ALS-Flug in 200m und 250m Höhe mit einer Punktdichte von ~6 Punkten/m² für jeden Flugstreifen durchgeführt. Die UAV-Daten wurden mit zwei verschiedenen photogrammetrischen Ansätzen ausgewertet:

1. Klassischer Photogrammetrischer Workflow:

Verwendet wurden die Programme *SocetSet 5.5* von BAE Systems und *Bingo-F* für den Bündelblockausgleich. Die DOM-Berechnung erfolgte mittels *NGATE*¹², einem Modul von *SocetSet*.

2. Web basiertes Dense Image Matching Interface von *Pix4D*:

Sowohl vom ALS als auch von den beiden photogrammetrischen DOMen wurden DGMe abgeleitet. In Bereichen mit geringer Rauigkeit wurden durch die Berechnung mit *SocetSet* +/- 15cm, mit *Pix4D* sogar 10cm Genauigkeit erzielt. Größere Differenzen von bis zu einigen Metern traten, wie in Abbildung 17 dargestellt, in Gebieten mit Vegetation und somit höherer Rauigkeit auf. Die Gründe hierfür liegen in der zeitlichen Differenz zwischen UAV- und ALS-Flug (ca. 3 Monate), sowie in der Problematik, dass UAV-Messungen bei dichter Vegetation nicht bis zum Boden durchdringen können.

Das *Ngate*-DGM wies insbesondere auf asphaltierten Straßen starke Höhenabweichungen auf, was durch deren relativ niedrige Kontrastwerte und die sich wiederholenden Markierungen des Mittelstreifens erklärt werden kann.

¹² NGATE – Next-Generation Automatic Terrain Extraction, http://www.socetgxp.com/docs/education/white_papers/wp_ngate.pdf (Letzter Zugriff: 14.10.2015)

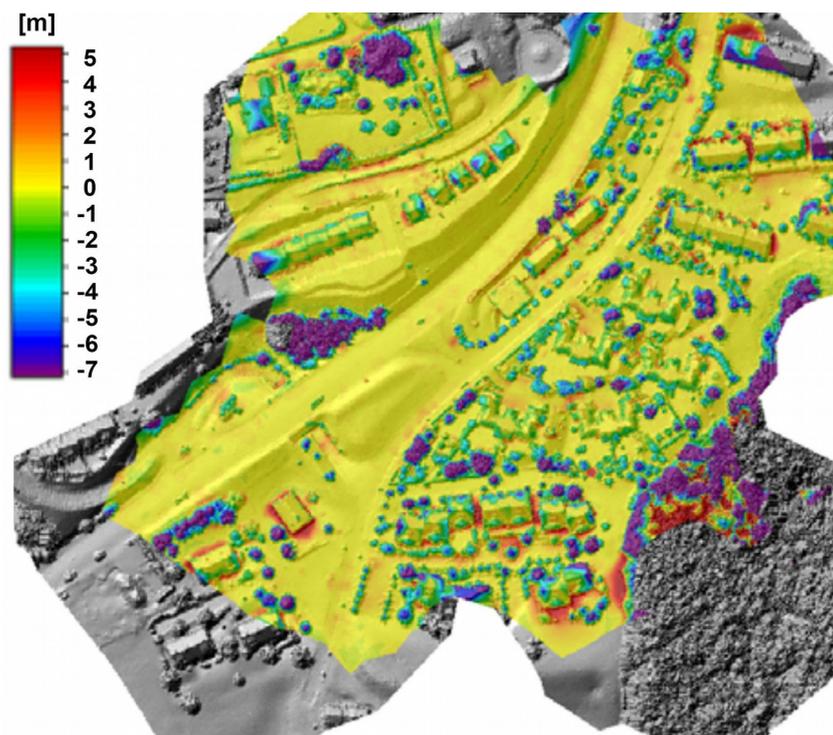


Abbildung 17: Höhendifferenzen zwischen Swinglet Pix4d und LiDAR DGM

Quelle: [Vallet et al 2011]

Die Standardabweichungen (1σ) betragen an festgelegten Kontrollpunkten: ALS: 4cm, *Pix4d*: 10cm und *Ngate*: 30cm.

Vallet kommt zum Schluss, dass die Verzeichnungsparameter der Kamera mit dem klassischen Photogrammetrieprodukt *Ngate* nicht modelliert werden können.

Orthofoto-Verschiebungen von geradlinigen Elementen wurden ebenfalls untersucht - das *Pix4D* Orthofoto zeigte Verschiebungen von ~10-15cm gegenüber dem Orthofoto, welches im Zuge des ALS-Fluges erstellt wurde.

- (Gini et al 2013) verglichen ebenfalls verschiedene Softwareprodukte. Diese waren *LPS*, *EyeDEA* (Univ. Parma), *Agisoft Photoscan* und *Pix4D UAV*. Das Testgebiet wurde wie bei Vallet mittels *Swinglet*, einem ultraleichten Starrflügler der Fa. SenseFly, in 130m Höhe und mit einer *Canon Ixus* überflogen. An insgesamt zehn Kontrollpunkten wurden empirisch Koordinatendifferenzen ermittelt. Das beste Ergebnis wurde mit *Photoscan* erzielt. Die Abweichungen an den Kontrollpunkten betragen 50mm, 19mm und 55mm respektive für die Ost-, Nord- und Höhenkomponente. Standardabweichungen wurden ebenfalls für die berechneten DOM-Differenzen ermittelt. Sie betragen für *Pix4D* vs. *Agisoft*: 84cm, *EyeDEA+Dense Matcher* [Re et al 2012] vs. *Photoscan* 89cm, sowie *LPS* vs *Photoscan*: 103cm.

Zur Berechnung der Standardabweichungen wurde auf eine Beschränkung auf glatte Bereiche verzichtet, was zu relativ hohen Differenzwerten führte. Die größten Höhendifferenzen traten

nahe Gebäudekanten und in Zonen mit hohen Bäumen auf, da innerhalb der verschiedenen Programme Höhengsprünge teilweise gerundet wurden.

Im Folgenden noch zwei aktuelle Projekte aus dem Bereich der Deponievermessung mittels UAV:

- Ein an der TU Graz Ende 2014 initiiertes Projekt mit dem Titel „*Befliegung Deponie Grub – Koralmbahn Graz-Klagenfurt*“, soll Volumens-Veränderungen der Deponie Grub mittels unbemanntem Fluggerät, ein *Aibot X6 V2 MUAV* Hexakopter der Firma Aibotix, dokumentieren. Die Deponie, bzw. Teile davon, wurden hierfür in Abständen von 4-6 Wochen vermessen. Das Forschungsprojekt lief bis Ende Juni 2015. Ergebnisse wurden bislang noch nicht veröffentlicht.
- Im deutschen Bundesland Rheinland Pfalz wurde für die gesetzlich vorgeschriebene Jahresvermessung der Zentraldeponie Eiterköpfe im Jahr 2013 erstmals eine Vermessung mittels UAV beauftragt. Das 42ha große Gebiet wurde in einer Höhe von nur 34 m über Grund befliegen. 6.538 Bilder lieferten die Grundlage für die Auswertung [Björnsen Beratende Ingenieure GmbH 2014]. Ergebnisse und Genauigkeitsuntersuchungen wurden bisher noch nicht veröffentlicht.

4 Projektgebiet und Daten

4.1 Projektgebiet

Die erstmals 1961 auf dem Gelände einer ehemaligen Schottergrube genutzte Deponie Rautenweg [Reiselhuber 2010] liegt im Norden Wiens im Bezirk Donaustadt und erstreckt sich über eine Gesamtfläche von ca. 58 ha. Im Jahr 1968 erhielt die Anlage zur Sicherung des Standorts ein sog. Wiener Dichtwandkammersystem, welches dafür sorgt, dass kein Wasser des Deponiekörpers in das umliegende Grundwasser gelangen kann. Mit einer maximal genehmigten Schütthöhe von 75m über Straßenniveau ($\hat{=}$ 435m über Adria) bildet die Deponie Rautenweg die höchste Erhebung des 22. Bezirks und ist mit einem maximal genehmigten Schüttvolumen von 22 Mio. m³ (Stand 31.12.2014) zudem die größte Mülldeponie Österreichs¹³.

Das noch freie Fassungsvermögen der Deponie Rautenweg betrug im Jahr 2009 etwa 11 Mio. m³. Es wird davon ausgegangen, dass in Summe ein jährlicher Deponie-Bedarf von etwas 200.000m³ erforderlich ist. Die durchschnittliche Schüttdichte liegt in etwa bei 1,5t/m³. Die Deponie selbst ist ein sensibles System, welches ständiger Kontrollen bedarf. So stellt nicht nur austretendes verunreinigtes Wasser ein Umweltrisiko dar, sondern auch der Gärungsprozess des gelagerten Mülls, durch welchen große Mengen an Methangase entstehen muss streng überwacht werden (2009 ca. 4,2 Mio. m³ Methan). Durch die Entnahme von Gas kommt es stellenweise auch zu Setzungen.



Abbildung 18: Schrägluftaufnahme der Deponie Rautenweg mit Blick in Richtung Norden

Quelle: Stadt Wien, www.wien.gv.at/umwelt/ma48/entsorgung/abfallbehandlungsanlagen/deponie.html (letzter Zugriff: 04.10.2015)

¹³ <https://www.wien.gv.at/umwelt/ma48/service/publikationen/pdf/leistungsbericht-ma48-2014.pdf> (letzter Zugriff: 04.10.2015)

Jährlich beauftragt die Stadt Wien, MA48 (Magistratsabteilung für Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark) eine umfassende Vermessung der Deponie, um die neu zugeführte Menge an Reststoffen genau zu dokumentieren. Die Massenermittlung erfolgt auf Basis einer Laserscanpunktwolke, welche aktuell mittels ALS aus der Luft aufgenommen wird.

4.2 ALS-Flug

Am 17.10.2013 wurde die Deponie durch die Firma Airborne Technologies GmbH via ALS befliegen [Kabelik 2013]. Geflogen wurde mit einem einmotorigen Leichtflugzeug vom Typ *Cessna 182*, die einen Laserscanner vom Typ *Riegl LMS-Q680i* trug. Ziel war die Erstellung eines möglichst akkuraten 3D-Höhenmodells (Mindestanforderung= 4 Punkte/m²), sowie eines Orthofotos. Im Zuge der Befliegung wurden folgende Daten und Metadaten akquiriert:

- Erstes und letztes Echo, sowie deren Intensitäten
- Full Waveform (d.h. vollständige original aufgezeichnete Signalinformation)
- Simultane Luftbilder, aufgenommen mit einer *IGI DigiCam H39* (Querüberlappung mind. 30%, Längsüberlappung mind. 60%)

Das Gelände wurde in sechs Streifen überflogen:

- Vier Längsstreifen (101-104), zwei Querstreifen (105-106).
- Im Anschluss an den vierten Streifen (104) wurde noch einmal der erste Streifen (101) geflogen (siehe Abb. 19).

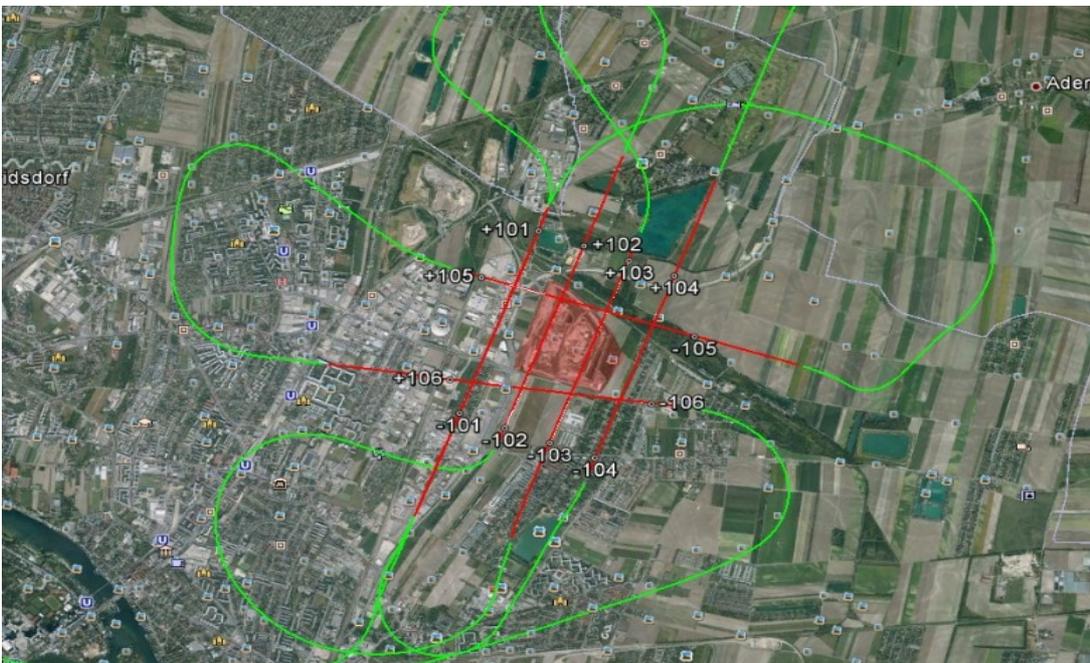


Abbildung 19: Planung der ALS-Flugstreifen durch die Firma Airborne Technologies

Quelle: [Kabelik 2013]

Mit einem Öffnungswinkel des Laserscanners von 60° wurde eine Mindestüberlappung dieser Streifen von $> 20\%$ erzielt. Die erfassten Laser-Daten im Überlappungsbereich der Streifen wurden im Zuge der Auswertung verschiedener Qualitätskontrollen unterzogen, um die Genauigkeit der Daten zu überprüfen. Die durchschnittliche Flughöhe betrug 675m.

4.2.1 ALS-Passflächen

Nahe des Deponie-Gebiets wurden in zwei Bereichen Passflächen eingemessen (siehe Abb. 20). Im Frühjahr 2015 wurden noch zusätzliche Passflächen eingemessen. Diese waren erforderlich, um die Lagerung des ALS-Modells zu verbessern und eine daraus resultierende Verkippung zu vermeiden. Es wurden in fünf Bereichen 27 Dachflächen neu eingemessen (siehe Abb. 21). Diese enthielten 322 Dachflächenpunkte, welche mittels GPS, Tachymeter und Nivelliergerät bestimmt wurden. Als Ausgangsbasis wurden Lage- und Höhenfestpunkte der Stadt Wien (MA41 Stadtvermessung) herangezogen.

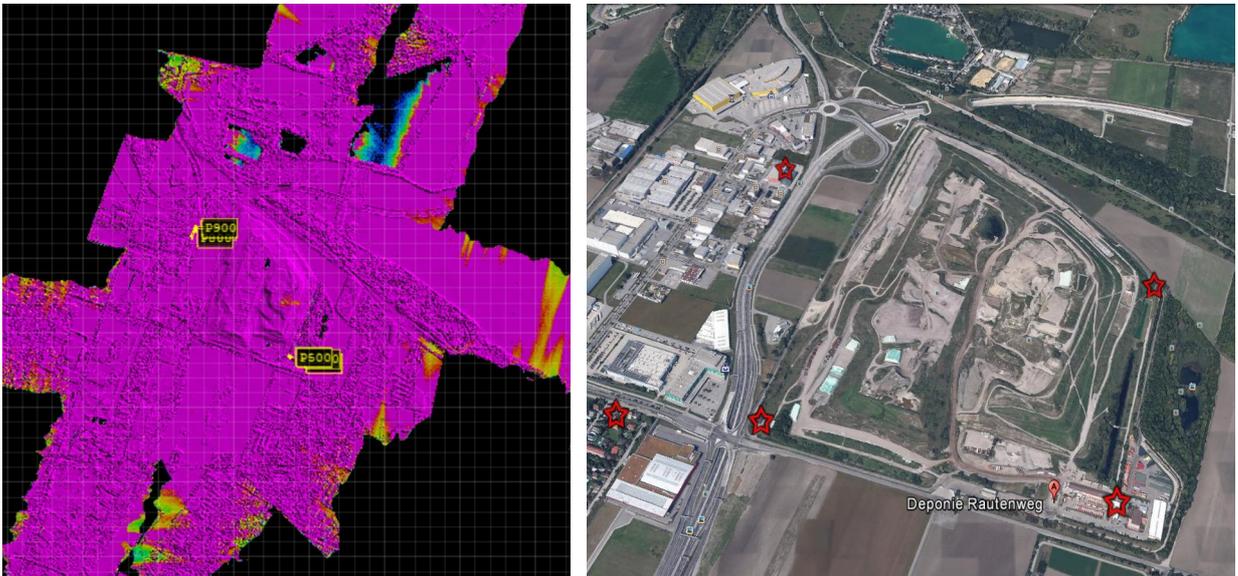


Abbildung 20: Ursprüngliche ALS-Passflächenbereiche (li.)

Quelle: [Kabelik 2013]

Abbildung 21: ALS-Passflächenbereiche der neuerlichen Messkampagne im Frühjahr 2015 (re.)

Quelle: Google Earth, Eigene Bearbeitung

4.3 UAV-Flüge

Zeitgleich mit dem ALS-Flug im Oktober 2013 wurde die Deponie Rautenweg im Rahmen dieser Diplomarbeit mittels UAV befliegen. Für die Erfassung des gesamten Testgeländes und der Wegpunkte waren acht Flüge erforderlich. Die Messmission (ohne Einmessen von Passpunkten) konnte innerhalb eines halben Tages abgewickelt werden.

4.3.1 UAV-Flugplanung

Die Planung der Wegpunkte für den autonomen Flug über der Deponie wurde mit Hilfe der Software *Autopilot Control* von ASCTEC durchgeführt. Dieses Programm ermöglichte die Georeferenzierung von Orthofotos (z.B. aus Google Earth¹⁴). Durch den Einsatz eines Matrixgenerators können Wegpunkte generiert werden, an welchen Senkrechtaufnahmen des Geländes erstellt werden sollen.

Die Vorgaben der MA41¹⁵ waren folgende:

- Bodenauflösung <5cm
- 75% Längs- und Querüberlappung

Entsprechend wurden folgende Parameter bei der Flugplanung festgelegt:

- 150m Flughöhe (über Deponie-Oberkante)
- 16mm Objektivbrennweite
- 365 Wegpunkte

Am Tag der Befliegung wurde die ursprünglich geplante Flugroute um zwei Flugstreifen reduziert:

1. Der westlichste Flugstreifen wurde eliminiert, da er direkt über der angrenzenden Autobahn (Verlängerung A23) verlaufen wäre und daher keinen Beitrag zur Erzielung der gewünschten Genauigkeit geleistet hätte. Den Flug über die Autobahn zu lenken hätte zudem ein rechtliches Risiko bedeutet, da hierfür keine Genehmigung gegeben war.
2. Ebenso wurde der östlichste Flugstreifen, welcher nur eine sehr geringfügige Steigerung der Ergebnisgenauigkeit erbracht hätte, zu Gunsten einer Verkürzung der Flugzeit weggelassen.

Als Ausgangsniveau der Flughöhe wurde die Deponie-Oberkante festgelegt, da von hier die Flüge gestartet wurden. Mit Hilfe der Planungssoftware (*Autopilot Control*) war es nicht möglich, die absolute Flughöhe, von der aus die Luftbilder geschossen werden sollten, festzulegen. Aus diesem Grund musste während der Flüge sehr genau darauf geachtet werden, stets vom gleichen Höhenniveau aus zu starten, um eine einheitliche Flughöhe zu erzielen (Berechnung ab Startniveau). Für jedes Bild wurde eine Näherungsposition mit Hilfe des GPS-Sensors des Falcon 8 gespeichert.

Die oberste Ebene der Deponie lag rund 30m höher als der Deponiefuß. Dadurch ergaben sich unterschiedliche Quer- und Längsüberlappungen der einzelnen Bilder. Weiters führten die unterschiedlichen Startniveaus zu einer Varianz bei der Flughöhe über Grund, woraus wiederum unterschiedliche Bodenaufösungen und Objektdeckungen der Fotos resultierten. Sämtliche Bilder wurden in einer absoluten ellipsoidischen Höhe von 350-366m aufgenommen. Aus der gewählten Aufnahmekonfiguration ergab sich eine mittlere Bodenauflösung von 4cm/Pixel und ein mittlerer Fußabdruck der Bilder von 240x160m am Boden. Es wurden 331 Luftbilder erzeugt.

¹⁴ Google Earth, Software von Google Inc. die einen virtuellen Globus darstellt, <https://earth.google.de/>, (Letzter Zugriff: 20.09.2015)

¹⁵ MA41, Stadtvermessung Wien, <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/>, (Letzter Zugriff: 20.09.2015)

4.3.2 UAV-Passpunkte

Als Grundlage für die UAV-Befliegung wurden im Vorfeld 15 Passpunkte zur Georeferenzierung des Bildverbandes mittels DGPS eingemessen. Damit die Passpunkte auf den Luftbildern gut erkennbar waren, wurden zehn weiße Markierungsplatten mit einer Größe von 40x40cm ausgelegt, sowie drei Kanal- und zwei Brunnendeckel markiert und eingemessen.

Im Zuge der späteren Auswertung wurde erkannt, dass die von der MA41 gemessenen GPS Höhen der UAV-Passpunkte nicht im gleichen Referenzsystem der ALS-Passflächen gemessen wurden. Der Grund dafür war nachträglich nicht mehr eruierbar. Daher wurde im Zuge der Messkampagne zur Verdichtung der ALS-Passpunktflächen im Frühjahr 2015 - also 1,5 Jahre nach der ursprünglichen Befliegung, noch einmal alle vorhandenen Passpunkte diesmal im ALS-Referenzsystem mitbestimmt. Daraus ergab sich eine wesentliche Reduktion der UAV-Passpunkte - es konnten nur noch 4 Markierungsplatten und 2 Kanaldeckel gefunden werden. In Summe standen für die Aerotriangulation nur noch 6 Höhen- und 9 weitere Lagepasspunkte aus der ursprünglichen Kampagne zur Verfügung.

In Abbildung 22 ist eine Übersicht der Passpunkte dargestellt. Die roten Punkte stellen Vollpasspunkte, die blaue Punkte Lagepasspunkte dar:

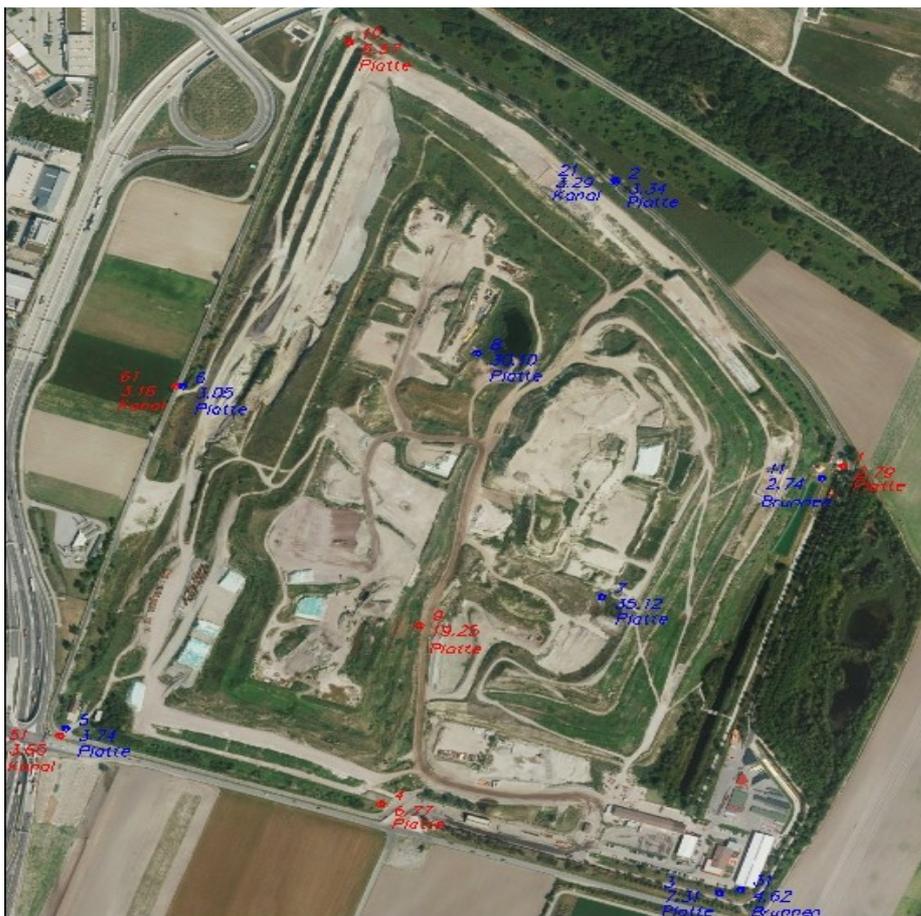


Abbildung 22: Übersicht der UAV-Passpunkte

Quelle: Eigene Grafik, basierend auf Orthofoto der Stadt Wien, MA41

4.3.3 Das Flugsystem Asctec Falcon 8



Abbildung 23: Asctec Falcon 8

Quelle: Eigenes Foto

Bei der Befliegung des Projektgebiets kam der *Falcon 8* - ein Oktokopter der Firma Ascending Technologies¹⁶ (ASCTEC) - mit der Kennung *30174-CCBF*, ausgestattet mit einer *Sony Nex-7*, zum Einsatz. Die Steuerung erfolgte von einer mobilen Bodenstation aus. Über zwei unabhängige Telemetriedatenkanäle bekommt der *Falcon 8* seine Steueranweisungen. Das System verfügt neben einem GPS Sensor auch über Beschleunigungssensoren und einen Kompass für die Flugstabilisierung und Steuerung.

4.3.4 Kamera Sony Nex-7



Abbildung 24: Sony Nex-7 mit 16mm Objektiv

Quelle: http://www.photozone.de/sony_nex/728-sony16f28nex7 (Letzter Zugriff: 01.10.2015)

Als Aufnahmesystem kam eine *Sony Nex-7* mit einem 16mm Festbrennweiten-Objektiv zum Einsatz. Die Kamera ist durch eine speziell entwickelte Aufhängung kardanisch gelagert. Die Luftbilder wurden mit der maximalen Auflösung von 24 MP aufgenommen.

Kameraspezifikationen

¹⁶ Ascending Technology (ASCTEC), Hersteller von UAS z.B. Oktokopter Falcon 8, <http://www.asctec.de/>, (Letzter Zugriff: 20.09.2015)

Sony Nex-7	
Sensortyp	CMOS
R, G, B (Farbkanäle)	R, G, B (Grundfarben)
Größe (mm)	23,5 x 15,6 (APS-C-Format)
Auflösung (Mio. Pixel)	Ca. 24,7 Effektiv Ca. 24,3
Pixelgröße [μm]	Ca. 3.92
Gewicht [g]	291g

Tabelle 2: Technische Spezifikationen der Kamera

Quelle: <https://www.sony.at/support/de/content/cnt-specs/NEX-7/list> (Letzter Zugriff: 04.10.2015)

Objektivspezifikationen

Sony E 16 mm F2,8	
Min. Blende	22
Filterdurchmesser [mm]	49
Gewicht [g]	67
Blendenlamellen	7
Zirkulare Blende	Ja
Sichtfeld horizontal (FOV) [°]	72
Sichtfeld vertikal(FOV) [°]	52

Tabelle 3: Technische Spezifikationen Objektiv

Quelle: <https://www.sony.at/support/de/content/cnt-specs/NEX-7/list> (Letzter Zugriff: 04.10.2015)

4.4 Orthofoto Flug

Zusätzlich zu den Luftbildern der UAV stand noch ein Orthofoto (OP) der MA41 vom August 2013 zur Verfügung. Das Orthofoto enthielt neben den drei RGB-Kanälen auch einen Infrarotkanal. Die Auflösung des Orthofotos betrug 10cm.

4.5 Abrechnungsgrenze

Seitens der Stadt Wien (Magistratsabteilung 41) wurde die Abrechnungsgrenze in Form eines Polygons zur Verfügung gestellt. Innerhalb dieses Polygons sind die jährlichen Massenbewegungen zu berechnen.

Größe des Abrechnungsgebiets:

- $A = 513.970 \text{ m}^2$
- $U = 2.773 \text{ m}$



Abbildung 25: Deponie Abrechnungsfläche

Quelle: Eigene Grafik, basierend auf MA41 Orthofoto, erstellt mit Geosetter

4.6 GPS Kontrollpunkte

Im Zuge einer neuerlichen GPS-Kampagne wurden im September 2015 an 73, über das Testgebiet verteilten Stellen, Kontrollhöhen gemessen.

Es wurde dafür eine lokale GPS Referenzstation zur Übermittlung der Korrekturparameter für den GPS Rover installiert. Die Transformation in das Deponie Koordinatensystem gelang über die verbliebenen UAV-Passpunkte vom Oktober 2013. Die Koordinatentransformation wurde mittels Helmerttransformation bestimmt. Tabelle 4 zeigt die Abweichungen an den UAV-Passpunkten nach der Transformation.

Die ermittelten Standardabweichungen der ermittelten Abweichungen ergaben nach den einzelnen Koordinatenrichtungen: Ost: 15mm, Nord: 11mm und Höhe: 27mm.

Pkt.Nr.	DE	DN	DH
5	0,016	0,004	0,032
51	-0,004	-0,009	0,024
61	-0,020	-0,005	0,006
10	-0,001	-0,007	-0,018
1	-0,002	0,024	-0,050
4	0,024	-0,001	0,003
9	-0,011	-0,006	0,003
Std.	0,015	0,011	0,027

Tabelle 4: Residuen der UAV-Passpunkte bei der Bestimmung der GPS Transformationsparameter (Messkampagne 09/2015)

Quelle: Eigene Tabelle

Ziel dieser Messung war es, Kontrollpunkte in Bereichen mit unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten zu messen, da vermutet wurde, dass auch die ALS-Punkte nicht bis zum Boden durchdringen konnten. Diese Kontrollpunkte dienen zur Verifizierung der ermittelten DGM Höhen aus ALS und UAV. Gemessen wurden Punkte auf vegetationsfreiem Untergrund, in niedriger und lockerer Vegetation, sowie in dichter und höherer Vegetation.

Die Kontrollpunkte wurden im Zuge der GPS-Aufnahme folgendermaßen klassifiziert. (**Optische Begehung und Klassifizierung im Zuge der Begehung am 12.09.2015**) :

- Vegetationsfreie Flächen (34 Pkt.),
- Lockere Vegetation (24 Pkt.),
- Dichte Vegetation (11 Pkt.)

Punkte wurden zur Klasse „Dichte Vegetation“ gezählt wenn es nicht mehr möglich war die Stelle ohne Hilfsmittel zu durchqueren.

4.7 Vegetation

Da Vegetation ein wesentliches Problem bei der Erstellung des Geländemodells aus UAV-Luftbildern darstellt, wurde im Zuge einer Begehung im September 2015 die vorhandene Vegetation foto-

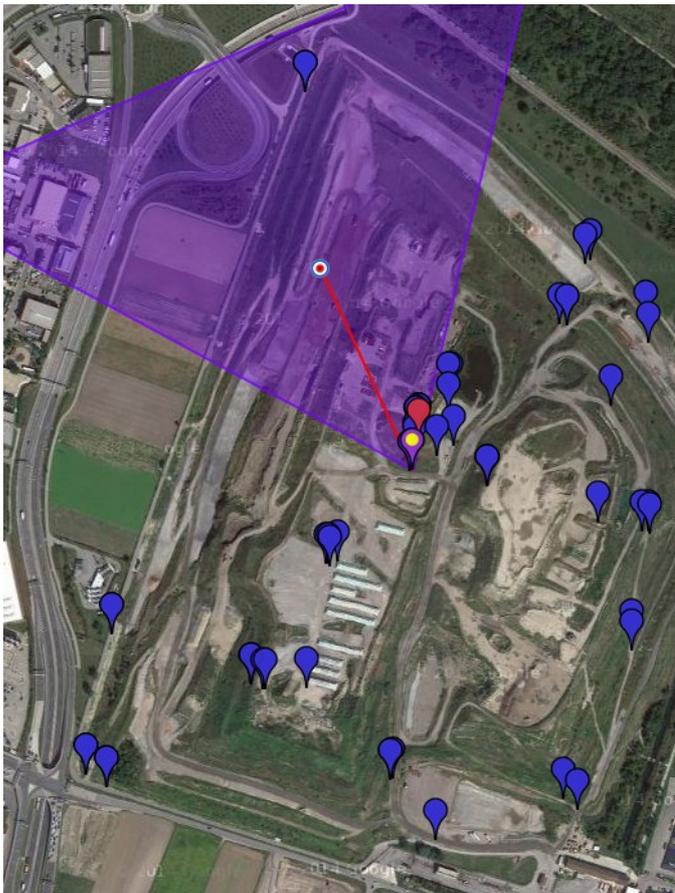


Abbildung 26: Übersicht Photostandorte zur Kartierung der Vegetation

Quelle: Eigene Grafik, basierend auf Google Satellitenkarte

grafisch dokumentiert. Sämtliche Fotos wurden über einen GPS-Tracker geographisch verortet. Die Blickrichtung wurde über einen im GPS-Tracker integrierten Kompass und Neigungssensor ebenfalls gespeichert. Eine Übersicht über alle Fotoaufnahmestandpunkte zeigt Abbildung 26. Die blauen Marker zeigen den Aufnahmestandpunkt, das violette Dreieck die Aufnahmerichtung für Bild DSC_8474.JPG. Um die Bewuchshöhen besser abschätzen zu können wurden für die Geländemodellierung an wesentlichen Stellen Fotos inkl. Bezugshöhen (Person+Zollstock) aufgenommen.

Die Vegetation ist steppenartig und sehr abwechslungsreich. Dichte und lockere Vegetation wechseln sich ab. Vereinzelt sind auch bereits hohe Bäume gewachsen. Bocksdorn, verschiedenste Disteln und Rosenarten, Rauken, Greiskraut, Königskerzen, Karde und Rittersporn sind nur einige der zahlreichen Pflanzen welche sich auf der Deponie verbreitet haben [m48pob 2015]. In den feuchteren Gebieten, wie um die künstlich angelegten Löschteiche konnten sich bereits einige Schilfarten ausbreiten.

Um den Bewuchs niedrig zu halten, wurden in den 1990er Jahren Pinzgauer Ziegen angesiedelt. Den mittlerweile 200 Ziegen gelingt das nur bedingt, wie in den Fotos der folgenden Seiten in den Abbildungen 27 und 28 zu erkennen ist.



Bild 1(8453)



Bild 2(8454)



Bild 3(8460)



Bild 4(8467)



Bild 5(8474)



Bild 6(8478)



Bild 7(8487)



Bild 8(8488)

Abbildung 27: Flora I

Quelle: Eigene Fotos



Bild 9(8489)



Bild 10(8495)



Bild 11(8498)



Bild 12(8502)



Bild 13(8507)



Bild 14(8513)



Bild 15(8517)



Bild 16(8520)

Abbildung 28: Flora II

Quelle: Eigene Fotos

4.8 Projektverlauf – Zeitleiste

Abbildung 29 gibt einen chronologischen Überblick über die Messeinsätze, welche im Zuge der Genauigkeitsuntersuchungen durchgeführt wurden.

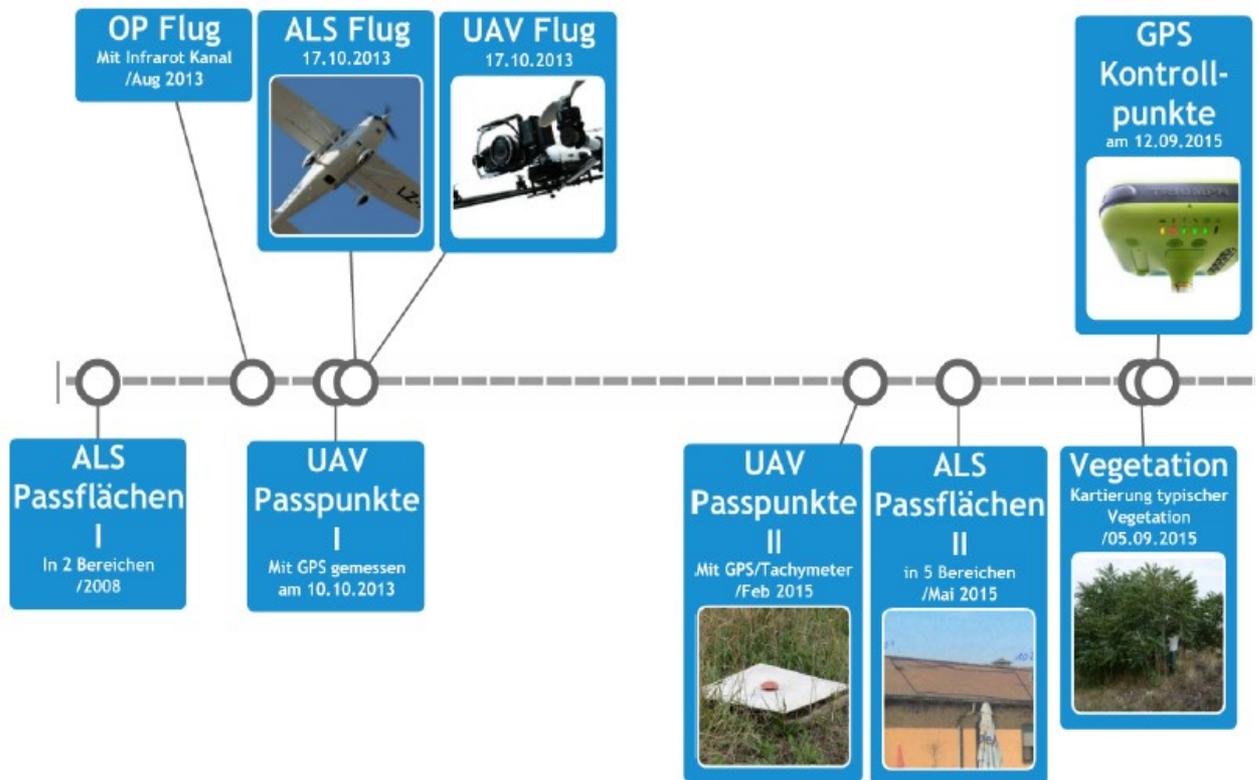


Abbildung 29: Projektverlauf von 08/2013 – 09/2015

Quelle: Eigene Grafik

5 Datenprozessierung

Das folgende Kapitel beschreibt die Auswertung der ALS- und UAV-Rohdaten.

- Zu Beginn jedes Abschnitts werden die verwendeten Softwareprodukte aufgelistet, danach wird Schritt für Schritt die Prozessierung erläutert. Zuerst wird die Prozessierung des ALS-Datensatzes (5.1) beschrieben. Das Ergebnis ist ein, aus den ALS-Daten abgeleitetes DGM, welches im weiteren als Referenzmodell zur Berechnung von Volumsdifferenzen zum UAV-Modell verwendet wird.
- Im Anschluss daran wird die Auswertung der UAV-Daten (5.2) beschrieben. Das ermittelte Ergebnis aus den UAV-Daten ist – als Zwischenprodukt – ein DOM.
- Der Übergang zum DGM wird im darauffolgenden Kapitel 6 beschrieben.
- In Abschnitt 5.3 wird die Berechnung und Klassifizierung des Vegetationsindex NDVI aus den Infrarotdaten beschrieben.
- Zuletzt werden Problemstellungen, welche während des Auswerte-Prozesses auftraten, dargestellt (5.4).

5.1 ALS-Auswertung

Die ALS-Daten wurden zunächst einer Qualitätskontrolle unterzogen (siehe 5.1.2). Aufgrund der geänderten Passflächensituation wurde anschließend eine ALS-Streifenausgleichung berechnet und die Punktwolke auf das einheitliche Referenzkoordinatensystem gelagert. Danach wurden nochmals die Streifendifferenzen analysiert. Aus dem daraus abgeleiteten DOM wurde abschließend ein DGM errechnet.

5.1.1 Software

Die Prozessierung der ALS-Daten erfolgte mit folgenden Programmen:

- *OPALS*¹⁷ [Pfeifer *et al* 2014] und
- *SCOP++*¹⁸

¹⁷ *OPALS - Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data*,

TU Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, <http://www.geo.tuwien.ac.at/opals/html/index.html>
(Letzter Zugriff: 20.09.2015)

¹⁸ *SCOP++*,

TU Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, <http://photo.geo.tuwien.ac.at/software/scop/>
(Letzter Zugriff: 20.09.2015)

5.1.2 Qualitätskontrolle

Als Datengrundlage dienen Laserscandaten der Wiener Stadtvermessung (MA 41), welche in Form von sieben ALS-Streifen übergeben wurden. Für den verwendeten Datensatz standen keine Trajektoriendaten zur Verfügung.

Um die Qualität der Daten vorab beurteilen zu können, wurde mit Hilfe des Software-Pakets *OPALS Quality* eine Streifenanalyse berechnet (vgl Kapitel 2.5.1). Für die Berechnung wurden folgende Werte für die Ermittlung der Masken als Standardwerte gewählt:

- 10 cm für die Rauigkeit
- 80 cm für die Exzentrizität

Als Gitterweite wurde, für die Berechnung der DOME, der Standardwert 1m als gut empfunden und gewählt. Die Ergebnisse der Streifenanalyse sind in den Abbildungen 30-31 dargestellt:

- ALS-Streifendifferenzen (Maskierte Darstellung): Die dunkelgrauen Flächen stellen Flächen ohne Streifenüberlappung dar (siehe Legende - „undefined“). Die zwei großen Bereiche in Abbildung 31 mit „1“ beschriftet sind Flächen ohne Streifenüberlappung. Der Löschteich ist mit Fläche „2“ beschriftet. Hier gab es ebenfalls keine Überlappung weil das ALS-System über Wasser keine Punkt messen kann. Die restlichen grauen Flächen sind größtenteils bewachsene Bereiche (Rauigkeit >10cm) oder Rasterzellen mit einer Exzentrizität >80cm.
- Wie dem Histogramm in Abbildung 30 zu entnehmen ist, liegen die mittleren Abweichungen aller maskierten Höhendifferenzen in den glatten Überlappungsbereichen bei nur 1mm bei einer robusten Streuung (Sigma_{mad}) von 15mm. Eine detaillierte Erklärung der einzelnen Kennwerte ist in Tabelle 7 auf Seite 71 zu finden.

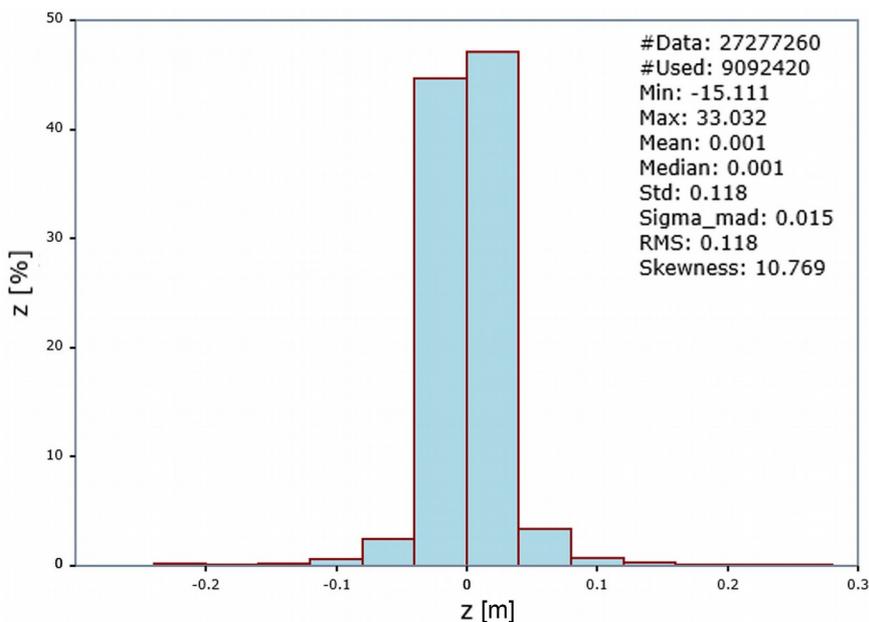


Abbildung 30: Histogramm sämtlicher Streifendifferenzen

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

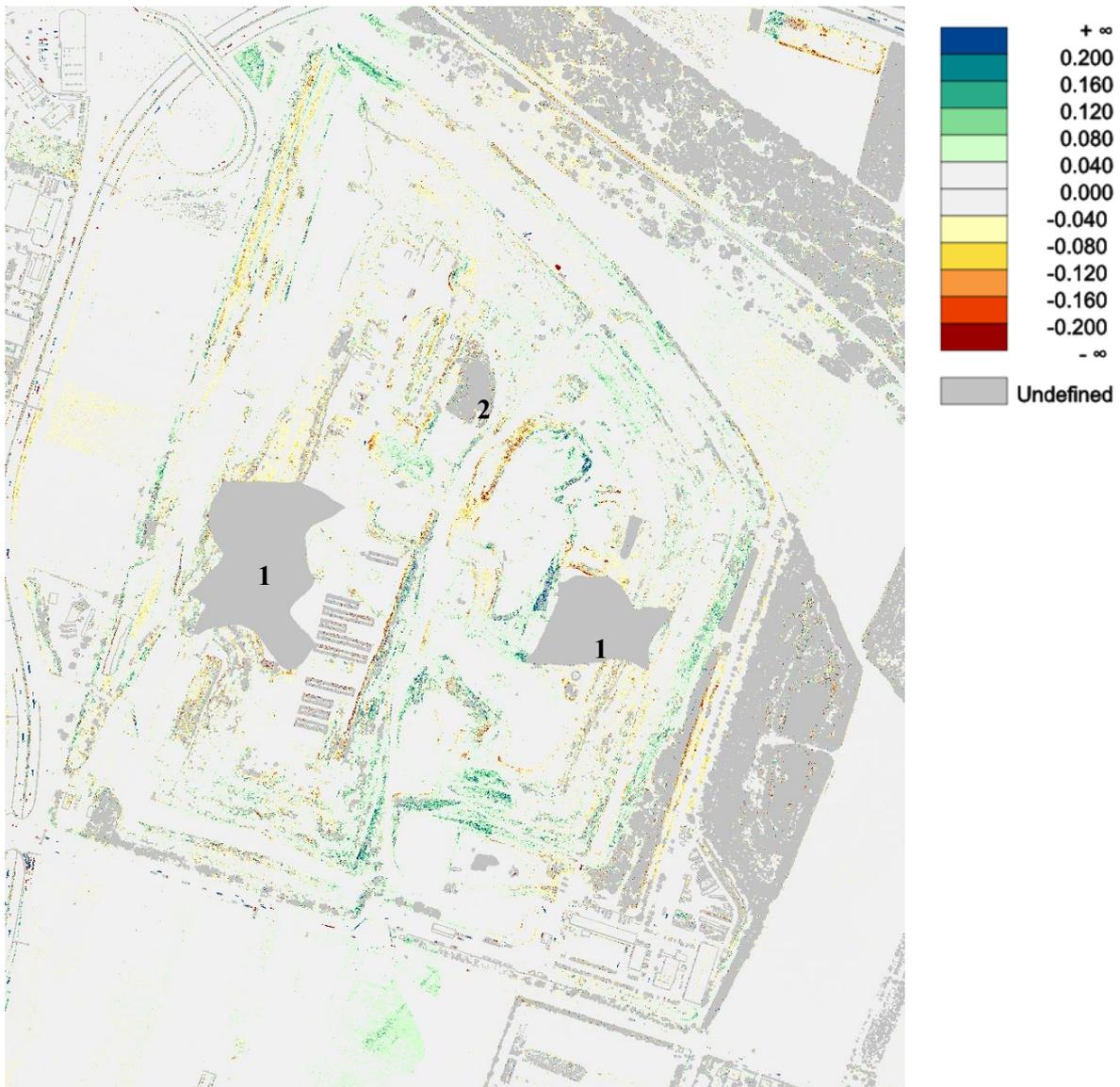


Abbildung 31: Mosaik der Streifendifferenzen im Untersuchungsgebiet. Für Bereiche mit einer Streifenüberlappung >2 wird beim Mosaikieren kein Mittelwert gebildet, sondern lediglich die Differenz der ersten berechneten Streifendifferenz dargestellt. Die Grafik soll einen ersten Überblick geben.

- 1 Bereiche ohne Streifenüberlappung
- 2 Löschteich - ALS lieferte hier keine Werte

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

5.1.3 ALS-Streifenausgleichung

Die ALS-Punktwolke der MA41, welche als Referenzfläche dienen sollte, war über lediglich zwei Passflächenbereiche gelagert, was zu einer Verkippung des ALS-Modells führte (siehe Abb. 32). Daher wurde eine weitere Messkampagne zur Schaffung zusätzlicher Passflächen durchgeführt. Es wurden dabei im Umkreis der Deponie in drei Bereichen zusätzliche Dachflächen eingemessen, insgesamt standen somit fünf Bereiche mit 27 Dachflächen für die Georeferenzierung zur Verfügung (siehe Abb. 21)

Abbildung 32 zeigt klar eine Verkippung um mehrere Zentimeter zwischen dem alten (ALS-ALT) und dem neuen, besser gelagerten ALS-Modell (ALS-NEU).

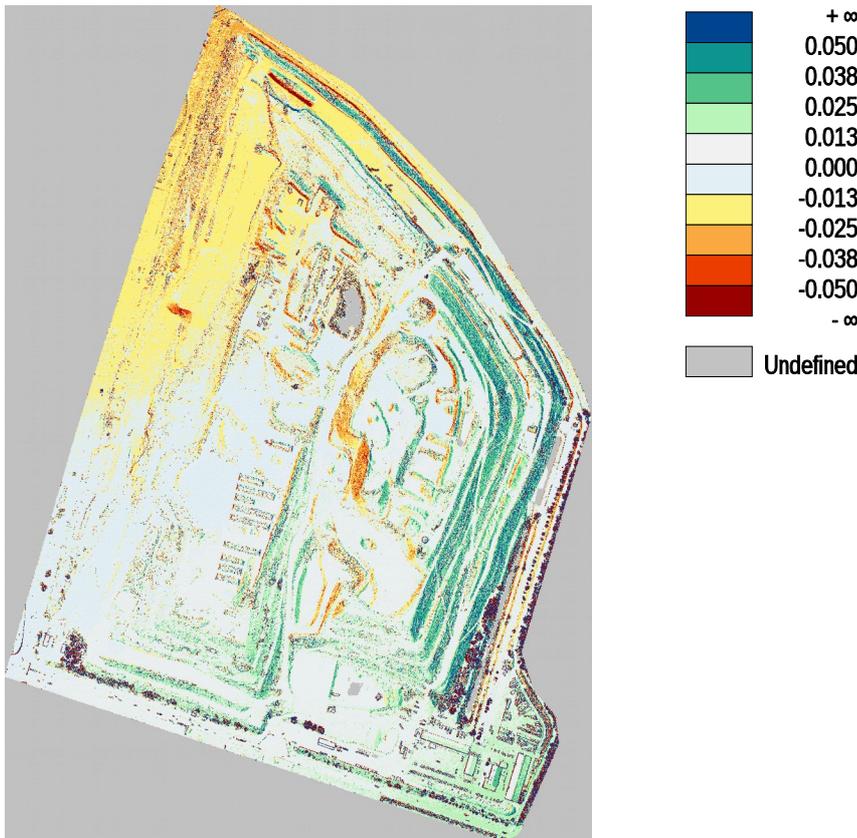
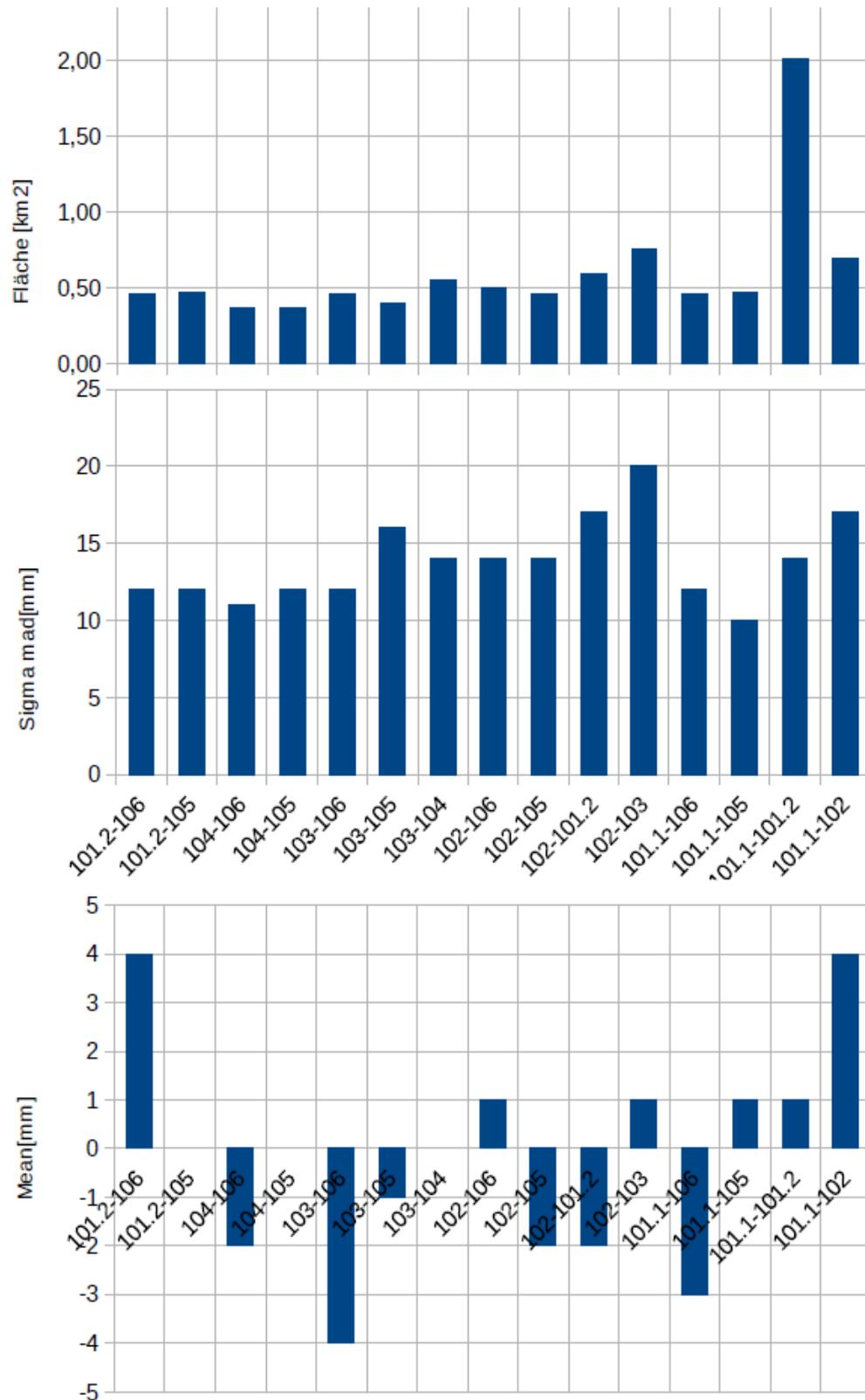


Abbildung 32: Differenzen von ALS-ALT und ALS-NEU nach ICP und Einmessung zusätzlicher Dachflächen
 Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

Um das Modell im neuen Referenzrahmen zu lagern, wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Für jede Dachfläche wurde eine ausgleichende Ebene berechnet.
- Um dem Globalen ICP Algorithmus genügend korrespondierende Punkte zur Verfügung zu stellen, wurden für jede Dach-Ebene zusätzliche Punkte mit einer Gitterweite von 10x10cm interpoliert.
- Mit dem Softwaremodul *OPALS ICP* wurden die einzelnen Laserscanstreifen neu ausgeglichen und bestmöglich an die neuen Dachflächen angepasst (siehe Kapitel 2.5.3).

Die wesentlichen Ergebnisse des letzten Iterationsschrittes sind in Anhang II zusammengefasst. Im Anschluss an die Streifenausgleichung wurde nochmals eine Qualitätskontrolle mittels *OPALS Quality* gerechnet. Abbildung 33 zeigt für jede einzelne Streifendifferenz die überlappende Fläche in [km²], die mittlere Abweichung (engl. Mean) sowie die Standardabweichung der Höhendifferenzen zweier Streifen (Sigma_{mad}). Sigma_{mad} ist eine robuste Standardabweichung, welche grobe Differenzen eliminiert. Bei der dargestellten Fläche handelt es sich um die maskierte Fläche (vgl. Kapitel 2.5.1). Streifen 101 wurde zweimal geflogen, daher der übergroße Überlappungsbereich der Streifen 101.1 und 101.2.

Abbildung 33: Diagramme der ALS-Streifendifferenzen nach der Streifenausgleichung mittels *OPALS ICP*

Quelle: Eigene Grafik

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Streifendifferenzen tabellarisch zusammengefasst. Größere Differenzen („Ausreißer“) können bei Objekten, wie z.B. parkenden Autos entstehen. Abbildung 34 zeigt die Situation an einem nahegelegenen Parkplatz. Differenzen entstehen, wenn Autos während der Befliegung bewegt werden. Würde man diese groben Differenzen ebenfalls maskieren, sollten sich die Werte der Standardabweichung (Std) und der robusten Standardabweichung (Sigma_mad) annähern. Letztere ist somit ein gutes Maß, um die Genauigkeit der erzeugten Punktwolke abschätzen zu können. Aus Tabelle 5 ist ersichtlich, dass die Standardabweichung (Std) bei durchschnittlich 110mm liegt, die robuste Standardabweichung (Sigma_mad) beträgt im Mittel 14 mm. Der Mittelwert (Mean) und der Median sind erwartungsgemäß Null, was die Bedingung für eine Streifenausgleichung ist.

Streifen	Fläche [km2]	Mean[mm]	Median[mm]	Std[mm]	Sigma_mad[mm]
101.2-106	0,47	4	4	167	12
101.2-105	0,47	0	-1	123	12
104-106	0,36	-2	-2	84	11
104-105	0,37	0	0	51	12
103-106	0,46	-4	-3	60	12
103-105	0,40	-1	0	71	16
103-104	0,56	0	0	95	14
102-106	0,50	1	0	108	14
102-105	0,46	-2	-3	86	14
102-101.2	0,60	-2	0	149	17
102-103	0,76	1	-1	77	20
101.1-106	0,46	-3	-3	190	12
101.1-105	0,47	1	0	137	10
101.1-101.2	2,02	1	1	117	14
101.1-102	0,70	4	1	136	17
Mittelwert	0,60	0	0	110	14

Tabelle 5: Streifenanalyse

Quelle: Eigene Tabelle

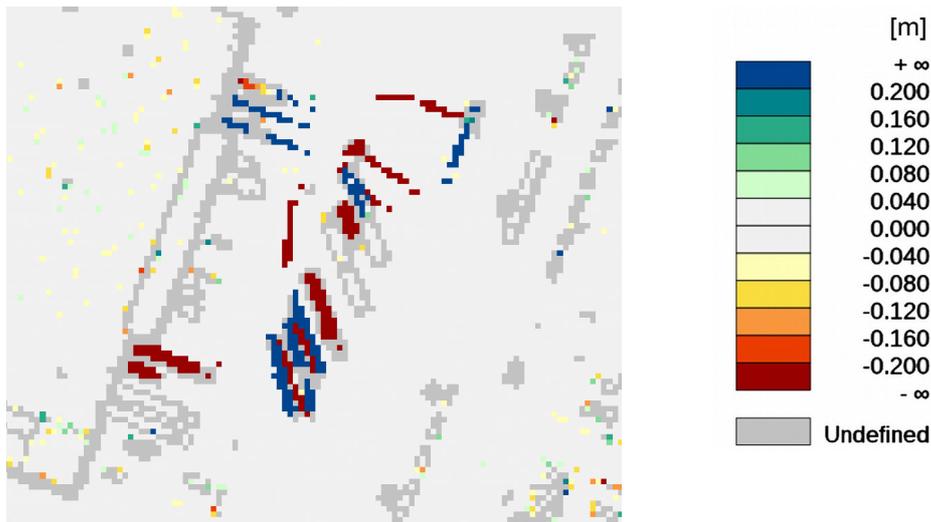


Abbildung 34: Große Streifendifferenzen am Parkplatz verursacht durch Bewegungen der Autos während des ALS-Flugs

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

5.1.4 Eigenschaften der ALS-DOM-Punktwolke

Mit dem Softwaremodul *OPALS Grid* wurde innerhalb der Abrechnungsgrenzen der Deponie (siehe 4.5) die durchschnittliche Punktdichte pro Quadratmeter berechnet. Im Mittel weist die ALS-Punktwolke eine Dichte von 13 Punkten/m² auf. Lediglich in den beiden Bereichen ohne Streifenüberlappung ist die Dichte deutlich geringer (~5 Punkte/m²). Abbildung 35 zeigt die Punktdichteverteilung. Insgesamt wurden im Abrechnungsgebiet 7.275.011 Punkte gemessen.

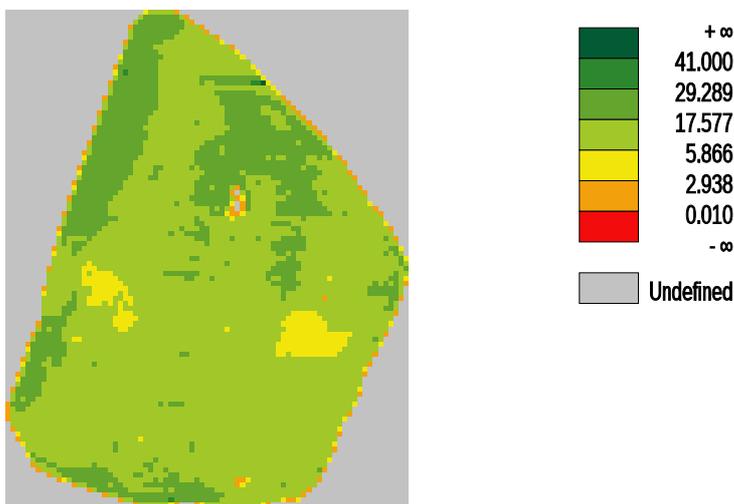


Abbildung 35: ALS-Punktdichte innerhalb der Abrechnungsgrenzen

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

Tabelle 6 zeigt die empfangen Echos. Bei nur 3% der ausgesandten Laserscan-Impulse wurde mehr als ein Echo empfangen. Leider sind in den Rohdaten des Laserscanners keine Werte für Reflectance

oder Amplitudenaufweitung (engl.: echowidth) gespeichert. Mit diesen zusätzlichen Parametern könnten Bodenpunkte besser selektiert werden um die Genauigkeit des DGMs nochmal zu verbessern. Aufgrund der geringen Anzahl an zweiten Returnechos kann davon ausgegangen werden, dass in Bereichen mit Vegetation die ALS-Laserimpulse nicht immer bis zum Boden durchdringen konnten.

Echo	Anzahl an Punkten	Anteil von Gesamtpunkten [%]
1	7.034.786	96,70
2	230.832	3,17
3	8.932	0,12
4	449	0,01
5	12	0,00

Tabelle 6: ALS Return Echos

Quelle: Eigene Tabelle

5.1.5 ALS-DGM

Die Daten der ALS-Punktswolke wurden, zur Ableitung eines DGMs aus der originalen Punktswolke, im Programm SCOP++ weiter prozessiert:

Abbildung Fehler: Referenz nicht gefunden zeigt eine schattierte 2D-Schummerung des importierten ALS-DOMs, Abbildung Fehler: Referenz nicht gefunden zeigt die 2D-Schummerung in Folge der DGM Erzeugung mit SCOP++ .

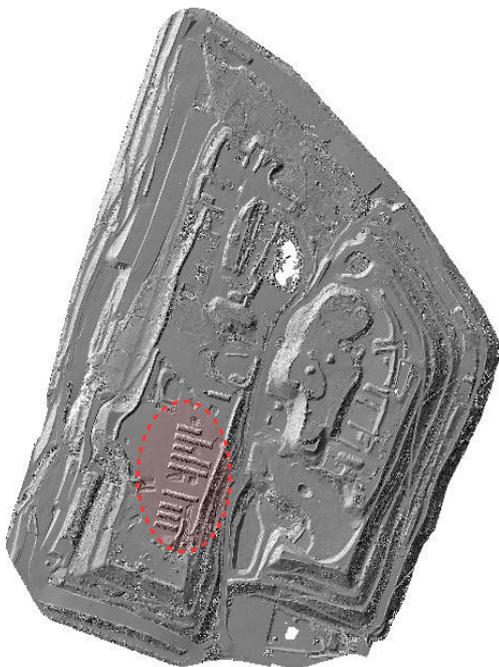


Abbildung 36: ALS-DOM

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit SCOP++

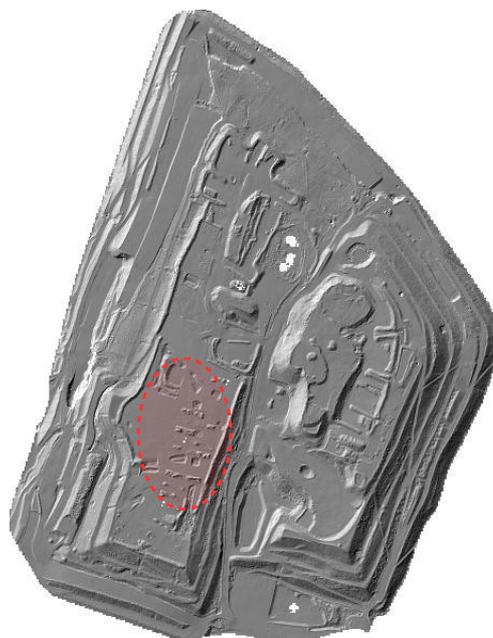


Abbildung 37: ALS-DGM

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit SCOP++

Für die DGM-Berechnung wurde der in *SCOP++* implementierte „*Lidar DTM Default*“ Algorithmus verwendet [Briese 2000]. Es ist zu erkennen, dass die vorhandene Vegetation der Deponie weitgehend entfernt wurde. Einige künstliche Objekte, wie gelagerte Abfallballen (rote Markierung in Abbildung Fehler: Referenz nicht gefunden), oder Abfall-Mulden konnten nicht gänzlich entfernt werden. Diese müssten unter Zuhilfenahme des Orthofotos manuell eliminiert werden (→ manuelle Auswahl der Objekte + Ausschneiden). Die weißen Bereiche stellen Gebiete dar, in welchen der Laser keine Werte liefern konnte (z.B. Wasserflächen wie die Löschteiche der Deponie).

5.2 Photogrammetrische UAV-Auswertung

Dieser Abschnitt soll einen Überblick über den Auswerteprozess der UAV-Daten geben. Schritt 1, die Kamerakalibrierung, wird unter 5.2.2 beschrieben. Abschnitt 5.2.3 beschreibt die Aerotriangulation. Abschließend wird die Erzeugung des DOMs beschrieben. Sämtliche Schritte sind in Abbildung 36 nochmals veranschaulicht.

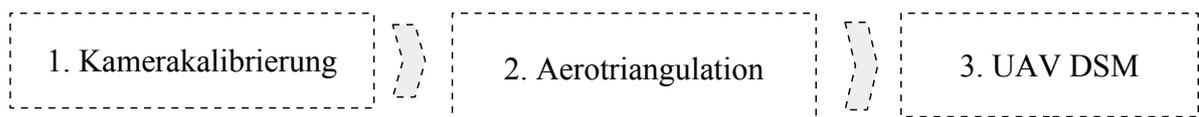


Abbildung 36: Schritte der UAV-Datenprozessierung

Quelle: Eigene Grafik

5.2.1 Software

Für die photogrammetrische Auswertung der UAV-Daten wurden verschiedene Programme verwendet, die an dieser Stelle aufgelistet werden sollen:

1. *ORPHEUS*¹⁹ zur Bestimmung der Kamerakalibrierungsparameter. Dieses Programm ging aus dem photogrammetrischen Ausgleichungsprogramm *ORIENT* [Kager 1980] hervor und bietet eine komfortable Grafikoberfläche.
2. *Trimble Inpho*²⁰ *Application Master v 6.1* ist eine professionelle photogrammetrische Software-Suite. Die Suite umfasst Module für die Aerotriangulation (*Match-AT*), die Generierung von Orthofotos (*OrthoMaster*) sowie die DOM-Generierung (*MATCH-T DOM*) [Lemaire 2008]. Im Zuge der projektspezifischen Auswertung wurde *Application Master* hauptsächlich zur Suche von automatischen Verknüpfungspunkten verwendet.

¹⁹ ORPHEUS, TU Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation. Forschungsgruppe Photogrammetrie, <http://photo.geo.tuwien.ac.at/software/orient-orpheus/orpheus/> (Letzter Zugriff: 20.09.2015)

²⁰ Trimble Inpho[®], <http://www.trimble.com/Imaging/Inpho.aspx?tab=Overview> (Letzter Zugriff: 20.09.2015)

3. *ORIENT*²¹, entwickelt am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF), ist ein photogrammetrisches Ausgleichungssystem, welches für die Bündelblockausgleichung in dieser Arbeit verwendet wurde [Kager 1980].
4. *SURE*²², ein Programm entwickelt an der Universität Stuttgart für das Dense Image Matching [Rothermel *et al* 2012, Wenzel *et al* 2013]

Alle beschriebenen Programme besitzen einen photogrammetrischen Hintergrund. Zusätzlich zum photogrammetrischen Ansatz wurde ein weiteres DOM mit

5. Agisoft *PhotoScan Professional*²³ gerechnet, welches aus dem Bereich der Computer Vision in den letzten Jahren hervorgegangen ist. Der Workflow in *PhotoScan* ist besonders einfach gestaltet und eignet sich auch sehr gut für die Auswertung von UAV-Luftbildern.

5.2.2 Bestimmung der Kamerakalibrierung

Um die Stabilität der für den UAV-Flug verwendeten Kamera des Typs *Sony Nex-7* zu testen, wurde eine Laborkalibrierung im Messkeller des Department Geodäsie und Geoinformation der Forschungsgruppe Photogrammetrie an der TU Wien durchgeführt.

Das verwendete Objektiv *Sony SEL-16F28* verfügt über einen integrierten Motor zur automatischen Bildfokussierung, was für das dauerhafte Beibehalten von Kalibrierungsparametern sehr ungünstig ist. Der Fokussiererring verfügt über eine Endlosspindel und rastet nicht auf Unendlich ein. Diese Eigenschaften sind für den üblichen Kameragebrauch sehr praktisch, da durch die fehlende mechanische Kopplung zum Fokusring manuell in den Fokussier-Vorgang eingegriffen werden kann, ohne die Mechanik zu beschädigen. Für photogrammetrische Anwendungen ist die Fokussier-Automatik jedoch kontraproduktiv, da mit jedem Scharfstellen der Kamera die Kalibrierparameter verloren gehen. Lösungsansätze für diese Problematik gibt es z.B. in der Arbeit von [Haig *et al* 2006], wo ein Adapter zur Minimierung der Linsenbewegungen eingesetzt wird. Für das Referenzprojekt Deponie Rautenweg wurde im Zuge dieser Diplomarbeit eine einfachere und vor allem kostengünstigere Methode verwendet: Der Fokussiererring wurde mit Hilfe eines Klebebandes in einer Position fixiert und blieb somit während des gesamten UAV-Flugs und der anschließenden Kamerakalibrierung unverändert. Um aus der Luft scharfe Bilder zu erhalten, wurde der Autofokus im Vorfeld auf „unendlich“ eingestellt. Danach wurde die Kamera auf „MP, manuell fokussieren“ umgestellt, um neuerliche Fokussierungen während des Flugs und der Kalibrierung zu verhindern.

²¹ ORIENT – Photogrammetric Engineering Utilities System, TU Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, <http://photo.geo.tuwien.ac.at/software/orient-orpheus/introduction/> (Letzter Zugriff: 20.09.2015)

²² *SURE - Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery*, Ursprünglich entwickelt an der Universität Stuttgart - Institut für Photogrammetrie, <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/sure/index.en.html> (letzter Zugriff: 20.09.2015) Hinweis: Wird zwischenzeitlich von dem Spinoffunternehmen nFrames GmbH vertrieben <http://nframes.com/> (letzter Zugriff: 02.10.2015)

²³ Agisoft Photo Scan, Agisoft LLC, <http://www.agisoft.com/> (letzter Zugriff: 20.09.2015)

Das Kalibrierfeld besaß die Ausmaße von 7 x 3,5 x 6 m (B / H / T) und war mit retroreflektierenden Messpunkten, welche Koordinatengenauigkeiten im Submillimeterbereich aufweisen, ausgestattet.

In vorherigen Forschungsarbeiten der Forschungsgruppe wurde davon ausgegangen, dass die Schwerkraft einen großen Einfluss auf die Kameraparameter besitzt [Kienast 2006]. Daher wurden für jeden Kalibrierungssatz jeweils vier Fotos erstellt, bei welchen die Kamera nach jedem Foto um genau 90° (im Uhrzeigersinn) um die Aufnahmeachse verdreht (= verkantet) wurde (siehe Abb. 37).



Abbildung 37: Untersuchte Kameraverkantungen

Quelle: <http://photoreview.com.au/reviews/advanced-compact-cameras/interchangeable-lens/first-look-sony-nex-6> (letzter Zugriff: 02.10.2015)

Im Messlabor wurden für die Kalibrierung zwei Aufnahmesätze erstellt. Zwischen den Sätzen wurde die Kamera stark geschüttelt, um die Kamerastabilität bei Erschütterungen zu überprüfen. Die Kalibrierungsparameter sollten nach dem Schütteln nicht wesentlich verändert sein.

Die Aufnahmen wurden mit folgenden Einstellungen durchgeführt (Bsp. der Aufnahme siehe Abb. 38)

- Blitz, Kleine Blende (Blenden-zahl $k=10$), Belichtungszeit = 1/100 Sekunden



Abbildung 38: Kalibrierbild mit horizontaler Ausrichtung ($k \sim 0$ gon)

Quelle: Eigenes Foto

Für jedes Bild wurden anschließend mit dem Programm *ORPHEUS* ([Kager und Rottensteiner 1999]) die inneren Orientierungsparameter bestimmt.

Die acht unabhängig bestimmten Koordinaten des Hauptpunktes sind in Abbildung 39 dargestellt. Die maximalen Differenzen in beiden Koordinatenachsen betragen rund 10 Pixel.

Ein Zusammenhang zwischen den beiden Sätzen und den unterschiedlichen Kantungen (90°-Drehungen) ist hier deutlich zu erkennen. Nur zwei Aufnahmepositionen, bei welchen die Kamera um 180° verdreht war, also „auf dem Kopf stand“ (Kantung *k_200g*), erzielen abweichende Ergebnisse (siehe Abb. 39). Um diese Systematik genauer erkennen zu können, müsste diese Kalibrierung zu mehreren Zeitpunkten und mit mehreren Sätzen wiederholt werden.

Die durchgeführte Kalibrierung lieferte Näherungswerte für Hauptpunkt, Kamerakonstante und Verzeichnungs-Parameter. Die Standardabweichungen der ermittelten Hauptpunktkoordinaten liegen zwischen 2 und 5 Pixel (siehe Anhang I).

Es kann festgehalten werden, dass bei der verwendeten Kameraausrüstung Hauptpunkt und Kamerakonstante instabil sind. Während der photogrammetrischen Auswertung wurde daher eine Kalibrierung „on the job“ durchgeführt. Die Kameraparameter wurden bei der Berechnung des Bündelblocks nicht festgehalten, sondern bei der Bündelblockausgleich geschätzt. Die Kalibrierwerte aus dem Messlabor wurden als Näherung im Ausgleich übernommen. Die Kamerakalibrierung war wesentlich, um das Ergebnis der „on the job“ Kalibrierung zu verifizieren. Bei der anfänglichen Berechnung mit fehlerbehaftete UAV-Passpunkte konnte auf den ersten Blick, bei Betrachtung der Residuen an den Passpunkten, kein Fehler ausfindig gemacht werden. Die Fehler der Passpunkte wurden durch die Kalibrierparameter der Kamera kompensiert. Das Ergebnis war ein völlig deformiertes Modell (vgl. Abschnitt 5.4).

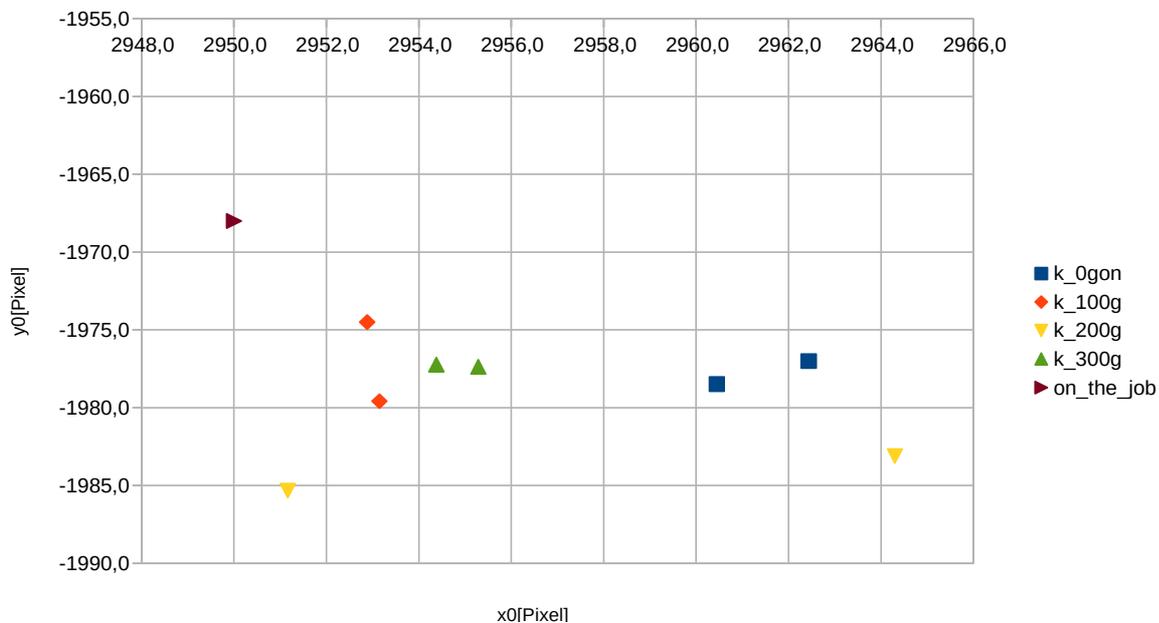


Abbildung 39: Lage des Bildhauptpunktes bei unterschiedlichen Kantungen. Der Punkt „on_the_job“ zeigt die Lage des Hauptpunktes welche im Zuge des Bündelblockausgleichs berechnet wurde (vgl. Kapitel 5.2.3)

Quelle: Eigene Grafik

Umgekehrt können grobe Fehler der Inneren Orientierung im Zuge der Bündelblockausgleichung durch die Parameter der äußeren Orientierung weitgehendst kompensiert, und oft gar nicht detektiert werden. [Clarke 1998].

Anmerkung:

[Haring 2007] untersuchte in seiner Dissertation die Stabilität von drei Kameras (*Canon EOS 1Ds*, *Nikon D70*, *Nikon D200*). Die Parameter der Inneren Orientierung, vor allem die Koordinaten des Bildhauptpunktes unterlagen bei unterschiedlichen Kamerapositionen ebenfalls signifikanten Änderungen. Es ergaben sich dabei Differenzen bei der Lage des Hauptpunktes von bis zu 30 Pixel. Die retroreflektierenden Punkte wurden mittels Förster Operator gesucht und in die Ausgleichung übernommen. So konnten die Koordinaten des Bildhauptpunktes mit einer Genauigkeit von <1 Pixel bestimmt werden.

Wie oben erwähnt, wurde im Unterschied zu Haring in dieser Arbeit die Bildmessung (bei den *Sony Nex-7* Bildern) manuell durchgeführt. Es konnte nur eine Genauigkeit von 2-5 Pixel erreicht werden. Die Genauigkeit lag bei der Kalibrierung der *Sony Nex-7* mit manuellen Bildmessungen und dem verwendeten Sony Objektiv mit 16mm Brennweite um rund 40% schlechter als in den Versuchen von Haring mit automatischen Bildmessungen.

Eine weitere Ursache der Instabilität des Hauptpunktes könnte der Einfluss der Schwerkraft auf das Objektiv sein (vgl. [Haig *et al* 2006]). Da im Zuge dieser Arbeit nur Senkrechtaufnahmen getätigt wurden, wurde auf eine genauere Betrachtung dieses Umstandes nicht näher eingegangen.

5.2.3 Aerotriangulation

Die Aerotriangulation (Abkürzung: *AT*) wurde mit den beiden Programmen *Application Master 6.1* und *Orient* berechnet:

- Zunächst wurden die Luftbilder der Deponie in das Programm *Application Master* importiert, wo ein Kameramodell für die verwendete *Sony Nex-7* erstellt wurde. Als Näherungswerte wurden die zuvor im Labor bestimmten Kalibrierungsparameter importiert.
- Für jedes Foto standen GNSS-Koordinaten im System WGS84 zur Verfügung, die problemlos eingelesen werden konnten. Da *MATCH-AT* anfangs keine relative Orientierung des Bildverbandes berechnen konnte, mussten die Flugstreifen manuell erstellt werden.
- Insgesamt wurden 8.451 Verknüpfungspunkte (TP, engl. Tiepoints) mittels *MATCH-AT* automatisch bestimmt. Zusätzlich wurden noch 131 Verknüpfungspunkte manuell in den Bildern gemessen, um die Orientierung von Fotos, in denen automatisch zu wenige TPs gemessen wurden, zu verbessern.
- Da von den ursprünglich 15 Vollpasspunkten in der zweiten Messkampagne nur mehr sechs vor Ort vorhanden waren, wurde in Bereichen mit fehlenden Höhenpasspunkten zusätzlich noch zehn Höhenpasspunkte aus den ALS-Daten übernommen. Eine Verteilung der TPs (= kleine hellgrüne Punkte) ist in Abbildung 40 zu sehen.
- Die berechneten Verknüpfungspunkte sowie die Passpunkte wurden anschließend in das Programm *Orient* zur Bündelblockausgleichung importiert.
- Das Ergebnis dieser Berechnung wurde anschließend in *MATCH-AT* importiert, wo eine finale Ausgleichung durchgeführt wurde, bei der die *Orient*-Ergebnisse als Beobachtungen eingeführt wurden. Damit sollten etwaige Restfehler aufgrund unterschiedlicher Verzeichnungs-Definitionen in *Orient* und *Match-AT* kompensiert werden.

Die ermittelte Messgenauigkeit in den Bildern lag bei automatischer bzw. manueller Messung bei 0,5 bzw. 0,8 Pixel. Die relativ geringe Genauigkeit, die (im Vergleich zu professionellen Messkameras) mit der *Sony Nex-7* erzielt wurde, ist u.a. auf die schlechtere Bildqualität mit teilweise verwackelten Bildern zurückzuführen. Eine Qualitätssteigerung bei gleichem Messequipment könnte durch niedrigere Flughöhe und kürzere Belichtungszeiten erzielt werden.

Im Zuge der Ausgleichung wurden die inneren Orientierungsparameter der Kamera geschätzt. Diese lagen im Bereich der Laborergebnisse. Die wichtigsten Ergebnisse der Aerotriangulation mittels *Orient* sind in Anhang III zusammengestellt.

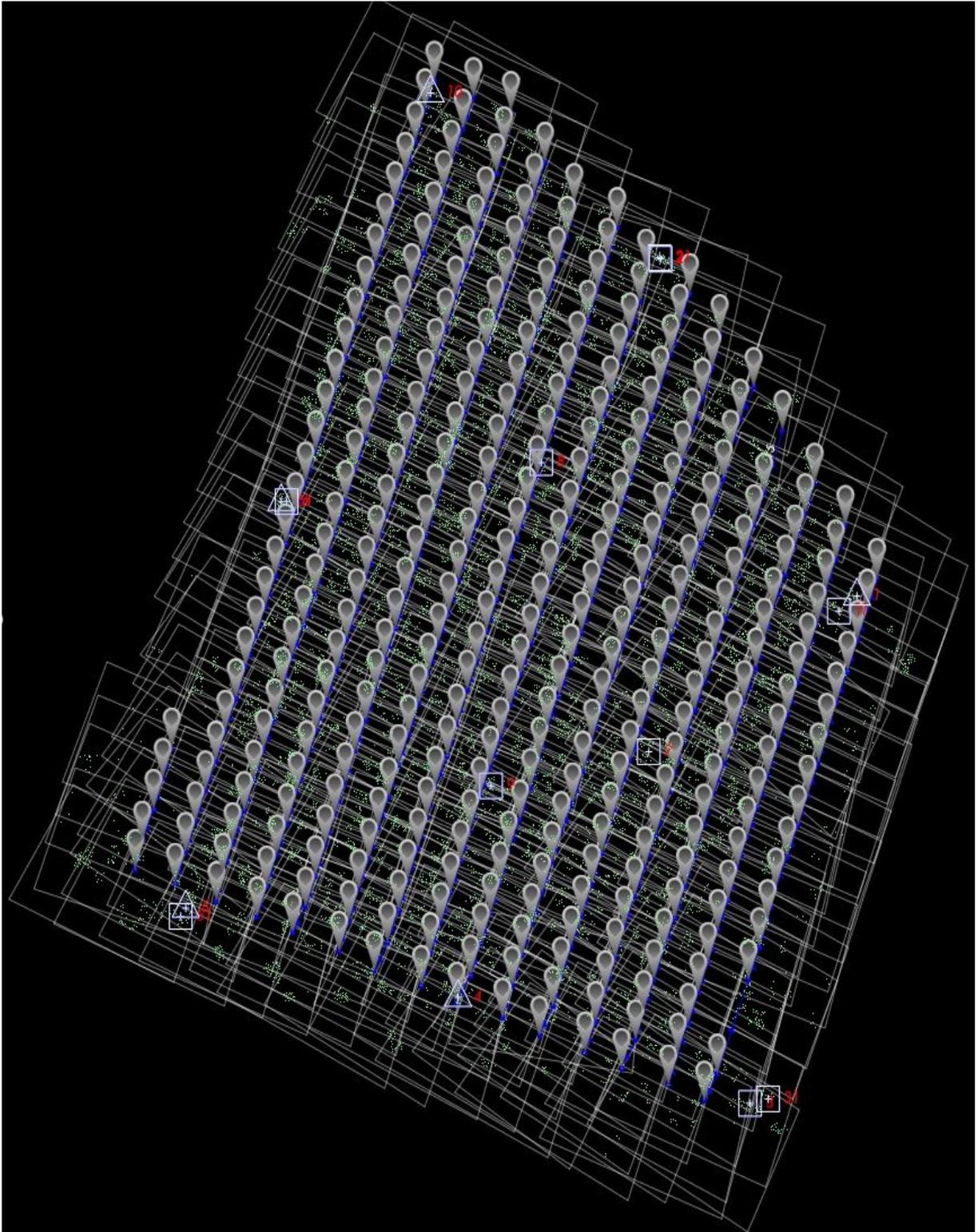


Abbildung 40:Übersicht UAV-Verknüpfungspunkte

- Die blauen Linien stellen die Flugstreifen des UAV-Flugs dar.
- Entlang der Flugstreifen sind mittels grauem Marker die Fotostandpunkte eingetragen.
- Die kleinen grünen Punkte stellen die Verknüpfungspunkte dar.
- Vollpasspunkte werden durch Dreiecke dargestellt, Lagepasspunkte ein Quadrat.

Quelle: Eigenes Bild, erstellt mit AM

5.2.4 UAV-DOM

Mit der Methode des „Dense Image Matching“, die es ermöglicht aus Bildern 3D-Oberflächen zu erzeugen (vgl. Kapitel 2.4), wurden mit verschiedenen Softwaretools digitale Oberflächenmodelle (DOMe) erzeugt. Zwei Softwaremodule wurden für die DOM-Generierung verwendet:

- Das Modul des Trimble Inpho® Application Masters: *MATCH-T* mit der Methode: *Precise*
- *SURE* mit der Methode: *Default*

Ergebnis:

Die beiden erzeugten DOMe waren einander sehr ähnlich. Da das DOM, welches mit *SURE* generiert wurde, geringere Differenzen zum ALS-Modell aufwies, wurde mit diesem Modell weiter gearbeitet.

Die DOM-Rohdaten im Format LAS besaßen für dieses Projekt ein Speichervolumen von rund 115GB. Die erzeugte *SURE*-Punktwolke hatte eine Rasterweite von 4cm (identisch zur Bodenpixelgröße). Die Punktdichte lag im Mittel bei 567 Punkten/m² und war somit 40x dichter als die ALS-Punktwolke. Eine Verteilung ist in Abbildung 41 zu sehen.

Mit der Dense Matching Methode wird eine sehr dichte und homogene Punktwolke erzeugt. Lediglich im Bereich des Löschteichs (gelbe Schattierung) ist die Punktdichte aufgrund der Wasseroberfläche geringer.

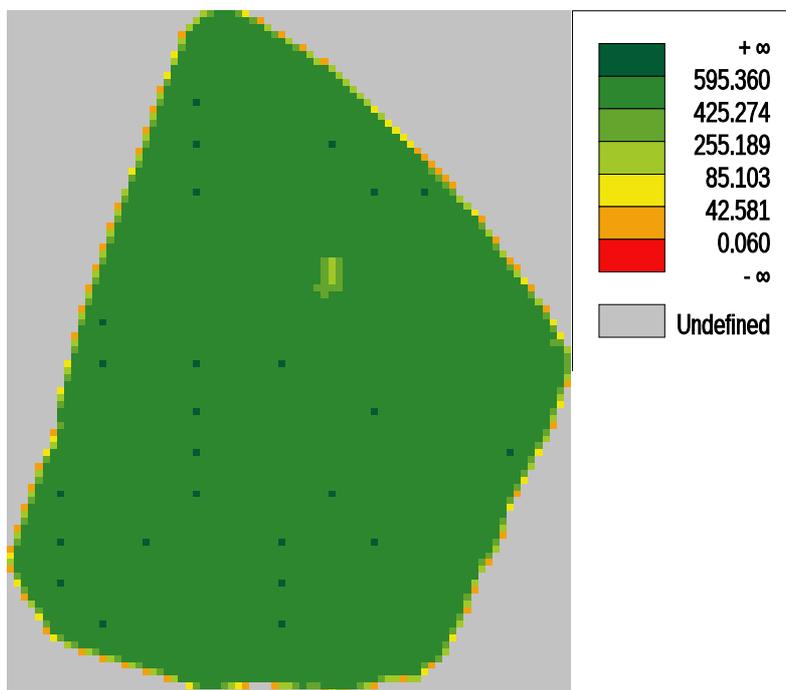


Abbildung 41: Punktdichte UAV-DOM

Quelle: Eigenes Bild, erstellt mit OPALS

Abbildung 42 zeigt das mit *SURE* erzeugte DOM mit farbkodiertem Höhenverlauf und Höhenschichtlinien.

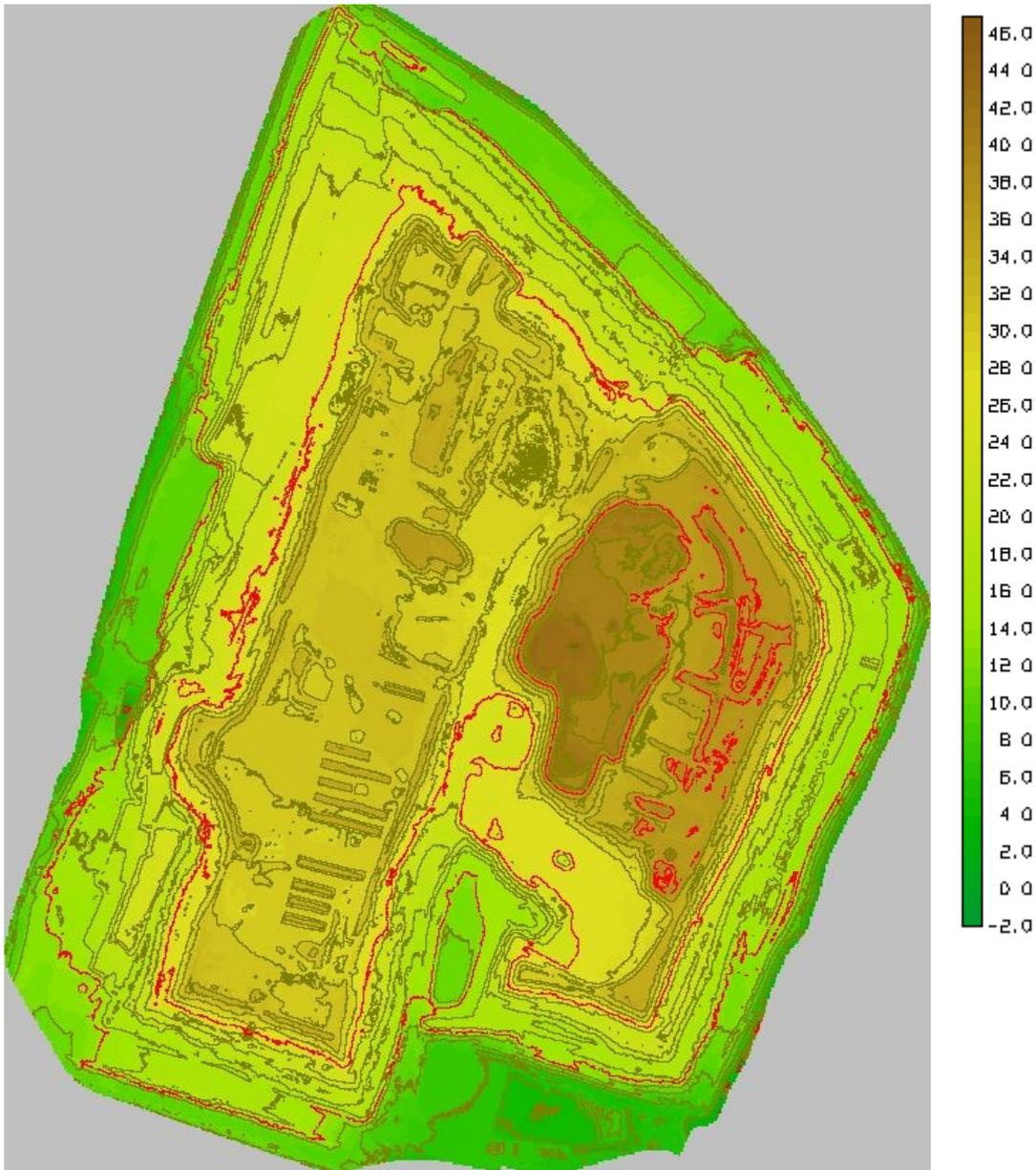


Abbildung 42: UAV-DOM mit absolutem Höhenfarbverlauf und Höhengichtlinien
Einheiten in [m]

Intervalle Höhengichtlinien: Braun=1m, Rot=5m

Quelle: Eigenes Bild, erstellt mit SURE, visualisiert mit SCOP++

5.3 Infrarotdaten Auswertung und Bestimmung des NDVI

Der Vegetationsindex **NDVI** (engl.: Normalized Differenced Vegetation Index) ist eine Kenngröße dafür, wie „vital“ eine Pflanze ist. Dabei wird folgende Eigenschaft von Pflanze genutzt: Gesunde Vegetation reflektiert im roten Bereich des sichtbaren Spektralbereichs (600-700nm Wellenlänge) sehr wenig und im nahen Infrarot-Bereich (700-1300nm Wellenlänge) sehr viel Strahlung. Andere Oberflächen hingegen (z.B. Asphalt, Schotter) zeigen in diesen beiden Bereichen keinen Unterschied des Reflektionsgrads.

Der NDVI-Index eignet sich daher sehr gut, um Bereiche mit (gesundem) Bewuchs von vegetationsfreien Flächen bzw. ungesunder Vegetation zu unterscheiden [O A 2015].

Der NDVI wurde nach folgender Methode (Formel 3) berechnet:

$$NDVI = \frac{NIR - ROT}{NIR + ROT}$$

Formel 3: Vegetationsindex NDVI

Quelle: [O A 2015b]

Mit dem Open Source GIS-Proramm *QGIS*²⁴ wurde aus dem gelieferten Orthofoto, welches als viertes Band einen Infrarot Kanal gespeichert hatte, der NDVI berechnet.

Abbildung 47 (S.68) zeigt das Ergebnis:

Bereiche mit sehr niedrigen NDVI repräsentieren vegetationsfreie Flächen. Die Werte wurden in 5 Klassen farblich dargestellt. Bereiche mit Vegetation sind gut erkennbar. Bäume und höhere Strauchgruppen sind ebenfalls mit dem menschlichen Auge leicht auszumachen.

5.3.1 NDVI Klassifizierung

Um vegetationsfreie Flächen und Gebiete mit Bewuchs unterscheiden zu können, wurde mittels *QGIS* eine Klassifizierung mit dem „Bayes Filter“ durchgeführt:

$$P(B/A) = \frac{P(A/B) \cdot P(B)}{P(A)}$$

Formel 4: Bayes-Theorem

Quelle: [Melzer 2007]

Das Bayes-Theorem (Formel 4) besagt, dass es möglich ist die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(B|A)$ als Funktion von Randverteilungen $P(A)$ und $P(B)$ und der bedingten Wahrscheinlichkeit $P(A|B)$ auszudrücken [Melzer 2007]. $P(B)$ drückt die a priori Wahrscheinlichkeit von B aus, und $P(B|A)$ die a posteriori Wahrscheinlichkeit von B unter A. Repräsentiert X ein Merkmal und w die Klassenzugehörigkeit von Mustern, so kann mit Hilfe von Formel 5 die Wahrscheinlichkeit ausgedrückt werden, mit welcher das Muster i zur Klasse j gehört [Melzer 2007].

$$P(w = j / X = i) = \frac{P(X = i / w = j) \cdot P(w = j)}{P(X = i)}$$

Formel 5: Wahrscheinlichkeit nach Bayes dass das Muster i zur Klasse j gehört

Quelle: [Melzer 2007]

²⁴ QGIS, „Ein freies Open-Source-Geographisches-Informationssystem“, <http://www.qgis.org/de/site/> (Letzter Zugriff: 20.09.2015)

Um die beiden Merkmalsmuster „Vegetationsfrei“ und „mit Vegetation“ zu erstellen, wurde in einem ersten Schritt in *QGIS* ein Trainingsset angelegt. Dazu wurden Polygone in die zu klassifizierenden Flächen gelegt. *Klasse 0* wurde als „vegetationsfrei“, *Klasse 1* für Flächen „mit Vegetation“ definiert. Abbildung 43 zeigt ein Beispiel zweier Musterflächen.



Abbildung 43: Musterflächen zur Klassifizierung mittels Bayes-Filter

Quelle: Eigene Grafik, basierend auf MA41 Orthofoto

Dieses Trainingsmodell aus *QGIS* wurde auf das zuvor erstellte NDVI Orthofoto angewendet, um für jedes Pixel die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu *Klasse 1* oder *Klasse 0* zu berechnen.

Die Klassifizierung ergab, dass

- 53% der Pixel wahrscheinlicher zur *Klasse 1* „mit Vegetation“ und
- 47% der Pixel wahrscheinlicher zur *Klasse 0* „vegetationsfrei“ angehören.

Etwas mehr als die Hälfte des Abrechnungsgebietes der Deponie Rautenweg ist demzufolge bewachsen. Abbildung 44 zeigt das Ergebnis der Bayes Klassifizierung mit 2 Klassen.

In weiterer Folge wurde eine dritte Klasse, *Klasse 2* mit „dichter Vegetation“, eingeführt und im Trainingsset aufgenommen. Als Musterregionen wurden gezielt Stellen ausgewählt, die aufgrund ihrer Texturierung Bäume, hohe Strauch- oder Schilffgruppen aufwiesen. Abbildung 45 zeigt eine solche Musterpolygonfläche. Der NDVI-Wert liegt in diesen Flächen stets über 0.35.

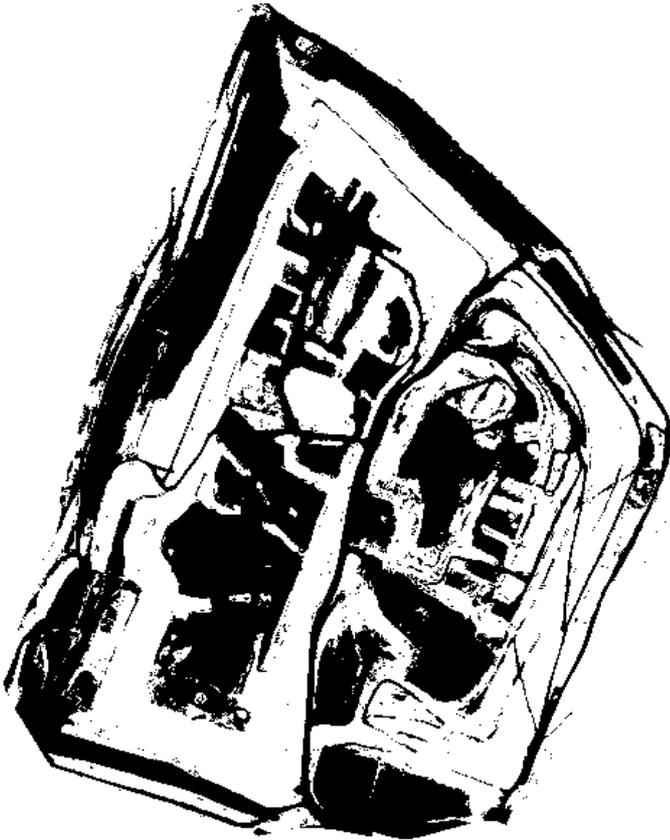


Abbildung 44: Ergebnis der Bayes Klassifizierung mit zwei Klassen
Klasse 0=schwarz (vegetationsfrei, Klasse 1=weiß (mit Vegetation)

Quelle: Eigenes Bild, erstellt mit QGIS

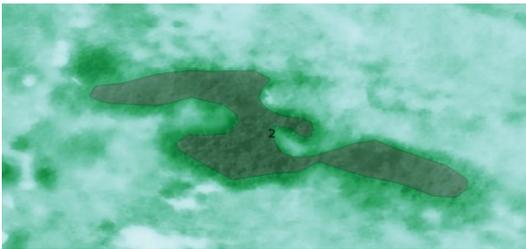


Abbildung 45: Musterpolygon für Klasse 2 für dichte Vegetation

Quelle: Eigenes Bild, erstellt mit QGIS

Ein Beispiel für die exemplarisch dargestellte Musterregion wird in Abbildung 28, Bild 5 auf S. 44 gezeigt. Das Ergebnis der zusätzlichen Klassifizierung wird in Abbildung 46 gezeigt. (An der rot markierten Stelle ist die auf S. 44, Bild 5 dargestellte Baumgruppe erkennbar). Die Klassifizierung ergab:

- Klasse 0 (keine Vegetation) 44,1%
- Klasse 1 (lockere Vegetation) 44,2%
- Klasse 2 (dichte Vegetation) 11,7%



Abbildung 46: Ergebnis der Bayes Klassifizierung mit drei Klassen

Quelle: Eigenes Bild, erstellt mit QGIS

Eine ebenso gute Klassifizierung könnte mit dem Maximum-Likelihood-Filter (MLH) erzielt werden. Vorteil des Bayes Filter ist, dass das Integral der Wahrscheinlichkeitsdichte bestimmt wird und so maximale Ausreißer nicht so stark ins Gewicht fallen wie bei der MLH-Methode, bei der das bestimmende Maß die Wahrscheinlichkeitsdichte ist.



Abbildung 47: NDVI inkl. vektorisierter Vegetationsmaske

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit QGIS

5.4 Schwierigkeiten

In diesem Abschnitt folgt die Nennung einiger Probleme, welche während der Passpunktmessung und der Orientierung der Bilder auftraten.

- Die größte Schwierigkeit der Auswertung stellten die unterschiedlichen Referenzkoordinatensysteme für UAV- und ALS-Passpunkte dar:

Dieser Fehler wurde erst bemerkt, als Höhendifferenzen zwischen den UAV-Passpunkten und dem ALS-Modell gerechnet wurden. Bei der UAV-Auswertung waren die Abweichungen anfangs nicht offensichtlich sichtbar. A priori wurden Standardabweichungen für die Passpunkte mit 2cm für die Lage und 3cm für die Höhe vorgegeben. Die Kameraparameter wurden bei der Ausgleichung mitgeschätzt. Das Ergebnis war ein völlig deformierter Block.

Abbildung 48 zeigt ein solches Differenzmodell von UAV- und ALS-DOM. Die Bildränder sind gut zu erkennen. Die Skalierung geht von blau (∞ bis +1m) bis rot (-1m bis ∞). Grund für die Modelldeformationen waren die, mittels GPS, falsch gemessenen UAV-Passpunkte. Diese stimmten mit dem ALS-System nicht überein und waren auch in sich nicht homogen. Im Zuge der Ausgleichung mussten daher die Kamera-Kalibrierungsparameter angepasst werden, sodass die a priori vorgegebenen Genauigkeitsangaben erfüllt wurden. Das Ergebnis war ein völlig deformiertes DOM.

- Die UAV-Auswertung mit dem *Application Master* (AM) erwies sich als nicht praxistauglich. Sind im Projekt keine IMU-Daten vorhanden, dann können mit AM nur über Umwege Bilder relativ orientiert werden. Das bedeutet, dass die äußeren Orientierungsparameter, welche zuvor mit *Agisoft* bestimmt wurden, als Näherungswerte importiert werden mussten. Etliche Einstellungen im AM mussten zudem manuell für die Auswertung von UAV-Luftbildern ohne IMU angepasst werden.
- Die Höhenverschiebung vom System Wt. Null zu Adria (156,68m) konnte in AM nicht direkt eingegeben werden. Ein Umweg über die Eingabe einer zusätzlichen Geoidundulation war hier erfolgreich.

Anmerkung: Trimble bietet zusätzlich zum AM den UAV Application Master an, der speziell für UAV-Daten konzipiert wurde. Der Hersteller verspricht einen einfacheren Workflow bei der Bearbeitung von UAV-Daten. In der aktuellen Version (6.1) können u.a. die IMU-Aufzeichnungen des Fluggeräts Falcon-8 direkt importiert werden.

- *Agisoft*, welches den einfachsten Workflow aller getesteten Programme besaß, akzeptierte zur Georeferenzierung des Bildverbands nur Vollpasspunkte (Lage+Höhe). Es konnten daher keine reinen Lagepasspunkte hinzugefügt werden. Dies wäre jedoch im konkreten Fall der Deponie Rautenweg wichtig gewesen, da etliche Vollpasspunkte eine falsche Höhenbestimmung besaßen und daher nur mehr als Lagepasspunkte herangezogen werden konnten.

- Ein weiterer Nachteil von *Agisoft* war, dass keine Genauigkeiten für Verknüpfungspunkte berechnet werden konnten. Lediglich die Residuen an den Passpunkten wurden ausgegeben.

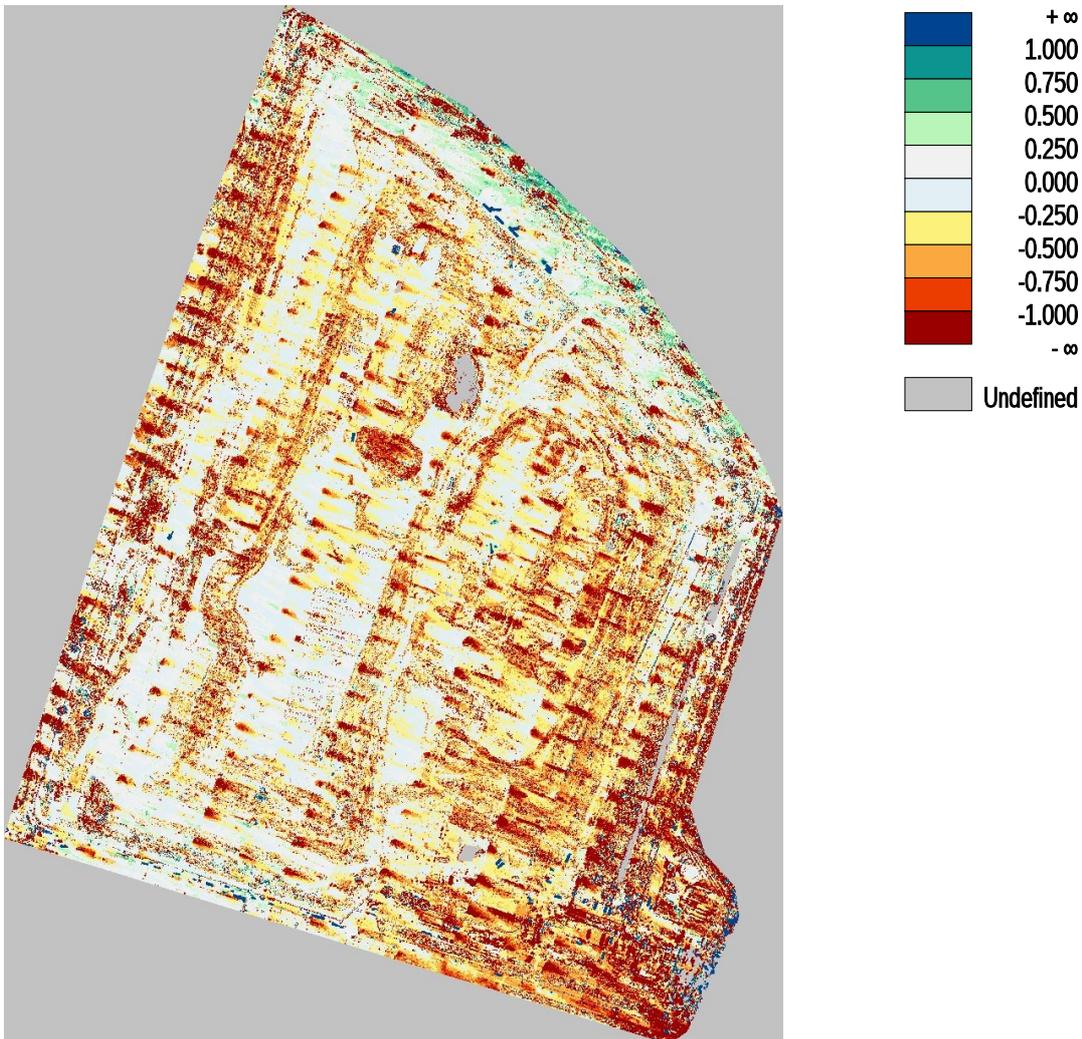


Abbildung 48: Streifendifferenzen mit Modelldeformationen
Einheiten in [m]

Quelle: Eigene Grafik, erstellt in OPALS

6 Analysen

Ein wesentliches Projektziel war es, zu untersuchen ob und in welchen Bereichen Differenzen zwischen den beiden DHMen aus ALS- und UAV-Daten bestanden. Als Referenzmodell diente das aus den ALS-Daten abgeleitete DGM. Zusätzlich wurden Differenzen an den GPS Kontrollpunkten ermittelt. Zur Abschätzung und Interpretation der Volumendifferenzen sind hier nochmals die wesentlichen Größen des Abrechnungsgebietes (zum Zeitpunkt Oktober 2013) zusammengefasst:

- Abrechnungsfläche: 513.970 m² (vgl. Abschnitt 4.5)
- Durchschnittliche Aufschüttung pro Jahr: 200.000 m³
- Vegetationsfreie Fläche: 47 %, Fläche mit Bewuchs: 53%

Die Analyse wurde schrittweise durchgeführt:

- Zuerst wurden nur in den vegetationsfreien Gebieten Höhendifferenzen berechnet, da davon auszugehen war, dass hier die Modelle die beste Messgenauigkeit lieferten.
- Daraus konnte ein systematischer Höhenversatz abgeleitet werden.
- Im Anschluss daran wurden die Differenzen in den bewachsenen Gebieten analysiert.

Im Folgenden Abschnitt werden wiederholt Ergebnisse von Differenzen zwischen zweier Höhenraster (engl. heights grids) analysiert und beschrieben. Um Abtrag und Aufschüttung der Differenzvolumina richtig interpretieren zu können, wurde stets ALS minus UAV (ALS vs. UAV) gerechnet. Die Ergebnisse wurden in Form von Differenzmodellen mit Farbkodierung aufbereitet. Zur Bestimmung von mittleren Differenzen und den resultierenden Standardabweichungen wurden zusätzlich Histogramme der Differenzmodelle berechnet. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die verwendeten Abzukürzen in den Histogrammen:

#Used	Gesamtanzahl verwendetet Rasterpunkte
Min	Minimale Differenz [m]
Max	Maximale Differenz [m]
Mean	Mittelwert aller Differenzen [m]
Median	Median oder Zentralwert aller Differenzen [m]
Std	Standardabweichung aller Differenzen [m]
Sigma mad	Robuste Standardabweichung (ohne Ausreißer) [m]
RMS	Quadratisches Mittel aller Differenzen [m]

Tabelle 7: Erklärung der Histogramm-Kennwerte von *OPALS Histo*

Quelle: Eigene Tabelle

6.1 Vegetationsfreie Flächen

Um einen möglichen systematischen Fehler eruieren zu können, wurden zu Beginn nur Differenzen in vegetationsfreien Flächen analysiert, da hier die erwarteten Fehler am geringsten schienen. Als Vegetationsmaske, zur Unterscheidung für jede Rasterzelle zwischen Flächen mit und ohne Vegetation, wurde hierfür die berechnete NDVI-Klassifizierung mit zwei Klassen verwendet (vgl. Abschnitt 5.3.1).

6.1.1 ALS vs. UAV

Höhendifferenzen in glatten und vegetationsfreien Bereichen wurden auf zwei Arten ermittelt:

- In einem ersten Schritt (1.) wurden Höhendifferenzen nur in kleinen Testfeldern betrachtet (Innerhalb der Abrechnungsgrenze inkl. umlaufenden Straßen).
- In einem zweiten Schritt (2.) wurden die Höhendifferenzen im gesamten Abrechnungsgebiet berechnet (exkl. umlaufenden Straßen).

Zunächst wurden Testfelder in ebenen vegetationsfreien Gebieten festgelegt. Insgesamt wurden hierfür siebzehn 10x10m große Quadrate (rot), sowie acht 2x2m große Quadrate (gelb) quer über die Deponie und auf den umlaufenden Straßen festgelegt.

Die Testflächen sind in der Abbildung 49 dargestellt.

Innerhalb dieser Testfelder wurden nun Höhendifferenzen der interpolierten Rasterhöhen berechnet (ALS vs. UAV). Die Histogramm-Kennwerte sind in Tabelle 8 dargestellt:

Kennwert	Diff. Gesamt	Diff. -0.033 bis 0.167
# Used:	8033	6833
Min:	-4,098	-0,033
Max:	1,138	0,167
Mean:	0,067	0,062
Median:	0,065	0,063
Std:	0,115	0,044
Sigma_mad:	0,066	0,05
RMS:	0,133	0,076

Tabelle 8: Histogramm-Kennwerte ALS – UAV-Differenzen in den Testfeldern

Quelle: Eigene Tabelle

In der obenstehenden Tabelle sind in Spalte *Diff. Gesamt* die Werte für alle Differenzen angegeben. Da die Standardabweichung sehr viel größer als der Mittelwert war, wurden in einem zweiten Schritt all jene Differenzen berücksichtigt, die betragsmäßig 10cm symmetrisch zum Mittelwert verteilt lagen (Spalte *Diff. -0.033 bis 0.167*). So konnten Ausreißer eliminiert werden. Im Mittel lagen die ALS Testflächen um 6,2 cm höher als die UAV-Flächen.



Abbildung 49: Testfelder: Rot 10x10m, Geld 2x2m

Quelle: Eigene Grafik, basierend auf MA41 Orthofoto

Unabhängig von diesem ersten Ergebnis der Testflächen (1.), wurde der Vergleich anschließend auf die gesamte Deponie ausgeweitet. Untersucht wurden wiederum Höhendifferenzen zwischen den berechneten DOMen aus ALS- und UAV-Daten. Es wurden dabei nur jene Rasterzellen in der Berechnung berücksichtigt, die folgende Kriterien erfüllten:

- Zelle liegt in einem Bereich ohne Vegetation
- $\text{Sigma}0^{25}$ der ALS-DOM-Rasterinterpolation $< 1\text{cm}$
- Differenzen $|\text{ALS vs. UAV}|$ zwischen -0.05m und 0.15m

²⁵ Sigma0 ist ein Maß für die Rauigkeit. Es wird bei der Gitterinterpolation mit dem Programmpaket *OPALS Grid* mit der Methode „MovingPlanes“ berechnet und beschreibt, wie sehr die Abstände der berücksichtigten Punkte zur interpolierten Ebene streuen. Ein kleiner Wert bedeutet, dass die Punkte nahezu in einer Ebene liegen.

Dadurch konnte sichergestellt werden, dass nur Punkte von relativ ebenen Stellen für die Ermittlung eines möglichen systematischen Fehlers berücksichtigt wurden.

Abbildung 50 zeigt die berechneten Höhendifferenzen in glatten und vegetationsfreien Gebieten. Die Rasterweite betrug wieder 1m.

Legende

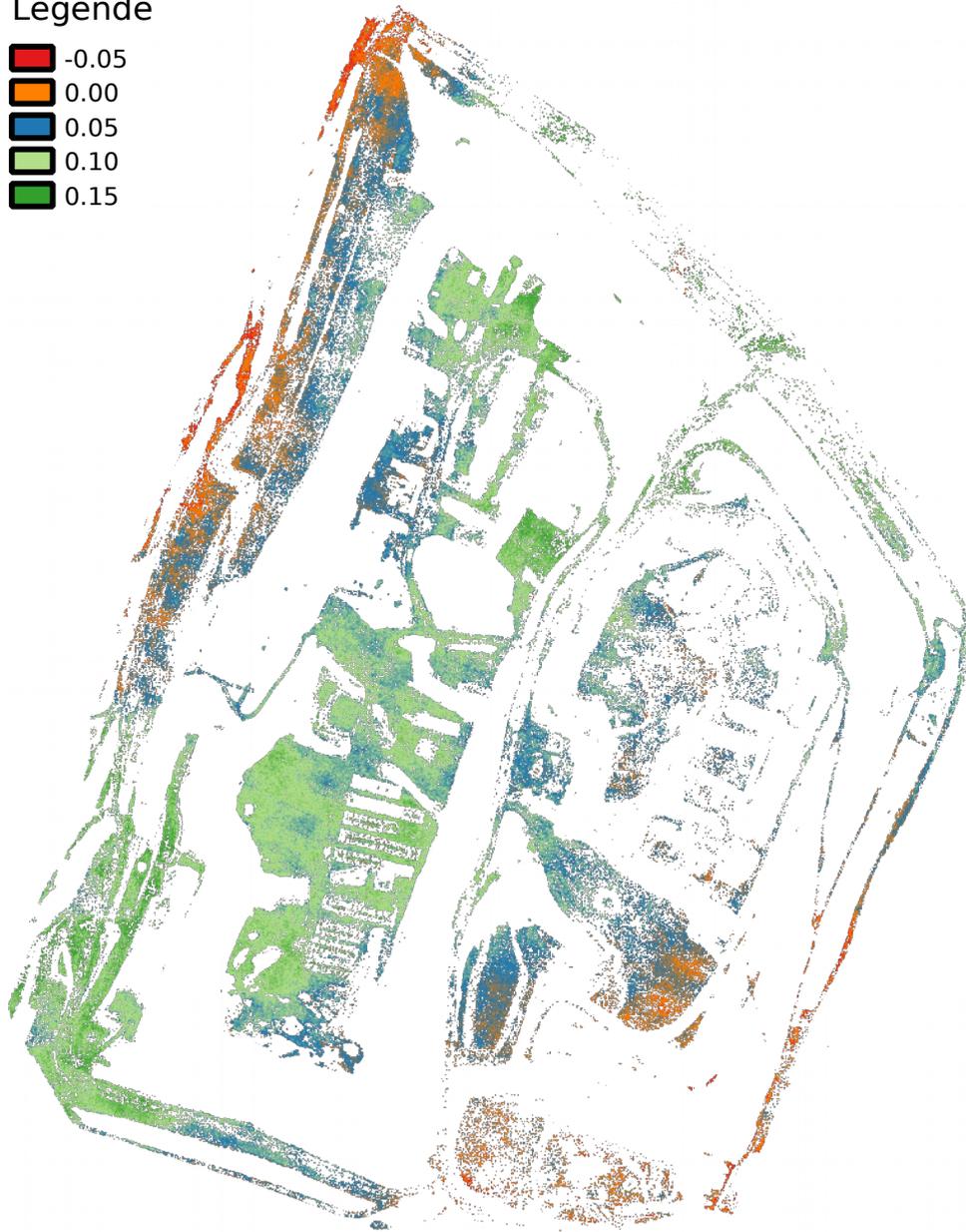


Abbildung 50: Höhendifferenzen in glatten vegetationsfreien Gebieten.

Einheiten in [m]

Hinweis: Differenzbild lässt auf Modelldeformation aufgrund eines Datumsdefekt schließen.

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

Abbildung 51 zeigt das Histogramm der berechneten Höhendifferenzen (2.). Auch hier waren die ALS-Höhen höher als jene des UAV-DOMs, im Mittel um 7,0cm. Zwei Spitzen bei 5cm und bei 10cm sind im Histogramm zu erkennen. Aus dem Ergebnis wurde abgeleitet, dass es einen mittleren systematischen Fehler von 7cm zw. den ALS- und UAV-DOMen, trotz einheitlichem Referenzsystems, gab.

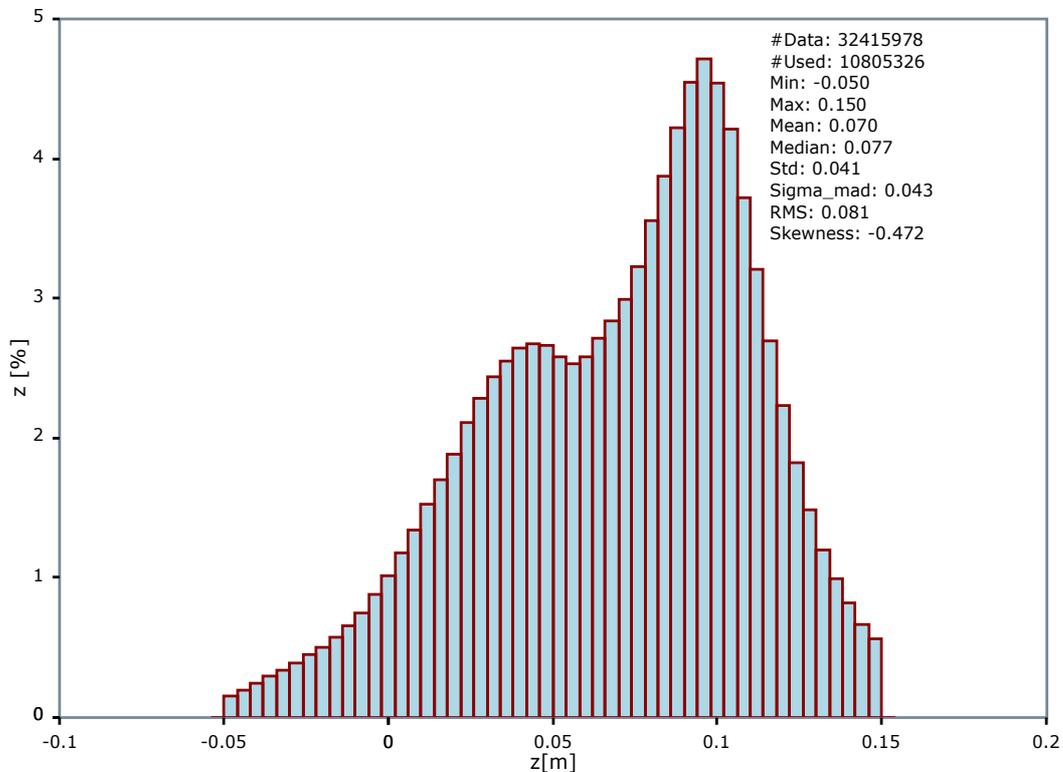


Abbildung 51: Höhendifferenzen ALS vs. UAV in glatten vegetationsfreien Gebieten

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

Der systematische Fehler entspricht einem Datumsdefekt. Ein kleiner Teil eines systematischen Fehlers könnte aus der schlechten Vermarkung der UAV-Passpunkte resultiert sein. Abbildung 52 zeigt exemplarisch die Vermarkung des UAV-Passpunkts 5. Es ist zu erkennen, dass der rote Messpunkt rund 2-3cm über der weißen Platte montiert wurde. Die übrigen Passpunkte wurden in einer ähnlichen Weise ausgeführt. Eine Anbringung der Verschiebungen würde in diesem Fall den systematischen Fehler allerdings erhöhen.



Abbildung 52: UAV-Passpunkt 5

Quelle: Eigenes Foto

6.1.2 Einschub – *SCOP++* vs. *OPALS* in glatten Bereichen

Diese beiden ersten Vergleiche (1.&2.) ergaben, dass die Interpolationsmethode zur Erzeugung eines DGMs einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis besitzt. An glatten vegetationsfreien Stellen lieferte das mit *SCOP++* und integriertem „Lidar DTM Default“ Filter abgeleitete DGM, ein um 2cm tieferes Ergebnis, als bei Berechnung mit *OPALS* „Moving Planes“ Interpolation. Der in *SCOP++* implementierte Filter ist eine hierarchische Filterstrategie zur Erzeugung von DGMen. Ein wichtiger Schritt ist dabei das Ausdünnen der Punktwolke (engl. Thinout), bei dem in einer Zelle (z.B. 5x5m) mit vielen DOM-Punkten nur ein einziger Stützpunkt ausgewählt wird.²⁶

Die UAV-Punktwolke mit einer Punktdichte >500 Punkte/m² wies auch im glatten vegetationsfreien Gelände eine hohe Streuung auf. Der „Lidar DTM Default“ Filter wählte in den Thinout-Schritten jeweils den zweitniedrigsten Wert innerhalb der eingestellten Rasterzelle aus. Dabei wurden häufig Ausreißer als Stützpunkte gewählt, die das DGM tendenziell nach unten zogen.

Für vegetationsfreie Bereiche wurde daher der „Lidar DTM Default“ Filter in *SCOP++* derart angepasst, dass in den Thinout-Schritten jeweils der mittlere Punkt der Zelle (und nicht wie bisher der zweitniedrigste Punkt) verwendet wurde. Die Einstellung Median wäre robuster, konnte in *SCOP++* aber nicht eingestellt werden.

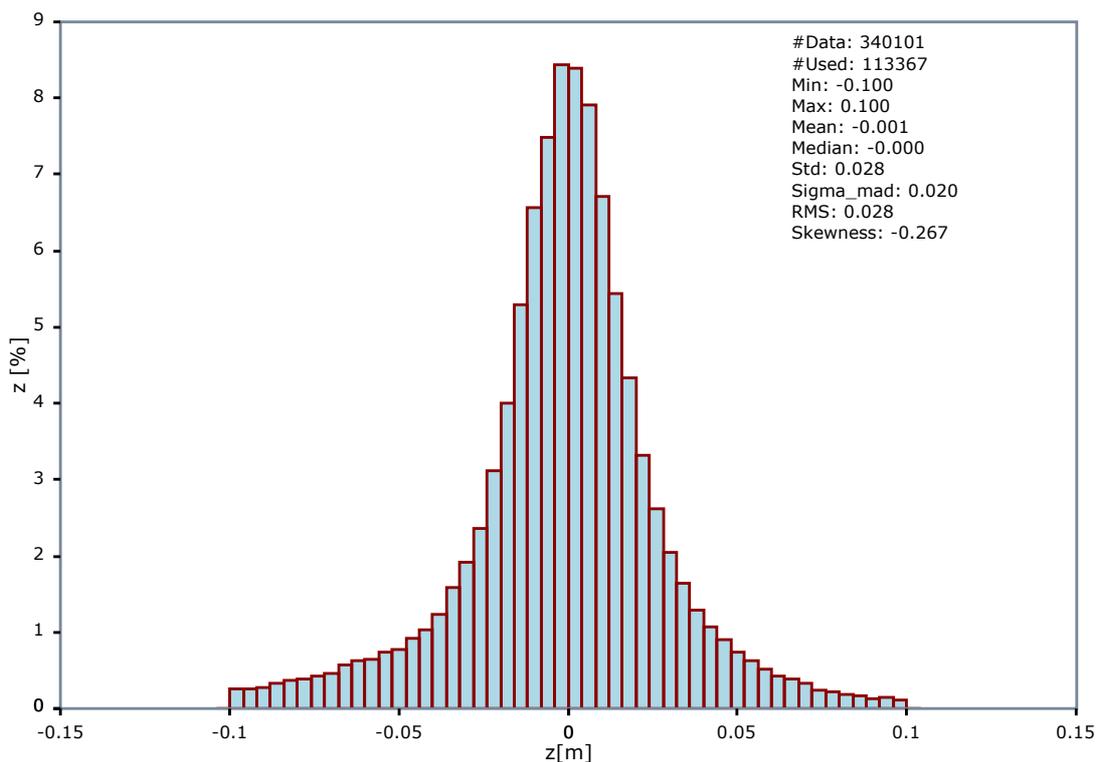


Abbildung 53: Histogramm der Höhendifferenzen zw. *SCOP++* mit angepasstem Thinout Filter und *OPALS* „Moving Planes“ Interpolation

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit *OPALS*

²⁶ Eine genaue Beschreibung dieser Strategie ist dem *SCOP++* Benutzerhandbuch zu entnehmen [IPF und Trimble 2011]

Abbildung 53 zeigt das Histogramm der beiden Geländemodelle in den glatten vegetationsfreien Flächen (1. *SCOP++* DGM mit angepasstem Thinout Filter, 2. *OPALS* DOM mit „Moving Planes“ Interpolation). Es ist zu erkennen, dass die zuvor festgestellte Verschiebung von 2 cm durch Anpassung des Filters eliminiert werden konnte. Die mittlere Differenz betrug nur mehr -1mm. Für vegetationsfreie Bereiche konnte das DGM also sowohl mit *SCOP++*, als auch mit *OPALS* abgeleitet werden.

6.1.3 GPS vs. ALS und GPS vs. UAV

Wie bereits in Kapitel 4 erwähnt, wurden im Herbst 2015 Kontrollhöhen mittels GPS gemessen. Auf der folgenden Seite sind in Tabelle 9 die Höhendifferenzen zwischen GPS Kontrollhöhen und abgeleiteten UAV- und ALS-DGMen dargestellt.

Da die Kontrollmessung zwei Jahre nach den ALS- und UAV-Befliegungen stattfand, gab es an einigen Kontrollpunkten durch eine Veränderung der Geländesituation massive Höhendifferenzen. Es wurden daher alle Kontrollpunkte aus der weiteren Berechnung entfernt, die mehr als 10cm Abweichung zu ihrem Niveau von 2013 besaßen. Bei acht Punkten wurden wesentliche Veränderungen festgestellt, diese wurden entfernt. Die mittleren Differenzen an den Kontrollpunkten in Bereichen ohne Vegetation ergaben:

- **GPS vs. UAV-DTM :** **1cm**
- **GPS vs. ALS-DTM:** **6cm**

Pkt.Nr.	GPS			ALS OPALS MP		ALS Scop DTM LD		UAV Opals DSM MP	
	y[m]	x[m]	H[m]	H[m]	dH[m]	H[m]	dH[m]	H[m]	dH[m]
4008	11002.69	346956.03	29.41	29.55	0.14	29.54	0.13	29.44	0.04
4009	10972.10	346989.84	29.98	30.04	0.06	30.04	0.06	29.94	-0.04
4010	10961.46	347023.08	30.32	30.39	0.07	30.38	0.06	30.29	-0.03
4011	11008.32	347086.48	30.51	30.60	0.09	30.59	0.08	30.50	-0.01
4012	11036.93	347131.28	31.61	31.70	0.09	31.69	0.09	31.62	0.01
4013	11047.95	347219.31	31.64	31.68	0.04	31.67	0.03	31.61	-0.03
4021	11163.75	347234.89	28.47	28.56	0.09	28.56	0.09	28.40	-0.07
4022	11137.04	347233.54	28.59	28.68	0.09	28.67	0.08	28.57	-0.02
4023	11132.95	347197.43	28.05	28.13	0.08	28.12	0.07	28.03	-0.02
4024	11142.42	347151.92	27.01	27.04	0.03	27.03	0.01	26.91	-0.11
4025	11150.75	347148.14	26.65	26.72	0.07	26.71	0.06	26.63	-0.01
4026	11136.70	347114.64	26.45	26.50	0.05	26.49	0.04	26.39	-0.06
4027	11123.10	347056.59	24.75	24.78	0.03	24.77	0.02	24.69	-0.06
4028	11113.91	347014.88	23.82	23.77	-0.04	23.77	-0.05	23.68	-0.14
4040	11326.58	347063.08	39.11	39.03	-0.08	39.14	0.03	39.08	-0.03
4044	11343.60	347030.56	36.58	36.70	0.12	36.69	0.11	36.63	0.05
4045	11372.37	347093.35	36.62	36.72	0.10	36.71	0.09	36.67	0.05
4046	11381.14	347110.98	36.67	36.76	0.09	36.76	0.08	36.69	0.02
4047	11385.13	347156.81	36.71	36.81	0.11	36.81	0.10	36.70	0.00
4050	11387.45	347094.81	33.72	33.81	0.08	33.80	0.08	33.77	0.05
4051	11378.47	347043.90	26.80	26.86	0.06	26.84	0.04	26.77	-0.03
4052	11371.17	346988.19	21.12	21.18	0.06	21.18	0.06	21.18	0.06
4056	11367.79	346930.60	16.47	16.54	0.08	16.53	0.06	16.55	0.08
4057	11354.32	346879.48	11.85	11.90	0.05	11.88	0.03	11.99	0.14
4060	11344.49	346835.85	10.71	10.66	-0.05	10.66	-0.05	10.67	-0.04
4074	11017.49	347169.11	31.43	31.59	0.15	31.58	0.15	31.50	0.07
				Std	0.05	Std	0.05	Std	0.06
				Median	0.07	Median	0.06	Median	-0.01
				Mittelwert	0.06	Mittelwert	0.06	Mittelwert	-0.01

Tabelle 9: Höhendifferenzen zwischen GPS-Kontrollhöhen und ALS, sowie zwischen GPS-Kontrollhöhen und UAV im Bereich von vegetationsfreien Flächen

Quelle: Eigene Tabelle

6.2 Flächen mit Vegetation

Da der Vergleich zwischen ALS und UAV für vegetationsfreie Flächen erfolgreich durchgeführt werden konnte, wurden im weiteren Projektverlauf auch die bewachsenen Flächen des Abrechnungsgebiets analysiert. Im folgenden Abschnitt werden die Höhendifferenzen in Bereichen mit Vegetation untersucht. Zuerst werden Gebiete mit lockerer/niedriger Vegetation, danach Bereichen mit dichter Vegetation betrachtet.

6.2.1 GPS vs. ALS und UAV in lockerer Vegetation

Die mittleren Höhendifferenzen, welche beim Vergleich von GPS vs. ALS und GPS vs. UAV in lockerer Vegetation ermittelt wurden (vgl. Abschnitt 4.6), sind in Tabelle 10 dargestellt.

Zur Ermittlung der DGMe wurde für beide Datensätze der *SCOP++* „Lidar DTM Default“ Filter gewählt. Zusätzlich wurden die Höhendifferenzen zwischen GPS-Kontrollmessung und dem DGM ermittelt, welches von der Stadt Wien (MA41) zur Verfügung gestellt wurde. Diese besitzen, wie in Tabelle 10, Spalte *MA41 DTM* ersichtlich ist, die selbe Streuung von 0.4m, wie jenes mittels *SCOP++* generierte ALS-DGM. Die Mittel- und Medianwerte hingegen sind etwas niedriger.

Median und Standardabweichung der ermittelten Differenzen sind Tabelle 10 zu entnehmen. Die mittleren Differenzen zu den GPS Kontrollhöhen betragen:

- **GPS vs. ALS SCOP++ mit „Lidar DTM Default (LD)“ : 26cm**
- **GPS vs. MA41 DTM: 22cm**
- **GPS vs. UAV SCOP++ mit „Lidar DTM Default (LD)“: 39cm**

Pkt.Nr.	GPS			ALS Scop DTMLD		MA41 DTM		UAV Scop DTMLD	
	y[m]	x[m]	H[m]	H[m]	dH[m]	H[m]	dH[m]	H[m]	dH[m]
4004	11044.04	346912.92	27.42	27.56	0.14	27.61	0.19	27.98	0.56
4006	11047.50	346930.68	29.50	29.17	-0.33	29.20	-0.30	29.08	-0.42
4014	11057.31	347221.24	33.81	34.12	0.31	34.04	0.23	34.12	0.31
4015	11068.30	347222.21	35.58	35.88	0.30	35.78	0.20	36.12	0.55
4016	11082.68	347217.79	35.42	35.71	0.29	35.69	0.27	36.07	0.66
4017	11101.21	347211.15	34.94	35.14	0.20	35.11	0.16	35.47	0.52
4018	11115.63	347204.63	34.61	35.05	0.44	35.03	0.42	35.37	0.76
4039	11324.81	347066.02	37.43	37.68	0.25	37.65	0.21	37.66	0.22
4041	11336.43	347055.91	36.63	36.88	0.25	36.86	0.23	36.92	0.29
4042	11343.85	347051.55	36.69	36.97	0.28	36.95	0.27	37.04	0.35
4048	11391.69	347141.97	37.63	37.81	0.18	37.81	0.19	37.99	0.36
4049	11413.57	347143.60	30.57	30.81	0.24	30.83	0.26	30.90	0.33
4059	11344.35	346879.11	14.62	15.03	0.41	15.05	0.43	15.08	0.45
4065	11246.82	347036.44	38.13	38.63	0.50	38.61	0.48	38.51	0.38
4068	10959.55	347166.20	28.81	29.09	0.28	29.08	0.27	29.06	0.25
4069	10950.39	347201.73	24.52	24.65	0.14	24.65	0.13	24.61	0.10
4070	10962.74	347199.89	26.32	26.12	-0.20	25.96	-0.36	26.20	-0.13
4071	10967.14	347199.09	26.57	27.34	0.77	27.26	0.69	27.37	0.80
4072	10971.59	347194.88	29.74	30.08	0.34	29.92	0.18	30.08	0.34
4073	10974.41	347194.14	31.65	32.00	0.35	31.85	0.20	32.68	1.03
				Std	0.23	Std	0.23	Std	0.32
				Median	0.28	Median	0.22	Median	0.36
				Mittelwert	0.26	Mittelwert	0.22	Mittelwert	0.39

Tabelle 10: Höhendifferenzen GPS vs. ALS vs. UAV in lockerer Vegetation

Quelle: Eigene Tabelle

6.2.2 GPS vs. ALS und GPS vs. UAV in dichter Vegetation

Analog zu 6.2.1 wurden GPS-Kontrollpunkte in Bereichen mit dichter und höherer Vegetation gemessen und mit den ALS- und UAV-DGMen verglichen (siehe Tabelle 11, Seite 83). Die berechneten mittleren Abweichung betragen:

- **GPS vs. ALS SCOP++ mit „Lidar DTM Default“:** **59 cm**
- **GPS vs. MA41 DGM:** **34cm**
- **GPS vs. UAV SCOP++ mit „Lidar DTM Default“:** **104 cm**

6.2.3 Auswirkung der Vegetation auf das Gesamtvolumen

Der NDVI-Wert gibt prinzipiell Auskunft über die „Vitalität“ einer Pflanze und nicht über die Höhe von Vegetation. Dennoch existiert, wie in Abbildung 54 gut erkennbar ist, eine gewisse Korrelation zwischen hohem NDVI und der Vegetationshöhe.

- In Abbildung 54 sind in x-Richtung der NDVI und in y-Richtung die Vegetationshöhe (m), berechnet aus ALS-DGM vs. UAV-DOM, aufgetragen.
- Die markanten vertikalen Maxima mit NDVI-Werten zwischen -0,1 und 0 stellen Störobjekte, wie Abfallballen und Aussichtsplattform auf dem Deponiegelände dar.

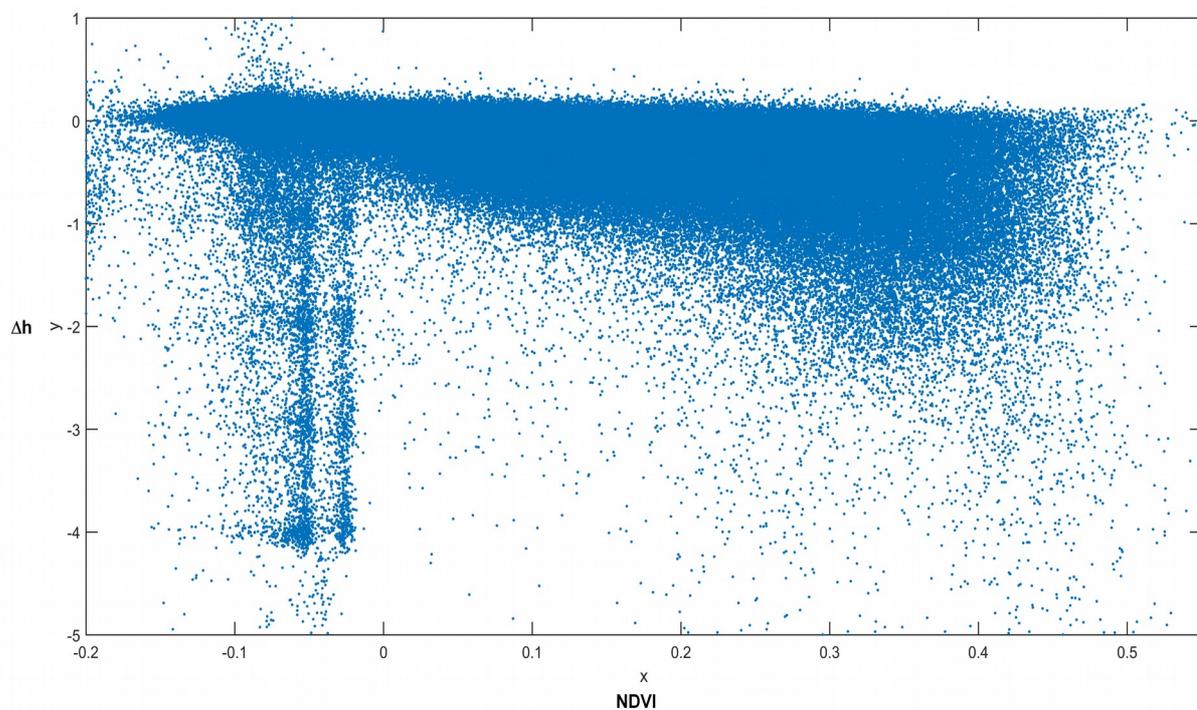


Abbildung 54: Korrelation zwischen NDVI und Vegetationshöhe
 x = NDVI, y= Vegetationshöhe ALS-DGM – UAV-DOM

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit Matlab

Zur Abschätzung der Auswirkung der Vegetation auf das Gesamtvolumen, kann daher folgende Rechnung, basierend auf den berechneten NDVI Werten und der Zuteilung in Vegetations-Klassen 1-2 (siehe Abschnitt 5.3.1), aufgestellt werden:

- | | | |
|--|----------------|------------------------|
| • Gesamte Abrechnungsfläche | $A =$ | 513.970 m ² |
| • GPS vs. ALS in lockerer/niederer Vegetation (Klasse 1) | $\Delta h_1 =$ | 26cm |
| ◦ Klasse 1 = 44,3% von A | $A_1 =$ | 227.174 m ² |
| • GPS vs. ALS in dichterem/hoher Vegetation (Klasse 2) | $\Delta h_2 =$ | 58cm |
| ◦ Klasse 2 = 11,7% von A | $A_2 =$ | 60.134 m ² |
-

Werden die ermittelten mittleren Fehler (Δh) mit den zugehörigen Flächen (A_1, A_2) multipliziert, ergibt sich ein Volumen der Vegetation von $V = 93.943 \text{ m}^3$. Dies entspricht beinahe der Hälfte des jährlichen Schüttvolumens (ca. $200.000 \text{ m}^3/\text{a}$). Die Differenzen zwischen den GPS Kontrollhöhen und dem von der MA41 übermittelten DGM sind etwas geringer. Der Filter für die DGM Generierung dürfte hier etwas stärker eingestellt worden sein. Es ist aber dennoch klar zu erkennen, dass auch dieses Modell in Bereichen von Vegetation um einige dm zu hoch liegt. Das Schüttvolumen wird demnach auch in Bereichen wo nicht geschüttet wird, durch den natürlichen Pflanzenwuchs wachsen.

Pkt.Nr.	GPS			ALS Scop DTM LD		MA41 DTM		UAV Scop DTM LD	
	y[m]	x[m]	H[m]	H[m]	dH[m]	H[m]	dH[m]	H[m]	dH[m]
4000	11067,37	346915,03	19,29	19,56	0,27	19,53	0,24	19,47	0,18
4001	11055,59	346896,37	22,73	22,87	0,15	22,87	0,14	24,91	2,18
4002	11049,73	346902,64	25,89	26,58	0,69	25,80	-0,09	27,25	1,37
4003	11046,20	346905,24	25,66	26,37	0,71	26,10	0,44	26,61	0,95
4005	11050,99	346916,32	25,03	25,37	0,34	25,25	0,23	25,85	0,82
4019	11146,51	347266,52	28,43	29,01	0,58	28,97	0,54	29,86	1,43
4020	11163,11	347256,96	28,27	28,99	0,72	28,86	0,60	29,06	0,80
4043	11347,97	347049,63	36,14	36,55	0,41	36,66	0,51	36,87	0,73
4053	11359,45	346991,90	25,40	25,93	0,52	25,64	0,24	26,33	0,92
4055	11356,64	346947,97	19,64	20,51	0,88	20,23	0,59	20,62	0,99
4058	11347,93	346877,03	12,60	13,82	1,23	12,93	0,34	13,63	1,04
				Std	0,30	Std	0,22	Std	0,50
				Median	0,58	Median	0,34	Median	0,95
				Mittelwert	0,59	Mittelwert	0,34	Mittelwert	1,04

Tabelle 11: Höhendifferenzen GPS vs. ALS vs. UAV in dichter Vegetation >50cm

Quelle: Eigene Tabelle

6.3 DGM Berechnung aus UAV-Daten im Testfeld TG150

Abschnitt 6.1 hat gezeigt, dass aus den UAV-Daten in vegetationsfreien Gebieten sehr genaue DGMe erstellt werden können. Problematischer ist dies in Bereichen mit Vegetation, hier sind die Höhendifferenzen zwischen ALS und UAV sehr groß (vgl. 6.2). Ein Lösungsansatz für diese Problematik, welcher den Vegetationsindex NDVI nutzt, wird in folgendem Abschnitt erläutert:

Um die rechen- und zeitaufwendigen Modellvergleiche, aufgrund der hohen Punktdichte der UAV-Daten, zu beschleunigen, wurde ein 150m x 150m großes Testgebiet (im folgenden als TG150 bezeichnet) ausgewählt. Dieses entspricht in etwa 5% der gesamten Abrechnungsfläche.

Abbildung 55 zeigt die Position des gewählten Bereichs. Das Testgebiet TG150 enthält neben einer steilen Böschung weite Flächen ohne Vegetation, mit lockerer Vegetation, sowie mit dichter Vegetation. Es sind daher alle Oberflächenbeschaffenheiten vorhanden, die das Deponiegebiet repräsentieren (Vegetationsklassen 0-2).



Abbildung 55: Übersicht Position Testgebiet 150

Legende:

- Blaue: Abrechnungsgrenzen
- Rot: Testgebiet TG150

Quelle: Eigene Grafik basierend auf MA41 Orthofoto

47% des Testgebiets sind vegetationsfrei. Die restliche Fläche weist sehr lockere bis dichtere Vegetationsbereiche auf. Abbildung 56 zeigt ein Orthofoto des Untersuchungsgebiets.



Abbildung 56: RGB Orthofoto, aus zusätzlichen Luftbildern des ALS Flugs, imTG150

Quelle: MA41 Orthofoto

Als Referenzfläche wurde wieder das mittels *SCOP++* ermittelte DGM gewählt. Abbildung 57 zeigt das ALS-DOM-Modell des Testgebiets. Abbildung 58 zeigt das mittels *SCOP++* abgeleitete DGM.



Abbildung 57: Schattierung ALS-DOM im TG150

Quelle: Eigene Grafik, visualisiert mit SCOP++

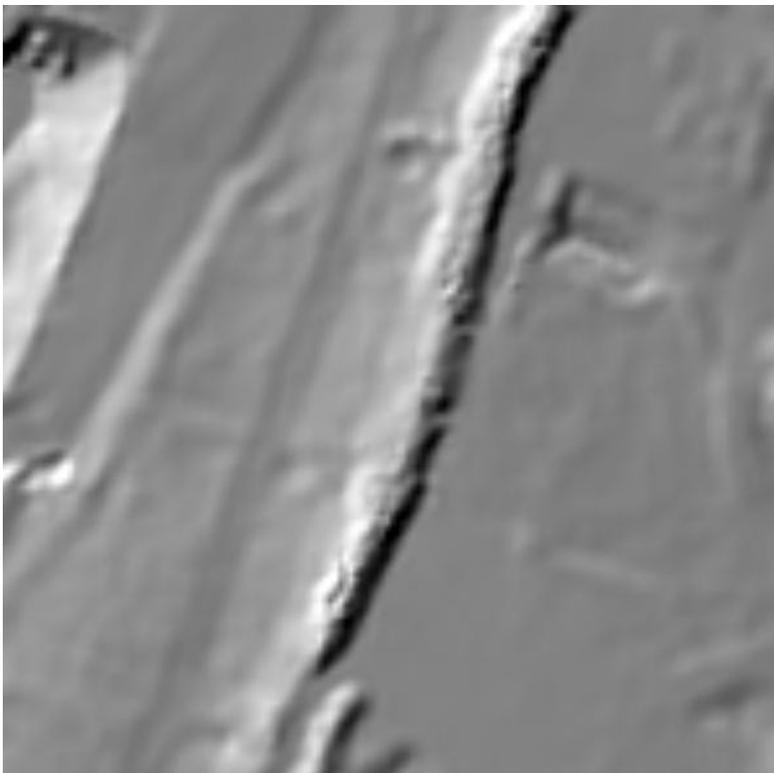


Abbildung 58: Schattierung ALS-DGM mit SCOP++ "Lidar DTM Default" Filter im TG 150

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit SCOP++

Als Grundlage zur Ableitung eines DGMs aus UAV-Daten diente das, mittels *SURE* berechnete, DOM. Abbildung 59 zeigt eine Schattierung der UAV-Punktwolke. Die Punktdichte beträgt ca. 550 Punkte/m².



Abbildung 59: Schattierung UAV-DOM im Testgebiet 150

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit *OPALS* – Visualisiert mit *SCOP++*

Im Folgenden wird der Vorschlag für eine Art „Kochrezept“ vorgestellt, welches die schrittweise Berechnung eines DGMs aus UAV-Luftbildern mit zusätzlichem Infrarot Kanal vorschlägt. Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 60 dargestellt:

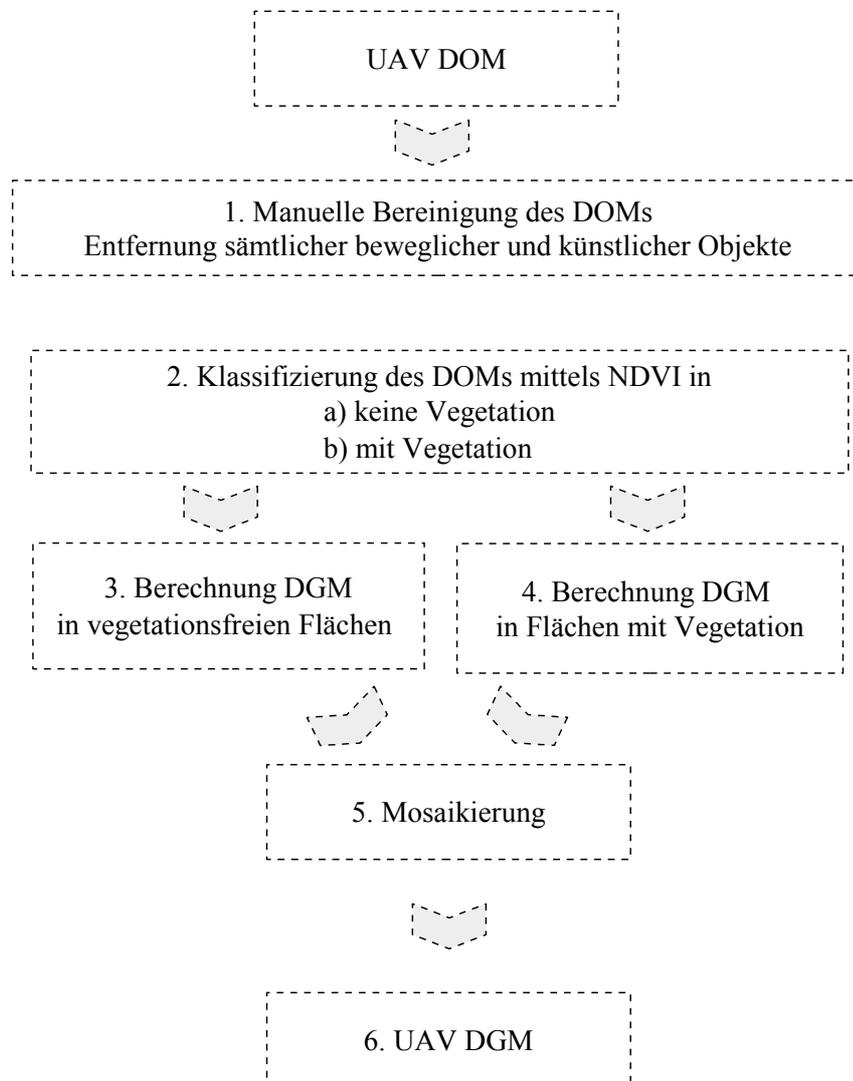


Abbildung 60: Kochrezept DGM aus UAV-Daten mittels NDVI

Quelle: Eigene Grafik

6.3.1 Manuelle Bereinigung des DOMs (TG150)

Im ersten Schritt sollte das DOM von beweglichen und künstlichen Objekten (z.B. Abfallmulden) be-reinigt werden. Dies kann automatisch oder manuell geschehen. Es bietet sich an, ein zuvor erstelltes Orthofoto als Layer unter die Punktwolke zu legen, um anschließend Störobjekte leichter entfernen zu können. Auch die Berechnung von Höhenschichtlinien kann hierbei nützlich sein. Auf Grund der hohen

Punktdichte können auch andere Parameter wie z.B. die z-Range (Max. – Min. einer Rasterzelle) zur Auffindung von kleineren Objekten verwendet werden. Abbildung 61 zeigt Höhengichtlinien von gelagerten Abfallballen, Abbildung 62 Abfallmulden, die auf der Deponie gelagert werden.

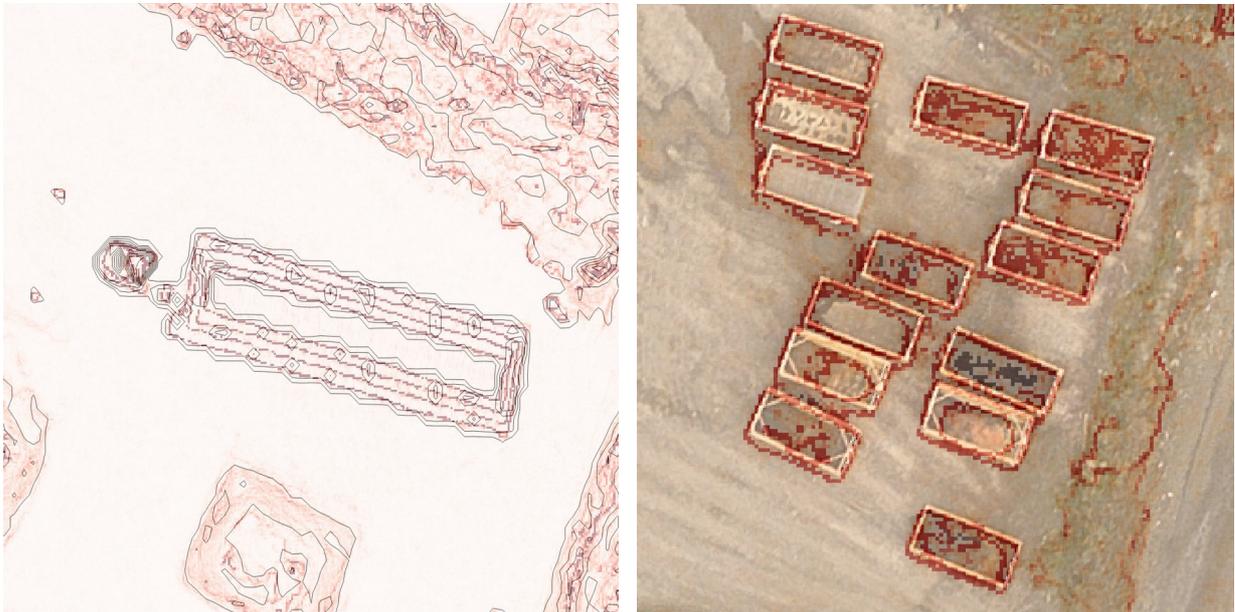


Abbildung 61: Höhengichtlinien von Müllballen im UAV-DOM (linkes Bild)

Abbildung 62: zRange von Abfallmulden im UAV-DOM (rechtes Bild)

Quelle: Eigene Grafik, basierend auf MA41 Orthofoto

6.3.2 Klassifizierung (TG150)

Um die Berechnung des DGMs zweistufig berechnen zu können, einmal mit und einmal ohne Vegetation, wurde das Testgebiet durch die Anwendung eines Bayes Filters in zwei Klassen unterteilt. Abbildung 63 zeigt das Ergebnis. Die schwarz dargestellten Flächen sind vegetationsfrei, die weißen Flächen enthalten Vegetation.



Abbildung 63: Testgebiet TG150: Vegetationsmaske mit 2 Klassen (Klasse 0/schwarz: keine Vegetation – Klasse 1/weiß: Vegetation)

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

6.3.3 Berechnung des UAV-DGM in vegetationsfreien Flächen (TG150)

Das Programm *SCOP++* mit integriertem „LIDAR DTM Default“ Filter ist, aufgrund des hierarchischen Ansatzes, in der Lage Störobjekte automatisch aus dem DOM herauszufiltern. Um das Ergebnis in den glatten Bereichen zu verbessern, wurde versucht den Filter so anzupassen, dass in den letzten beiden Thinout Schritten jeweils das Mittel, und nicht der tiefste Punkt, gewählt wird. Abbildung 64 zeigt das Histogramm der Differenzen zwischen den beiden berechneten ALS- und UAV-DGMen. Es sind zwei Spitzen bei etwa 4 cm und 9 cm zu erkennen. Abbildung 65 zeigt die dazugehörigen Höhendifferenzen. Die Intervalle für die farbliche Darstellung wurden folgendermaßen eingestellt:

- Rot 3-5cm,
- Blau 8-10cm.

Die Ursache der beiden Spitzen könnte beim Matching liegen. Der rote Bereich besteht größten Teils aus planierter Erde. Die blauen Bereiche bestehen überwiegend aus hellgrauem Split.

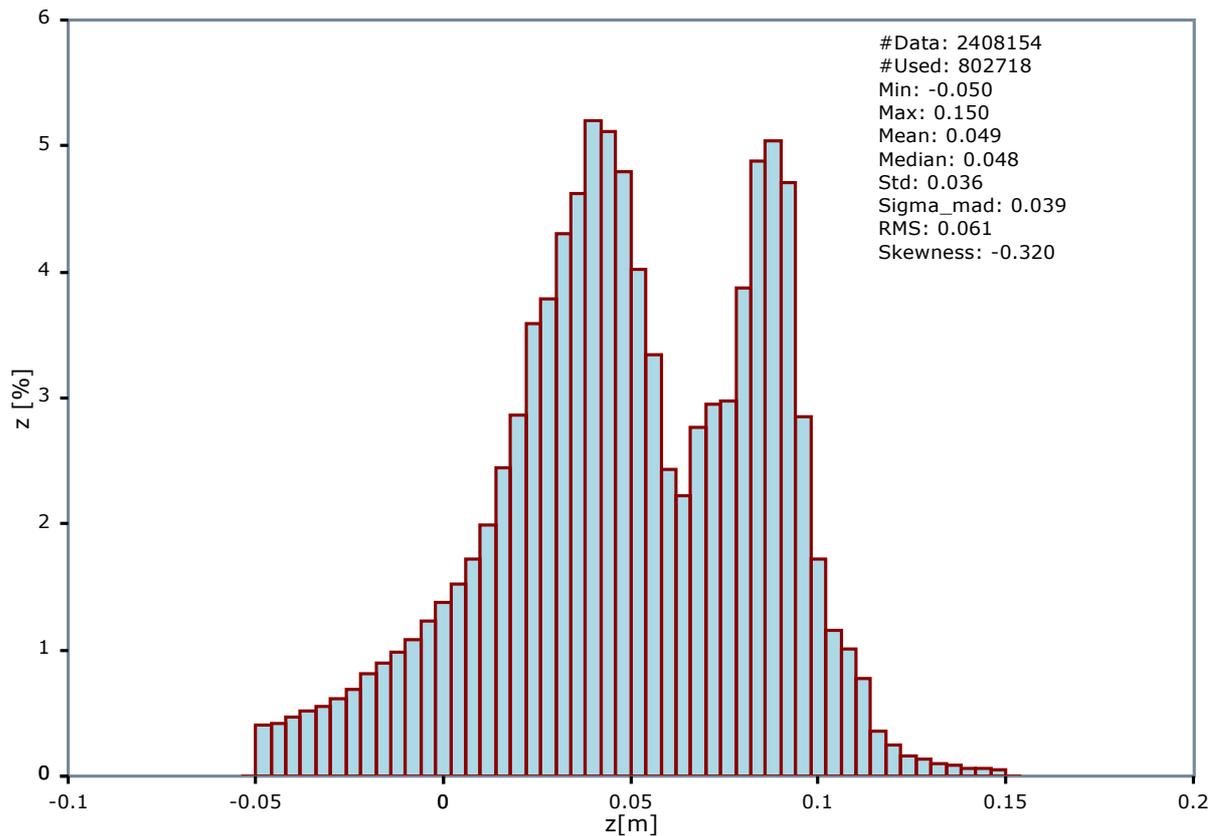


Abbildung 64: Histogramm der Höhendifferenzen zwischen den ALS- und UAV DGMen in vegetationsfreien Gebieten des Testgebiets TG150

Quelle: Eigene Grafik , erstellt mit OPALS

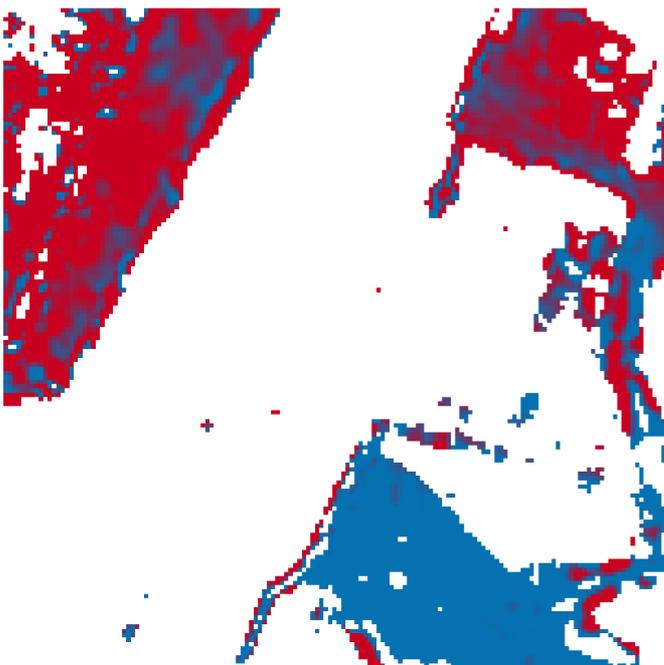


Abbildung 65: Höhendifferenzen zwischen den ALS- und UAV DGMen in vegetationsfreien Gebieten.

Legende:

Rot 4-6cm und Blau 7-9cm

Quelle: Eigene Grafik , erstellt mit OPALS

Im Mittel betragen die Differenzen 4,9cm, die wiederum einen systematischen Datumsdefekt zuzuschreiben sind. Abbildung 66 zeigt die Höhendifferenzen ALS vs. UAV nach der Anbringung des systematischen Fehlers von 4,9cm. Eine systematische Verkippung der beiden Modelle wurde an dieser Stelle nicht bestimmt und angebracht.

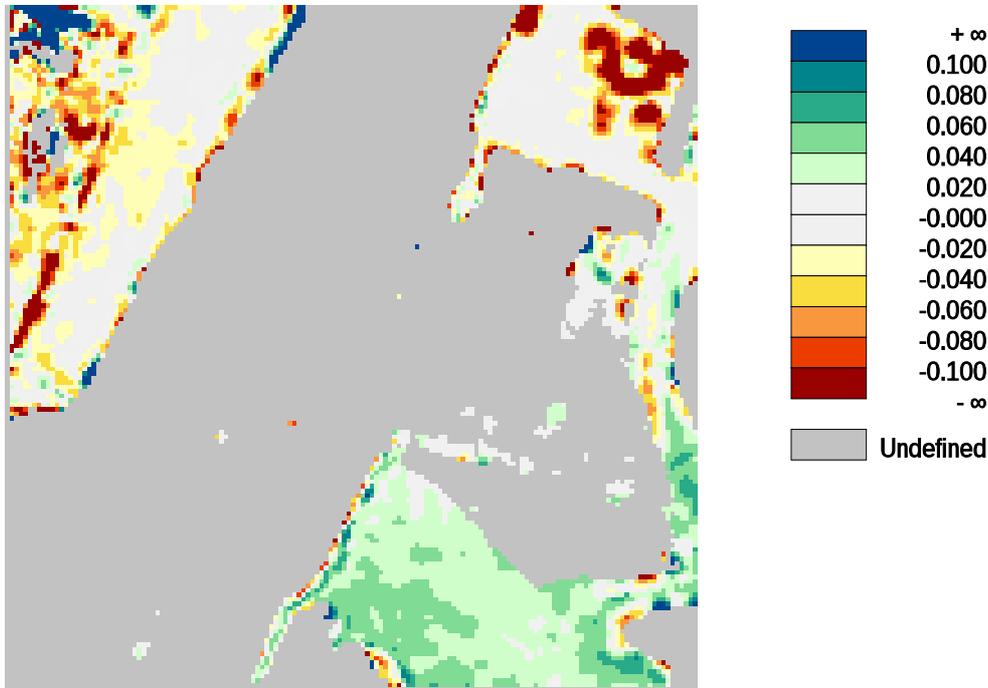


Abbildung 66: Höhendifferenzen ALS vs. UAV (Datumskorrigiert durch Höhenversatz)

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

Die mittleren Differenzen zwischen den ALS- und UAV-DGMen der vegetationsfreien Bereiche des Testgebiets wurden mit +0,3cm bestimmt (siehe Tabelle 12). Die robuste Standardabweichung betrug 4,3cm.

Kennwerte

# Used:	8593
Min:	-0,723
Max:	2,901
Mean:	0,003
Median:	-0,002
Std:	0,131
Sigma_mad:	0,043
RMS:	0,131

Tabelle 12: Höhendifferenzen ALS vs. UAV in vegetationsfreien Gebieten

Quelle: Eigene Tabelle

6.3.4 Berechnung des UAV-DGMs in Flächen mit Vegetation (TG150)

Weder mit *SCOP++*, noch mit den Standard-Interpolationsmethoden von *OPALS*, konnten in Bereichen mit Vegetation zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Im Folgenden wird daher eine alternative Methode beschrieben, die auf der Annahme beruht, dass aufgrund der hohen Punktdichte des UAV-Modells, stellenweise Punkte in Vegetationslücken am Boden gematcht werden können. (Zum Vergleich: ALS-Punktdichte = 13 Pkt/m², UAV-Punktdichte = 567 Pkt./m²):

- Für jede Rasterzelle (1x1m) wird mit Hilfe der Interpolationsmethode „Moving Planes“ eine Ebene mit 4.000 Nachbarpunkten in einem Suchradius von 1,5m berechnet.
- Danach wird für jeden Punkt innerhalb dieses Suchradius' der Lotabstand zur ausgeglichenen Ebene berechnet. Die Ebene wird dann um den größten (negativen) Lotabstand nach unten verschoben.
- Diese Methode wird im Folgenden als Reduktion mit „dZmin“ beschrieben.

Abbildung 67 zeigt einen Profilschnitt durch ein 10x10m großes Testgebiet (TG10) mit lockerer Vegetation (Vegetation siehe Abb. 27, Bild 6). Die gelben Punkte zeigen die UAV-Punktswolke, die blauen Punkte stellen die, mit „dZmin“ erzeugten, UAV-DGM Punkte dar. Die Darstellung wurde mittels *Fugro Viewer*²⁷ erzeugt. Es ist dabei gut zu erkennen, dass das ermittelte DGM nach der Filterung durch die tiefsten Punkte verläuft.

Abbildung 68 zeigt einen Schnitt durch das TG150, ebenfalls mit „dZmin“ Reduktion.



Abbildung 67: Profilschnitt durch Testgebiet TG10

Profildicke = 1m

- Gelb: UAV-Punktswolke
- Cyan: UAV-DTM mit „dZmin“ (1m Raster)

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit *FugroViewer*

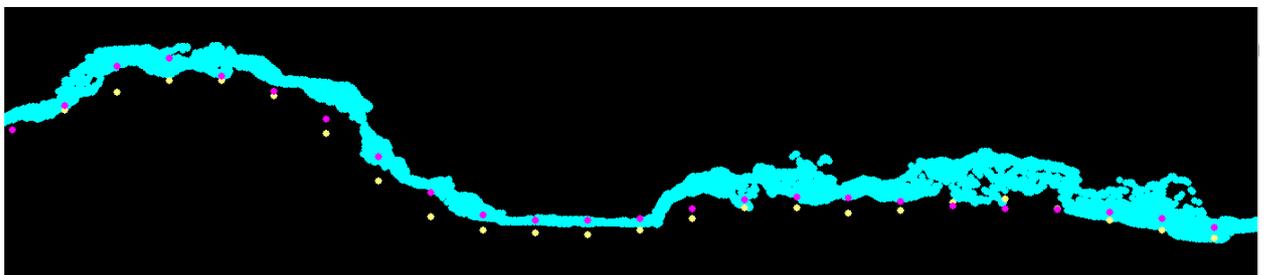


Abbildung 68: Profilschnitt durch Testgebiet TG150

Profildicke = 1m

- Cyan: UAV-Punktswolke
- Gelb: UAV-DTM mit „dZmin“ (1m Raster)
- Lila: ALS-DGM mit *SCOP++* „Lidar DTM Default“

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit *FugroViewer*

²⁷ Fugro Viewer. Programm zur Betrachtung großer Punktwolken. <http://www.fugroviewer.com/>

Die „dZmin“ Reduktion wurde auf das gesamte Testgebiet TG150 angewendet. Abbildung 69 zeigt die Höhendifferenzen zwischen ALS-DGM und UAV-DSM berechnet mit *OPALS* „Moving Planes“ in bewachsenen Gebieten, noch vor der Filterung. Abbildung 70 zeigt das Ergebnis nach der Filterung und „dZmin“ Reduktion. Es ist zu erkennen, dass in den bewachsenen Flächen die Differenzen deutlich reduziert wurden. Tabelle 13 zeigt die Histogramm-Kennwerte vor und nach der „dZmin“ Reduktion.

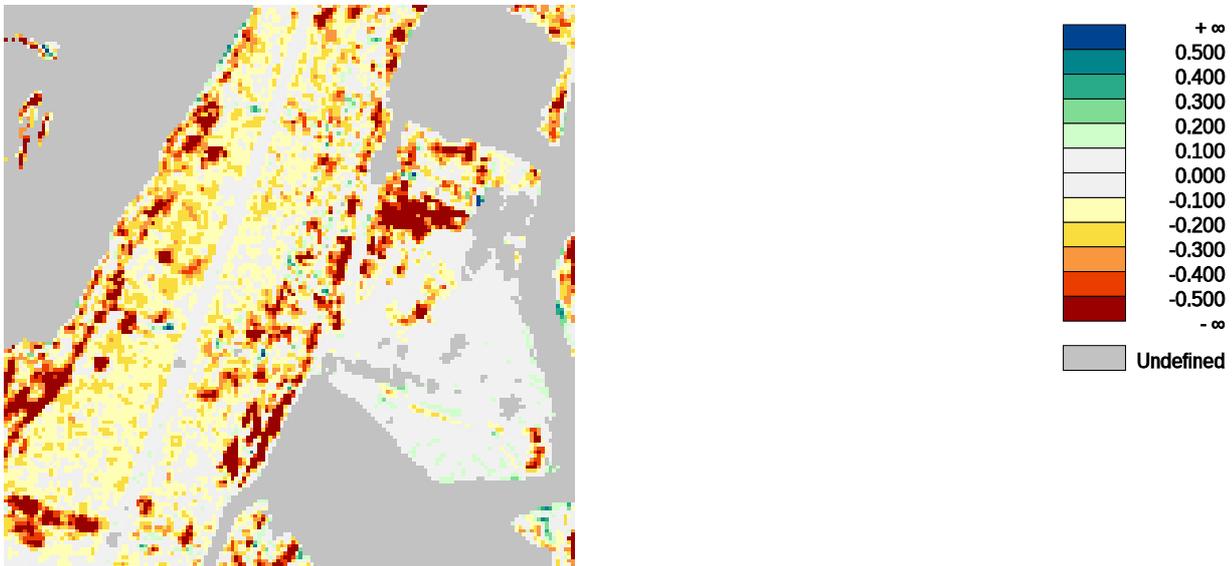


Abbildung 69: Höhendifferenzen ALS-DGM vs. UAV-DOM mit *OPALS* MP vor der „dZmin“ Reduktion

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit *OPALS*

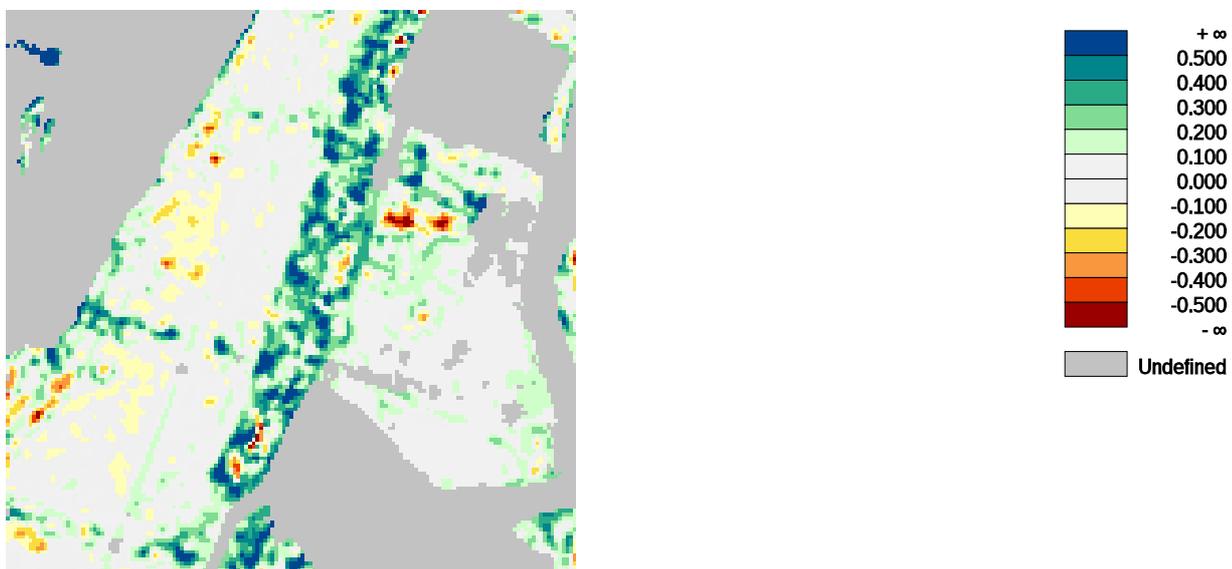


Abbildung 70: Höhendifferenzen ALS-DGM vs. UAV-DGM mit „dZmin“ Reduktion

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit *OPALS*

Anmerkung: Bei der Reduktion wurde für jede Rasterzelle der Punkt, der den größten Abstand zur Ebene des DOM aufweist, ausgewählt. Da mit dieser Methode oftmals auch Ausreißer durch z.B. Mat-

chingfehler gewählt werden würde sich als robustere Variante auch z.B. ein 5% Quantil eignen. Da aber bei stichprobenartigen Kontrollen bei den GPS Punkten das Ergebnis mit der „dZMin“ Reduktion zufriedenstellende Ergebnisse liefert wurden keine weiteren Methoden getestet.

Kennwerte

	Spalte 1	Spalte 1
# Used:	14039	14039
Min:	-0,899	-2,195
Max:	1,479	1,005
Mean:	0,082	-0,086
Median:	0,058	-0,012
Std:	0,182	0,221
Sigma_mad:	0,131	0,139
RMS:	0,199	0,237

Tabelle 13: Histogramm-Kennwerte der Höhendifferenzen von ALS vs. UAV in vegetationsfreien Gebieten
 - Spalte 1: Vor der Reduktion mit „dZMin“
 - Spalte 2: Nach der Reduktion mit „dZMin“

Quelle: Eigene Tabelle

6.3.5 Mosaikierung der UAV-DGMe (TG150)

Mit Hilfe von zwei unterschiedlichen Methoden wurden die DGMe in vegetationsfreien und in Gebieten mit Vegetation berechnet. Abbildung 71 zeigt die Mosaikierung (die Zusammenfügung) der einzelnen DGMe zu einem finalen UAV-DGM.

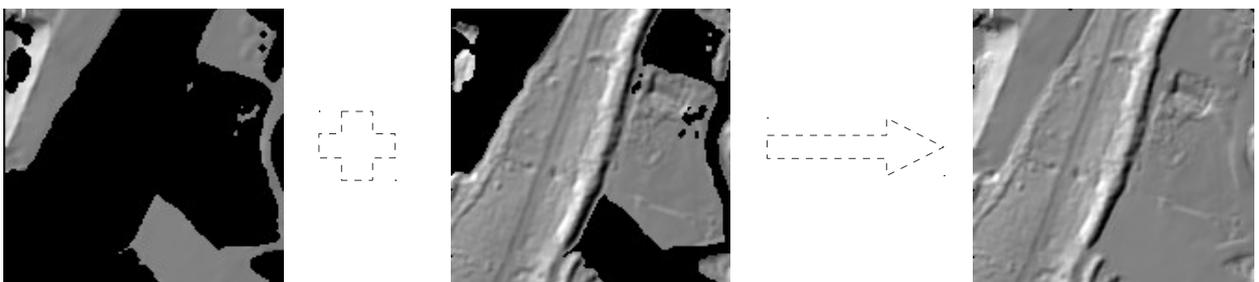


Abbildung 71: Mosaikierung des UAV-DGMe

Quelle: Eigene Grafiken, erstellt mit OPALS

Entlang der Grenzen der Vegetationsklassen entstanden un stetige Sprünge. Es empfiehlt sich, die Übergänge zu glätten. Die Vegetationsmaske, welche zuvor mittels NDVI bestimmt wurde, besaß eine Gitterweite von 10cm. Über diese Maske wurde ein OPALS „Statfilter“ gelegt. Die Parameter wurden dabei folgendermaßen festgelegt:

- kernelShape Circle
- kernelSize 10 m

Die Ergebnismaske wurde anschließend noch auf 1m Gitterweite interpoliert. Abbildung 72 zeigt einen Ausschnitt der Maske vor und nach Aufbringung des „Statfilters“.

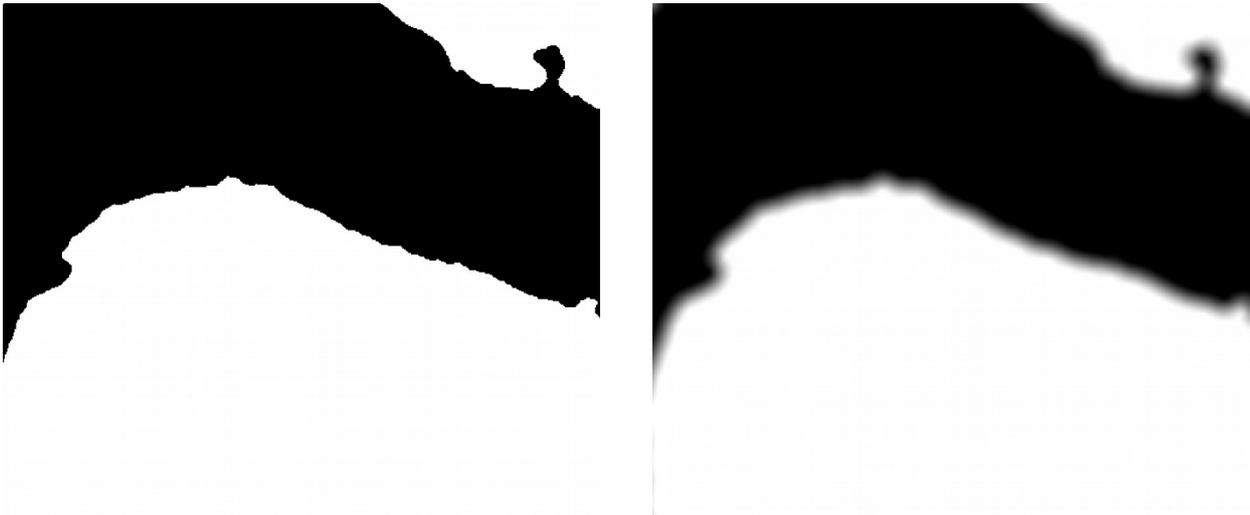


Abbildung 72: Vegetationsmaske mit OPALS „Statfilter“
Links: Vegetationsmaske ohne „Statfilter“, Rechts: mit „Statfilter“

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

Abbildung 73 zeigt das Differenzmodell zwischen ALS-DGM und finalem UAV-DGM des Testgebiets TG150.

Das dazugehörige Histogramm der Differenzen zum ALS-DGM ist in Abbildung 74 zu sehen.

Im Mittel ist das UAV-Modell nun um 8,2 cm tiefer gelagert, als das ALS-DGM.

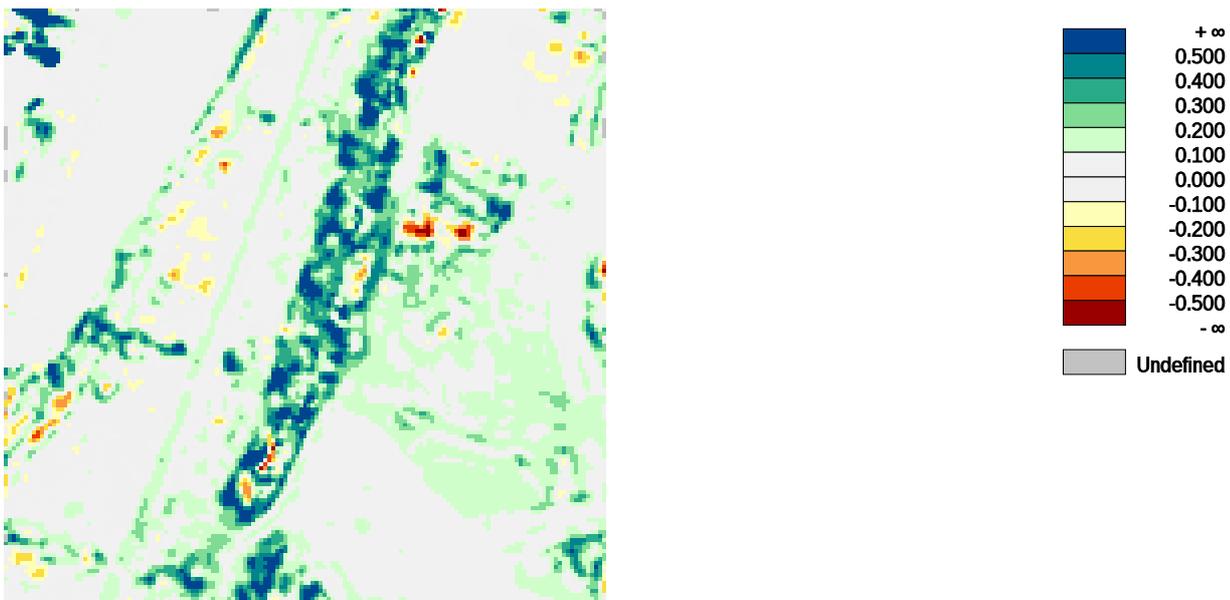


Abbildung 73: Finales UAV-DGM im Testgebiet TG150

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

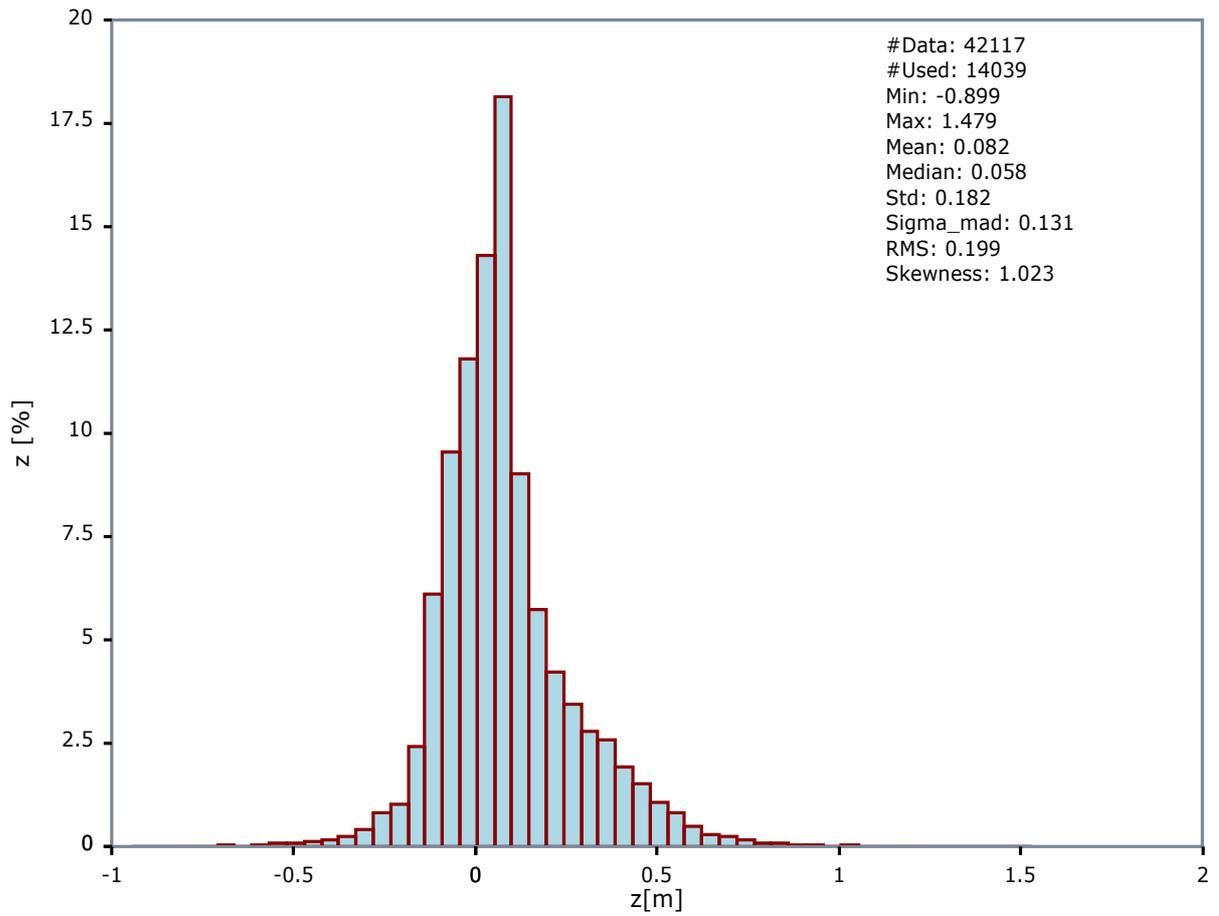


Abbildung 74: Histogramm ALS-DGM vs. finalem UAV-DGM (TG150)
Maximum ist asymmetrisch und leicht von Null verschoben

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

7 Endergebnis

Die in Abschnitt 6.3 vorgestellte, schrittweise Berechnung eines DGMs aus UAV-Daten wurde in einem letzten Schritt auf das gesamte Abrechnungsgebiet angewendet.

Es wurde lediglich auf Schritt 1 (Bereinigung) verzichtet, da die Störobjekte im Verhältnis zum Gesamtvolumen keinen bedeuteten Einfluss auf das Ergebnis gehabt hätten.

Der Median der Differenz zwischen ALS-DGM vs. UAV-DGM wurde mit 1,8 cm bestimmt (siehe Abb. 75).

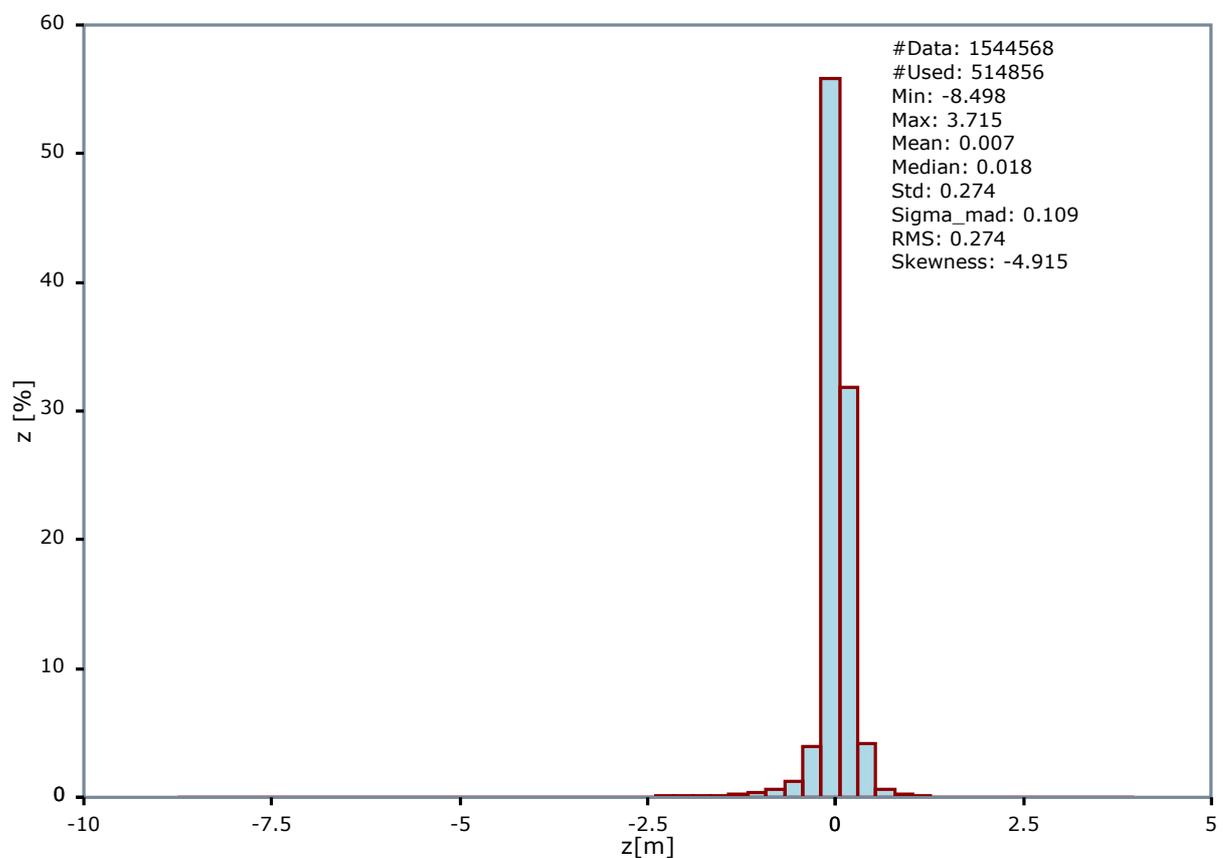


Abbildung 75: Histogramm Differenzen ALS-DGM vs. UAV-DGM der Deponie

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

Abbildung 76 auf der nächsten Seite zeigt das Differenzmodell der DGMs.

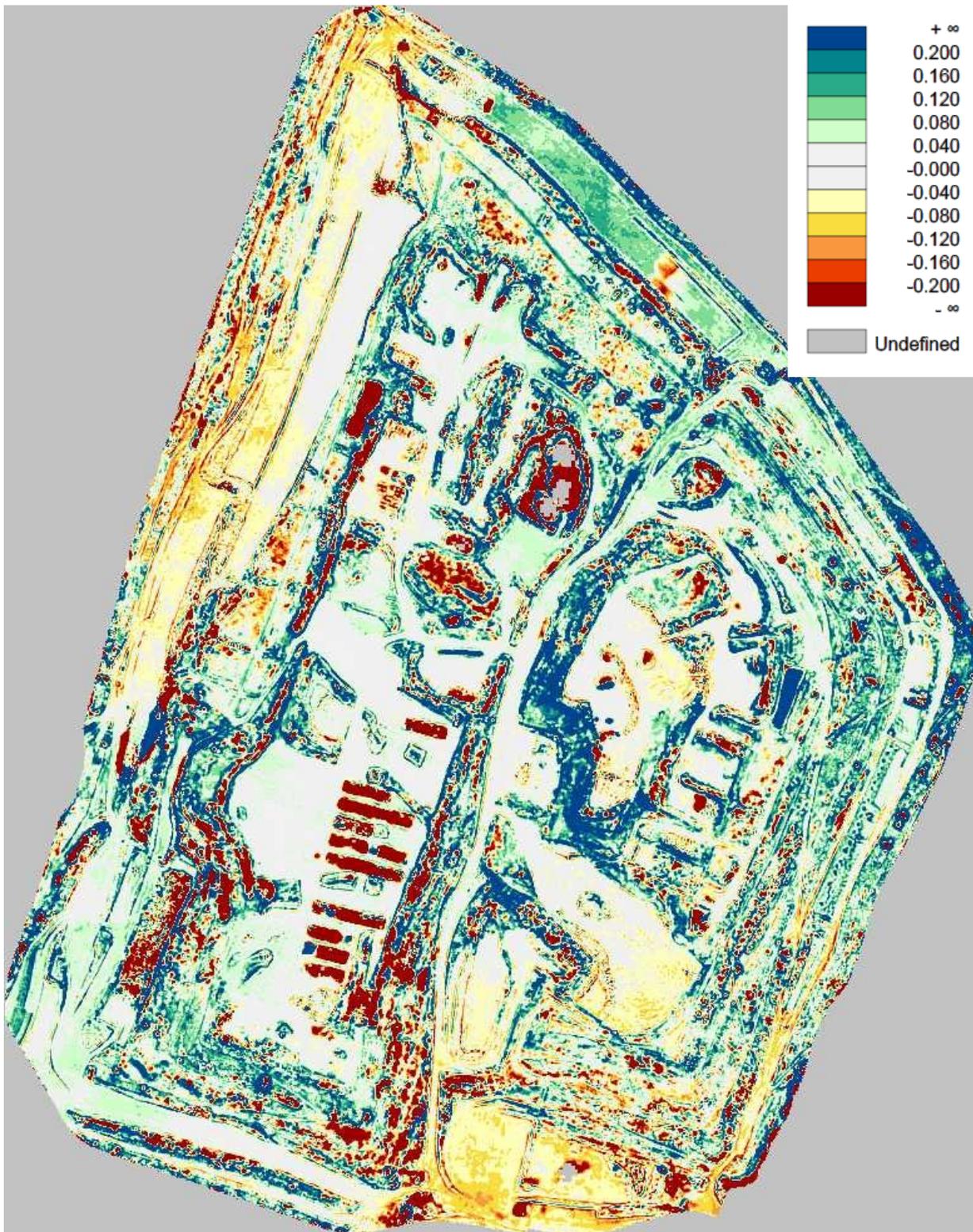


Abbildung 76: Finales Differenzmodell ALS-DGM vs. UAV-DGM der Deponie
Differenzen in vegetationsfreien Bereichen sind minimal. Die großen Differenzen gelagerter beweglicher Störobjekte wie z.B. bei den Müllballen könnten durch manuelle Bereinigung des UAV-DGMs ebenfalls noch eliminiert werden.

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

Es ist gut zu erkennen, dass in lockerer Vegetation die „dZMin“ Reduktion gut funktioniert hat. Bei einzelnen Bäumen oder Buschgruppen, wo am Boden innerhalb des Suchradius' von 1.5m keine Punkte gematcht wurden, sind die UAV-DGM Punkte erwartungsgemäß zu hoch. Abbildung 77 zeigt einen Ausschnitt des finalen Differenzmodells mit einer Baumgruppe, bei dem die Höhendifferenzen nach der Reduktion immer noch im Größenbereich von 1-3m liegen.

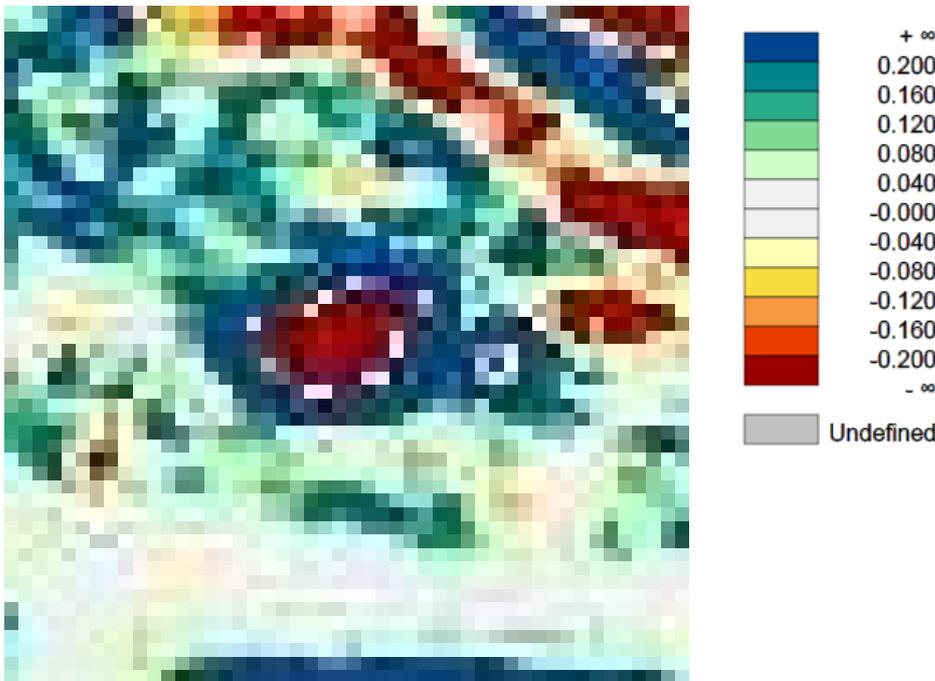


Abbildung 77: Ausschnitt Baumgruppe mit großer Höhendifferenz

Quelle: Eigene Grafik, erstellt mit OPALS

Daraus lässt sich erkennen, dass die „dZMin“ Reduktion nur dann funktionieren kann, wenn lockere Vegetation vorherrscht, bei der einzelne UAV-Punkt am Boden bestimmt werden können.

7.1 GPS vs. finalelem UAV-DGM

Abschließend wurden an den GPS-Kontrollpunkten wieder die Höhendifferenzen zum finalen UAV-DGM bestimmt:

- In lockerer, niedriger Vegetation konnte das Ergebnis deutlich verbessert werden. Die mittleren Differenzen betragen hier nur mehr 16cm (vor der „dZMin“ Reduktion 39cm).
- In dichter und hoher Vegetation konnte das Ergebnis nur geringfügig - von 104cm auf 88cm verbessert werden.

Pkt.Nr.	GPS			ALS ScopDTM LD		MA41 DTM		UAV ScopDTM LD		UAV Final DTM	
	y[m]	x[m]	H[m]	H[m]	dH[m]	H[m]	dH[m]	H[m]	dH[m]	H[m]	dH[m]
4000	11067,37	346915,03	19,29	19,56	0,27	19,53	0,24	19,47	0,18	19,34	0,05
4001	11055,59	346896,37	22,73	22,87	0,15	22,87	0,14	24,91	2,18	24,57	1,85
4002	11049,73	346902,64	25,89	26,58	0,69	25,80	-0,09	27,25	1,37	27,09	1,20
4003	11046,20	346905,24	25,66	26,37	0,71	26,10	0,44	26,61	0,95	26,35	0,69
4005	11050,99	346916,32	25,03	25,37	0,34	25,25	0,23	25,85	0,82	25,61	0,58
4019	11146,51	347266,52	28,43	29,01	0,58	28,97	0,54	29,86	1,43	29,66	1,24
4020	11163,11	347256,96	28,27	28,99	0,72	28,86	0,60	29,06	0,80	29,11	0,84
4043	11347,97	347049,63	36,14	36,55	0,41	36,66	0,51	36,87	0,73	36,86	0,72
4053	11359,45	346991,90	25,40	25,93	0,52	25,64	0,24	26,33	0,92	26,06	0,65
4055	11356,64	346947,97	19,64	20,51	0,88	20,23	0,59	20,62	0,99	20,43	0,79
4058	11347,93	346877,03	12,60	13,82	1,23	12,93	0,34	13,63	1,04	13,71	1,11
				Std	0,30	Std	0,22	Std	0,50	Std	0,46
				Median	0,58	Median	0,34	Median	0,95	Median	0,79
				Mittelwert	0,59	Mittelwert	0,34	Mittelwert	1,04	Mittelwert	0,88

Tabelle 15: Höhendifferenzen GPS vs. finalem UAV in dichter Vegetation

Quelle: Eigene Tabelle

8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Diplomarbeit wurde gezeigt, dass die Ableitung von digitalen Geländemodellen mittels UAV-Photogrammetrie, in vielen Bereichen, vergleichbare Ergebnisse wie das Airborne Laserscanning liefern kann. Die wichtigsten Erkenntnisse und Entwicklungschancen sind nachfolgend kurz zusammengefasst:

- In vegetationsfreien Gebieten betrug der mittlere Fehler zwischen UAV-DGM und den GPS Kontrollhöhen nur 1cm bei einer Standardabweichung von $\sigma=6\text{cm}$.
- Die ermittelte Bildmessgenauigkeit lag bei automatischen Verknüpfungspunkten bei 0,5 Pixel, dies entspricht einer Genauigkeit von 2cm.
- Es wurde ein systematischer Fehler von 7cm zwischen den UAV- und ALS-DHMen festgestellt, die genaue Ursache dafür konnte nicht eruiert werden. Es ist anzunehmen, dass die unterschiedlichen Koordinatensystem von UAV-Passpunkten und ALS-Passflächen einen wesentlichen Beitrag zu diesem systematischen Versatz lieferten.
- Es wurde gezeigt, dass die Klassifizierung mittels NDVI sehr gut zur Unterscheidung von vegetationsfreien und bewachsenen Flächen verwendet werden kann. Eine darauf basierende separate Berechnung des Geländemodells nach Vegetationsklassen, lieferte das genaueste Ergebnis im Vergleich zum ALS-DGM.
- Eine Methode zur Reduktion des Fehlers durch Oberflächenbewuchs in Gebieten mit lockerer Vegetation wurde vorgestellt und getestet. (vgl. 6.3.4). Diese brachte eine deutliche Verbesserung der Höhengenaugkeiten in Bereichen mit lockerer Vegetation, zeigte jedoch kaum einen Effekt bei dicht bewachsenen Zonen (wie z.B. Baumgruppen). Die Entwicklung einer automatischen Segmentierung mit Hilfe von NDVI und Mustererkennung für größere und dichte Pflanzengruppen, könnte hier eine Verbesserung bringen. Entlang der Segmentationsgrenzen könnte eine mittlere Vegetationshöhe über Profilschnitte abgeschätzt werden, um z.B. Baumgruppen über eine mittlere Höhe anschließend zu reduzieren.
- Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung des digitalen Geländemodells aus Luftbildern mit NDVI, wäre die Einführung einer Gewichtung der Punkte. So könnten z.B. Punkte in glatten Bereichen und mit niedrigem NDVI-Wert ein höheres Gewicht bekommen, als jene Punkte mit hohem NDVI und Rauigkeit, da die Wahrscheinlichkeit im ersten Fall höher ist dass der Punkt einen Bodenpunkt repräsentiert.
- Ein anderer Ansatz, der im Zuge der Arbeit entstand, wäre die Modellierung von lediglich solchen Bereichen, welche gegenüber dem Vorjahresmodell wesentlich verändert wurden. Unveränderte Bereiche könnten direkt vom Modell des Vorjahres übernommen werden. Der NDVI-Wert könnte auch hier sinnvoll eingesetzt werden, da durch einen Vergleich der aktuellen und Vorjahres-Werte leicht überprüft werden könnte, wo neue Aufschüttungen bzw. Abtragungen

stattgefunden haben. Erkennbar wäre, dies logischerweise durch eine Höhenveränderung, aber auch durch eine Änderung des NDVI-Werte (vorausgesetzt die Deponie wird bewachsen). Die Vorgehensweise könnte wie folgt aussehen:

↓ <i>Jahr x/ Jahr x+1</i> →	<i>Keine Vegetation</i>	<i>Vegetation</i>	<i>Bewegliches Objekt</i>
Keine Vegetation	Neue Modellierung wenn Differenz > 5cm ist	Modellübernahme vom Jahr x	Modellübernahme vom Jahr x
Vegetation	Und Differenz >5cm dann neue Modellierung	Modellübernahme vom Jahr x	Modellübernahme vom Jahr x

Laut Deponieleitung gibt es nur auf 10% der Fläche Veränderungen zum Vorjahr. Diese Veränderungen könnten sehr gut mittels UAV-Photogrammetrie erfasst werden da bei neuen Aufschüttungen keine Vegetation zu erwarten ist.

- Es konnte gezeigt werden, dass in dicht bewachsene Bereichen das verwendete ALS-System nicht bis zum Boden durchdringt. Zusätzliche Kontrollpunkte und eine eingehende Analyse des gesamten aufgezeichneten Wellenspektrums müsste weiterführend analysiert werden um die Grenzen der ALS-Durchdringungen bei Vegetation beschreiben zu können. Es wird empfohlen für zukünftige ALS-Befliegungen aufgrund der vorhandenen Vegetation Genauigkeitsangaben für die verschiedenen Bereiche anzugeben.
- Die Software *Agisoft Photoscan* besaß zwar, wie in den vorderen Kapiteln erwähnt, den einfachsten Workflow aller getesteten Programme zur Auswertung von UAV-Luftbildern, hatte jedoch Schwachstellen bei der Passpunktdefinition, da nur Vollpasspunkte eingegeben werden konnten. Innerhalb des Demonstrationsgebiets standen schlussendlich nur mehr sieben Vollpasspunkte zur Verfügung, die noch dazu nicht optimal verteilt waren. Daher wurde auf einen weiteren Vergleich der Ergebnisse aus *Photoscan* vs. ALS verzichtet. Aufgrund der Tatsache, dass *Photoscan* keine Genauigkeitsangaben zu gematchten Punkten ausgibt, wäre es zur Abschätzung von Genauigkeiten erforderlich zusätzlich zu den Passpunkten signalisierte Kontrollpunkte einzumessen.
- Einer der wesentlichsten Schlussfolgerungen aus der Diplomarbeit ist wohl dieser, dass bei multitemporalen Vergleichen von Höhenmodellen oder Vergleichen von verschiedenen Messmethoden in einer Epoche einer der wesentlichsten Faktoren die Schaffung eines einheitlichen Referenzkoordinatenrahmens darstellt. Bei Vergleichen von unterschiedlichen Messmethoden sollten auch passende Kontrollpunkte bzw. Kontrollflächen geschaffen werden, die für alle Messverfahren geeignet sind.
- Die Generierung von DGMen hängt sehr stark von den verwendeten Filtern ab. Abbildung 78 zeigt die Differenzen zwischen dem in dieser Arbeit ermittelte ALS-DGM mittels *SCOP++* und „Lidard DTM Default“ Filter und dem von der MA41 zur Verfügung gestellten DGM, das

ebenfalls aus den selben ALS Daten von der Firma Airborne Technologies im Auftrag der MA41 generiert wurde. Abgesehen von den Fehlern bedingt durch die Datumsverschiebung bedingt durch die neuen Passflächen und den nicht eliminierten Störobjekten ist gut zu erkennen dass im Bereich der Vegetation die Filtermethode eine wichtige Rolle spielt. Die 2D-Schattierungen der beiden DGMe sind in den Abbildungen 79-80 dargestellt.

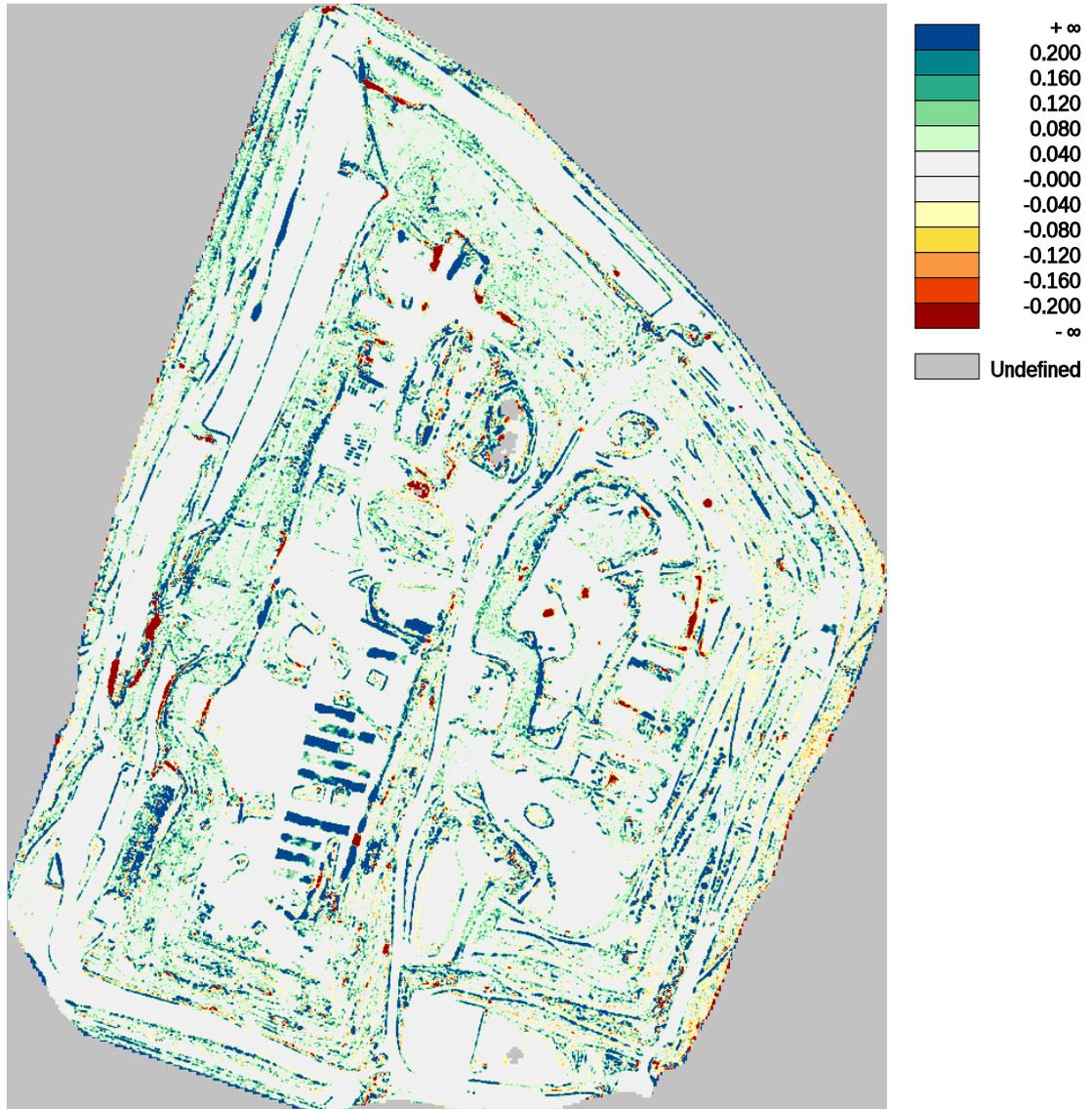


Abbildung 78: Höhendifferenzen ALS-SCOP++ LD DGM vs. ALS-MA41 DGM
Einheiten in [m]

Quelle: Eigene Graphik, erstellt mit OPALS

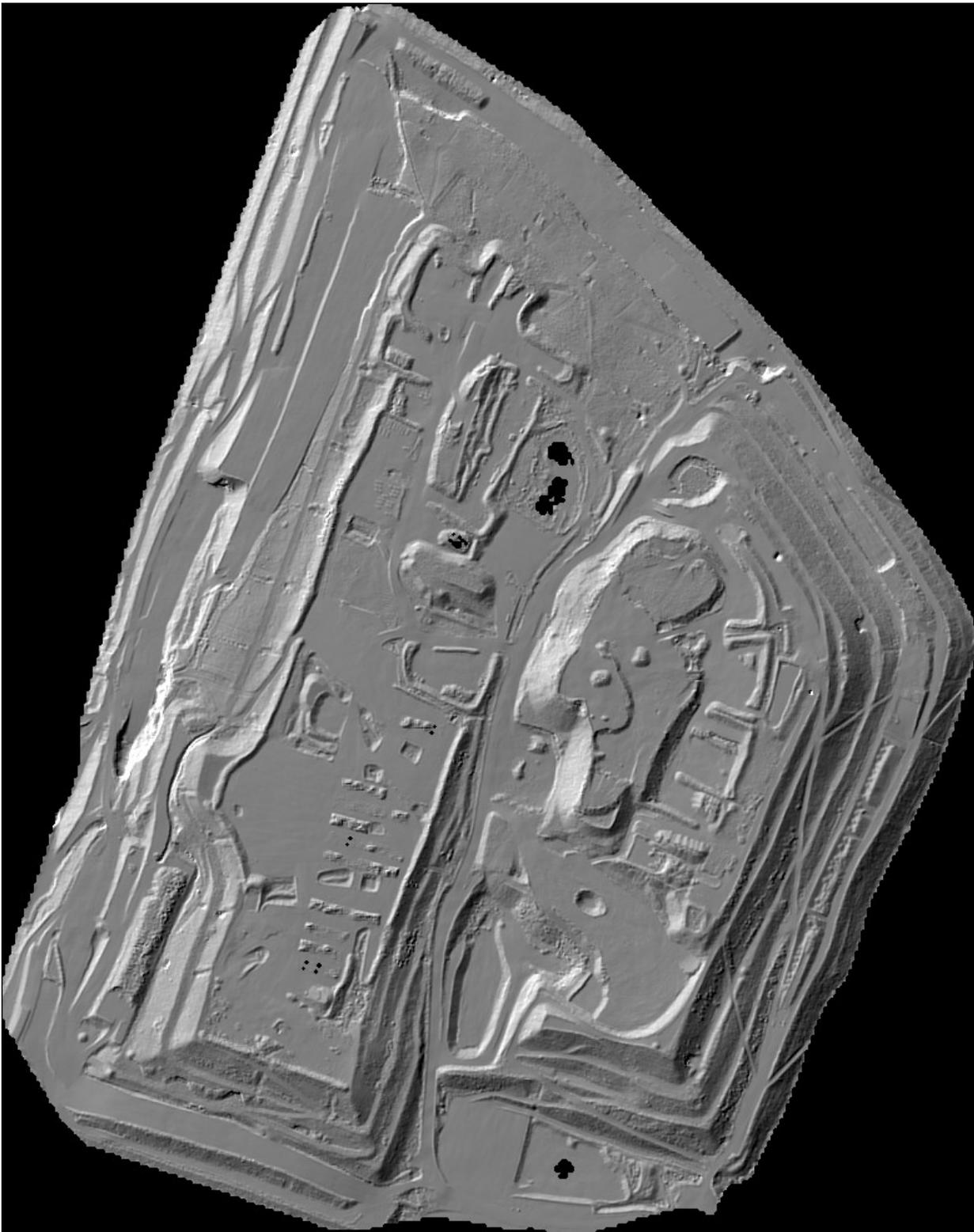


Abbildung 79: Schattierung ALS-DGM innerhalb der Abrechnungsgrenzen
Berechnet mit SCOP++ und „Lidar DTM Default“ Filter im Zuge dieser Arbeit

Quelle: Eigene Graphik, erstellt mit SCOP++, visualisiert mittels OPALS

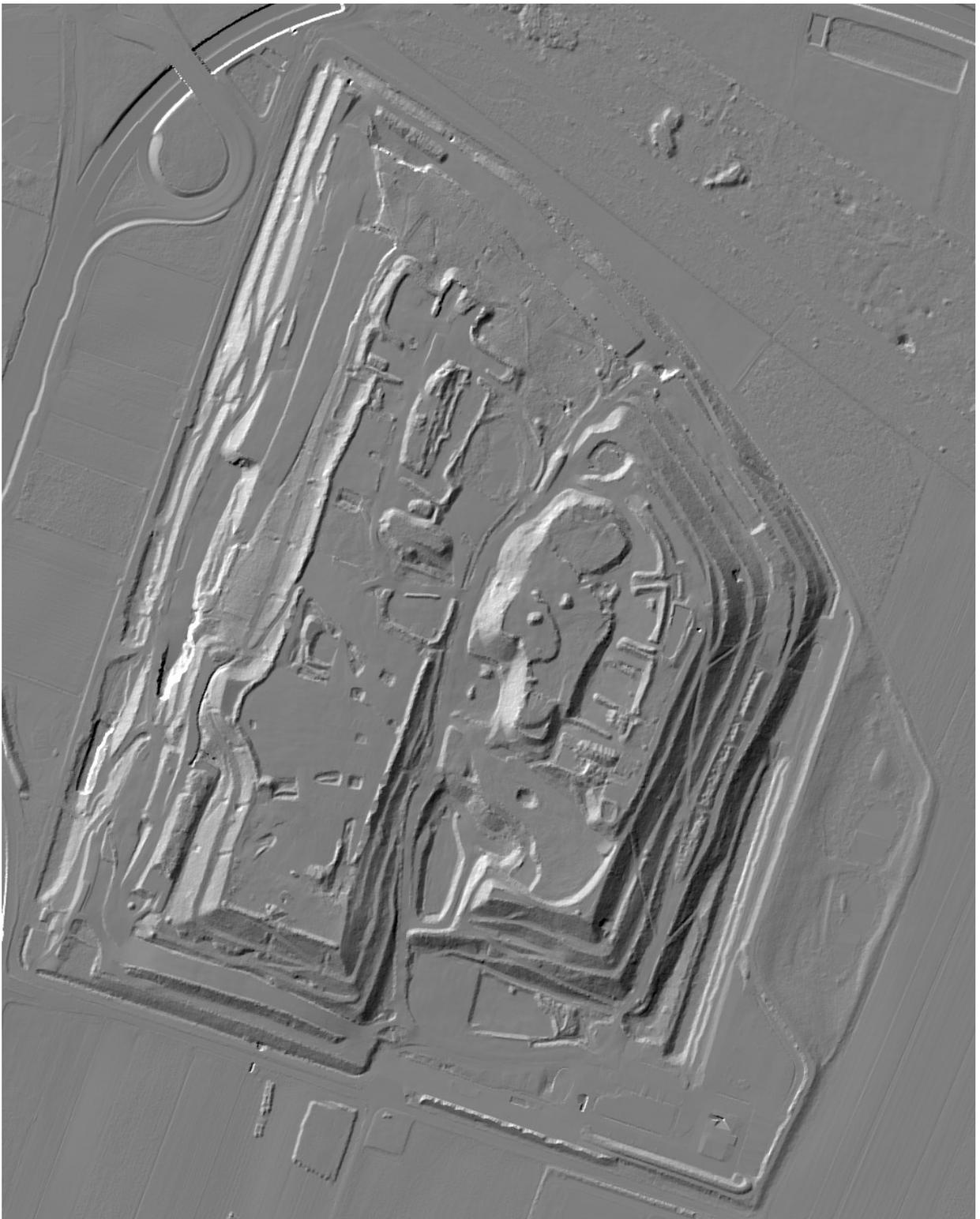


Abbildung 80: Schattierung ALS-DGM der gesamten Deponie (MA41)
Von Störobjekten manuell bereinigtes DGM welches von der MA41 übermittelt wurde.

Quelle: MA41 Stadtvermessung, visualisiert mittels OPALS

Anhang

Anhang I: Ergebnisse der Kamerakalibrierung

Bild#	x0	sx0	y0	sy0	c	sc	k
5462	2960,4	3,60	-1978,5	1,98	4087,6	1,49	k~0gon
5463	2952,9	3,20	-1974,5	5,66	4085,9	3,95	k~100gon
5464	2964,3	4,89	-1983,1	2,44	4090,1	1,73	k~200gon
5465	2955,3	3,06	-1977,4	5,54	4088,3	2,33	k~300gon
5466	2962,4	3,55	-1977,0	2,02	4089,5	1,50	k~0gon
5467	2953,1	3,14	-1979,6	5,11	4083,3	2,46	k~100gon
5468	2951,2	4,90	-1985,3	2,52	4090,3	1,82	k~200gon
5469	2954,4	2,95	-1977,2	5,11	4091,3	2,28	k~300gon

Bild#	laufende Bildnummer
x0[Pixel]	x-Koordinate des Bildhauptpunktes
sx0[Pixel]	Standardabweichung der x-Koordinate
y0[Pixel]	y-Koordinate des Bildhauptpunktes
sy0[Pixel]	Standardabweichung der y-Koordinate
c[Pixel]	Kamerakonstante
sc[Pixel]	Standardabweichung der Kamerakonstante
k	Kantung der Kamera

Anhang II: Ergebnisse des ALS-Streifenausgleichs mittels ICP Algorithmus

```

2015-06-23 17:39:07.085s | S : GLOBALICP > RUNICP > ICP ITERATION 5 OF 5 > RESULTS
| T : GENERAL STATISTICS:
| T : iteration   corresp.   std(dp)   mean(dp)   norm(dx)
| T : 1           70860     0.02292   0.00051    0.13921
| T : 2           70728     0.02271   0.00049    0.05037
| T : 3           70714     0.02271   0.00050    0.03599
| T : 4           70761     0.02269   0.00054    0.02885
| T : 5           70745     0.02268   0.00051    0.02193
| T : where ... dp is the vector of all (signed) point-to-plane distances
| T : ... dx is the vector of parameter increments
| T : POINT CLOUD DEPENDANT STATISTICS:
| T : point cloud   corresp.   std(dp)   mean(dp)   file
| T : [1]           157       0.02684   -0.00364   AREA_BOGENSBERGER
| T : [2]           29391    0.02199   0.00025   Scanner 1 - 131017_083302_1 - originalpoints - MGI AT_TM
| T : [3]           22487    0.02478   0.00111   Scanner 1 - 131017_083556_1 - originalpoints - MGI AT_TM
| T : [4]           16544    0.02476   0.00010   Scanner 1 - 131017_083923_1 - originalpoints - MGI AT_TM
| T : [5]           10151    0.02136   0.00076   Scanner 1 - 131017_084251_1 - originalpoints - MGI AT_TM
| T : [6]           28394    0.02205   0.00098   Scanner 1 - 131017_084525_1 - originalpoints - MGI AT_TM
| T : [7]           16457    0.02054   -0.00000   Scanner 1 - 131017_084807_1 - originalpoints - MGI AT_TM
| T : [8]           17909    0.02252   0.00020   Scanner 1 - 131017_085126_1 - originalpoints - MGI AT_TM
| T : where ... dp is the vector of all (signed) point-to-plane distances associated to a single point cloud +0.103s
| E : GLOBALICP > RUNICP > ICP ITERATION 5 OF 5 > RESULTS

```

Anhang III: Ergebnisse der Aerotriangulation mittels Orient

- **Kamerakalibrierungsparameter**

```
IOR = 99990001 subtype= 1      99990001 2950.24438 # .2301, -1968.19275 # .2629, 4085.14575 # .5918
t: trace 1 4.963E+02 # .2301, 6.474E+02 # .2629, 3.281E+03 # .5918 ( 4.425E+03 # .3968 )

ADPA= 99990001 subtype= 1, norme( 2404.0000)
1: 3 -4.02826 # 3.97E-02 d/sig_a= 1.02E+02 significant >99.9% if .0000 is expected
2: 4 .873087 # 2.30E-02 d/sig_a= 38. significant >99.9% if .0000 is expected
3: 5 -3.30800 # 1.29E-02 d/sig_a= 2.57E+02 significant >99.9% if .0000 is expected
4: 6 .105183 # 1.21E-02 d/sig_a= 8.7 significant >99.9% if .0000 is expected
K( 1: 1)= 100.00%
K( 2: 1)= -86.93%, K( 2: 2)= 100.00%
K( 3: 1)= 3.50%, K( 3: 2)= -4.23%, K( 3: 3)= 100.00%
K( 4: 1)= -9.56%, K( 4: 2)= -2.36%, K( 4: 3)= -3.71%, K( 4: 4)= 100.00%
t: trace 4 2.262E+01 # .0246
```

• **Varianz Komponenten Analyse**

```

Variance Components Analysis:      {multiply SIG_1 by sig_fac until sig_fac=1 }
obs_type  sig_1 * sig_fac = sig_est  count  redund  rmse_gr  stdddev_t  [pvv]  [pvv/r]
PHO =OBS  .5010* 9.93E-01= .4974 68154 54495.98 4.45E-01 1.01E-02 5.372E+00 6.960E+00
PHO =OBS  .5020* 1.07E+00= .5391 68139 54538.76 4.82E-01 1.08E-02 6.289E+00 8.008E+00
PHO =OBS  .8410* 8.75E-01= .7358 156 133.29 6.80E-01 8.83E-03 1.020E-02 1.217E-02
PHO =OBS  .8420* 1.01E+00= .8479 156 136.77 7.94E-01 1.02E-02 1.387E-02 1.636E-02
PHO =OBS  1.1100* 1.00E+00= 1.1144 1486 1264.20 1.03E+00 1.02E-02 1.274E-01 1.532E-01
PHO =OBS  1.1200* 9.72E-01= 1.0884 1485 1283.26 1.01E+00 9.77E-03 1.212E-01 1.418E-01

COMP=OBS  .0300* 2.10E+00= .0630 10 3.04 3.47E-02 2.12E-02 1.338E-03 4.482E-03
COMP=OBS  .0310* 1.53E+00= .0475 15 9.88 3.86E-02 1.57E-02 2.320E-03 3.708E-03
COMP=OBS  .0320* 1.37E+00= .0440 15 10.24 3.63E-02 1.48E-02 1.932E-03 3.307E-03
COMP=OBS  .0330* 1.78E+00= .0586 10 4.02 3.72E-02 2.01E-02 1.269E-03 4.033E-03

sum= 139626111879.42; 139626 + 31 = 139657=nobs

```

Literaturverzeichnis

- Anon 2013 Unmanned aerial vehicle *Wikipedia Free Encycl.* Online:
http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Unmanned_aerial_vehicle&oldid=584021094 (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Apollonio F I, Ballabeni A, Gaiani M und Remondino F 2014 Evaluation of feature-based methods for automated network orientation *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **XL-5** 47–54
- Austro Control 2013a Austro Control -Unbemannte LFZ Online:
http://www.austrocontrol.at/luftfahrtbehoerde/lizenzen__bewilligungen/flugbewilligung/en/unbemannte_lfz (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Austro Control 2013b Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitshinweis Nr. 67 Online:
https://www.austrocontrol.at/jart/prj3/austro_control/data/dokumente/upLNR_LTH_LFA_ACE_067.pdf (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Besl P und McKay D 1992 A Method for Registration of 3-D Schapes Online:
http://www.math.zju.edu.cn/cagd/Seminar/2007_AutumnWinter/2007_Autumn_Master_LiuYu1_ref_1.pdf (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Björnsen Beratende Ingenieure GmbH 2014 UAV-Befliegung Deponie Eiterköpfe Online:
<http://www.bjoernsen.de/index.php?id=uav-befliegungdeponieeiterkopf&L=1>
(Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- BMVIT 2013 *Beschluss zur Änderung des Luftfahrtgesetzes im Nationalrat* Online:
http://www.parlament.gv.at/PAKT/VHG/XXIV/I/I_02299/index.shtml
(Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Brechtken R, Borchert R, Przybilla H-J und Roderweiss R M 2012 Auswertung von Bilddaten aus UAV-Flügen–Von der klassischen Aerotriangulation zum Dense Image Matching Online:
http://www.researchgate.net/profile/Heinz_Juergen_Przybilla/publication/273924955_Auswertung_von_Bilddaten_aus_UAV-Flügen_Von_der_klassischen_Aerotriangulation_zum_Dense_Image_Matching/links/5510559e0cf2a8dd79bc538a.pdf (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Briese C 2000 Digitale Modelle Aus Laser-Scanner-Daten In Städtischen Gebieten
- Briese C, Fortner R, Sager P und Pfeifer N 2013 Vom Modellflughobby zu unbemannten Flugsystemen für die Geodatenerfassung *Vgi Österr. Z. Für Vermess. Geoinformation*
- Brown D C 1976 The bundle adjustment - progress and prospects. *Int Ar- Chives Photogramm.* 213
- Cavegn S, Haala N, Nebiker S, Rothermel M und Tutzauer P 2014 Benchmarking High Density Image Matching for Oblique Airborne Imagery *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **XL-3** 45–52

- Chen Y und Medioni G 1991 Object Modeling by Registration of Multiple Range Images
Online: http://www.math.zju.edu.cn/cagd/seminar/2007_autumnwinter/2007_autumn_master_liuyu_ref_2.pdf (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Clarke T A 1998 The Principal Point and CCD Cameras - Clarke - 2003 - The Photogrammetric Record - Wiley Online Library Online: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/0031-868X.00127/abstract> (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Deseilligny M P und Clery I 2011 Apero, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images *ISPRS-Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **38** 5
- Eisenbeiss H 2009 *UAV Photogrammetry* (Zurich) Online: http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue_Berichte_PDF/105.pdf (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Förstner W und Gülch E 1987 A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centres of Circular Features Online: <http://cseweb.ucsd.edu/classes/sp02/cse252/foerstner/foerstner.pdf> (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Furukawa Y und Ponce J 2010 Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis2.pdf
Online: <http://vision.ia.ac.cn/zh/seminar/reports/Accurate,%20Dense,%20and%20Robust%20Multi-View%20Stereopsis2.pdf> (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Girardau-Montaut D, Bey A und Marc R 2015 *CloudCompare v2.6.1 - User manual.pdf*
Online: <http://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf> (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Glira P 2014 Vorstellung Streifenausgleichung - AVT
- Glira P, Pfeifer N, Briese C und Ressel C 2015 A CORRESPONDENCE FRAMEWORK FOR ALS STRIP ADJUSTMENTS BASED ON VARIANTS OF THE ICP ALGORITHM.pdf
- Glira P, Pfeifer N, Briese C und Ressel C 2007 RIGOROUS STRIP ADJUSTMENT OF AIRBORNE LASERSCANNING DATA BASED ON THE ICP ALGORITHM.pdf
- González-Aguilera D, Fernández-Hernández J, Mancera-Taboada J, Rodríguez-González P, Hernández-López D, Felipe-García B, Gozalo-Sanz I und Arias-Perez B 2012 3D modelling and accuracy assessment of Granite Quarry using unmanned aerial vehicle *ISPRS Ann Photogram Remote Sens Spat Inf Sci* **1** 37–42
- Greiwea A, Gehrke R, Spreckelsb V und Schlienkampb A 2013 Aspects of dem Generation from Uas Imagery Online: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W2/163/2013/isprsarchives-XL-1-W2-163-2013.pdf> (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Haala N, Cramer M und Rothermel M 2013 Quality of 3D point clouds from highly overlapping UAV imagery *ISPRS-Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **1** 183–8

- Haig C, Heipke C und Wiggenhagen M 2006 Lens inclination due to instable fixings detected and verified with VDI/VDE 2634 Part 1 *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **6** Online: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part5/paper/1220_Dresden06.pdf (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Haring A 2007 *Die Orientierung von Laserscanner- und Bilddaten bei der fahrzeuggestützten Objekterfassung* (na) Online: http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo_2043.pdf
- Hartmann P 2012 Aufnahme einer Kiesgrube mit UAV
- Harwin S, Lucieer A und Osborn J 2015 The Impact of the Calibration Method on the Accuracy of Point Clouds Derived Using Unmanned Aerial Vehicle Multi-View Stereopsis *Remote Sens.* **7** 11933–53
- Hirschmüller H 2008 Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **30** 328–41
- IPF und Trimble 2011 *SCOP++ Benutzerhandbuch*
- Kabelik B 2013 Endbericht ALS Befliegung Rautenweg 2013
- Kager H 1980 Das Interaktive Programmsystem Orient im Einsatz Online: http://www.isprs.org/proceedings/XXIII/congress/part5/390_XXIII-B5.pdf (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Kager H und Rottensteiner F 1999 Research Group Photogrammetry - Department of Geodesy and Geoinformation: ORPHEUS Online: <http://photo.geo.tuwien.ac.at/software/orient-orpheus/orpheus/> (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Kienast J 2006 Untersuchung einer relativ zum terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z420i kalibrierten Kamera hinsichtlich Stabilität dieser Kalibrierung
- Kraus K 2004 *Photogrammetrie. Band. 1: Grundlagen und Standardverfahren*
- Kraus K 2000 *Photogrammetrie, Band3: Topographische Informationssysteme*
- Leberl F, Gruber M und Wiechert A 2009 SPECULATIVE COMPARISON OF LASER-SCANNING AND 3D-PHOTOGRAMMETRY
- Leberl F, Irschara A, Pock T und Meixner P 2010 Point Clouds: Lidar versus 3D Vision
- Lehner H 2015 E-Mail: Kostenvergleich ALS - UAV vom 14.10.2015
- Lemaire C 2008 Aspects of the DSM production with high resolution images *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **37** 1143–6
- Lowe D G 2004 Distinctive image features from scale-invariant keypoints *Int. J. Comput. Vis.* **60** 91–110

- Lowe D G 1999 Object recognition from local scale-invariant features *Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conference on* Bd 2 (Ieee) S 1150–7
Online: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=790410
(Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- m48pob 2015 Deponie Rautenweg Online:
<http://www.wien.gv.at/umwelt/ma48/entsorgung/abfallbehandlungsanlagen/deponie.html>
(Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Melzer T 2007 Statistische Mustererkennung WS 2007
- Moravec H P 1976 Techniques Towards Automatic Visual Obstacle Avoidance Online:
https://www.frc.ri.cmu.edu/~hpm/project.archive/robot_papers/1977/aip.txt
(Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Mücke W 2008 Analysis of full-waveform airborne laser scanning data for the improvement of DTM generation
- Naumann M, Geist M, Bill R, Niemeyer F und Grenzdörffer G 2013 Accuracy comparison of Digital Surface Models created by UAS imagery and Terrestrial Laser Scanner
- O A 2015 Normalized Difference Vegetation Index *Wikipedia Free Encycl.* Online:
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Normalized_Difference_Vegetation_Index&oldid=671812148
(Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- O A 2010 *RIS - Gesamte Rechtsvorschrift für Luftverkehrsregeln 2010 - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 31.05.2014* Online:
<http://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20006720> (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Pfeifer N, Mandlbürger G, Otepka J und Karel W 2014 OPALS – A framework for Airborne Laser Scanning data analysis *Comput. Environ. Urban Syst.* **45** 125–36
- Re C, Roncella R, Forlani G, Cremonese G und Naletto G 2012 Evaluation of area-based image matching applied to DTM generation with Hirise images *Int Arch Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **39** 7
- Reiselhuber K 2010 Deponie Rautenweg
- Remondino F und Kersten T P 2012 Low-cost und open-source Lösungen für die automatisierte Generierung von 3D-Punktwolken – ein kritischer Überblick 63–80
- Remondino F, Spera M G, Nocerino E, Menna F und Nex F 2014 State of the art in high density image matching *Photogramm. Rec.* **29** 144–66
- Ressl C, Kager H und Mandlbürger G 2008 Quality checking of ALS projects using statistics of strip differences *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* **37** 253–60

- Ressl C, Mandlbürger G und Pfeifer N 2009 Investigating adjustment of airborne laser scanning strips without usage of GNSS/IMU trajectory data *Proceedings of ISPRS Workshop, "Laser scanning 2009* S 195–200 Online: http://www.isprs.org/proceedings/Xxxviii/3-W8/papers/195_laserscanning09.pdf (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Rothermel M, Wenzel K, Fritsch D und Haala N 2012 SURE: PHOTOGRAMMETRIC SURFACE RECONSTRUCTION FROM IMAGERY Online: http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2012/Rothermel_etal_lc3d.pdf (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Rouse J W, Haas R H, Schell J A und Deering D W 1973 Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS
- Rumpler M 2011 Multi-View Stereo: Redundancy Benefits for 3D Reconstruction Online: https://aerial.icg.tugraz.at/papers/multiview_aapr2011.pdf (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Rumpler M, Hoppe C, Wendel A, Mayer G und Bischof H 2013 Echtzeit-Qualitätsüberprüfung für zuverlässige UAV-gestützte Bilddatenerfassung und exakte, automatisierte Mehrbildauswertung *Vgi Österr. Z. Für Vermess. Geoinformation* **101. Jahrgang 2013** 88–100
- Rusinkiewicz S und Levoy M 2001 Efficient variants of the ICP algorithm *3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on (IEEE)* S 145–52 Online: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=924423 (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Skaloud J und Lichti D 2006 Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **61** 47–59
- Vallet J, Panissod F, Strecha C und Tracol M 2011 Photogrammetric performance of an ultra light weight swinglet UAV *UAV-g* Online: http://infoscience.epfl.ch/record/169252/files/Paper-vallet_UAVg.pdf (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Wehr A und Lohr U 1999 Airborne laser scanning - an introduction and overview Online: <http://warnercnr.colostate.edu/~lefsky/isprs/1136.pdf> (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Wenzel K, Rothermel M, Haala N und Fritsch D 2013 SURE – The ifp Software for Dense Image Matching Online: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo13/080Wenzel.pdf> (Letzter Zugriff: 19.10.2015)
- Wu C 2007 SIFT on GPU (siftgpu) Online: <http://cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu/> (Letzter Zugriff: 19.10.2015)

Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.

Wien, den 20.10.2015

Boris Bogensberger