

**Das Potenzial von UAV-Daten zur Erfassung der
Sedimentdynamik - Eine Fallstudie aus dem
Nationalpark Gesäuse**

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science (MSc)

der Studienrichtung

Masterstudium Gebirgs- und Klimageographie

an der Karl-Franzens-Universität Graz

vorgelegt von

Stefan SCHÖTTL BSc

am Institut für Geographie und Raumforschung

Begutachter

Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr.rer.nat Wolfgang SULZER

Graz, Jänner 2017

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen inländischen oder ausländischen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Die vorliegende Fassung entspricht der eingereichten elektronischen Version.

Stefan Schöttl

Graz, Jänner 2017

Vorwort und Danksagung

Die Fernerkundung und die physische Geographie faszinierte mich seit Beginn meines Studiums. Die Fernerkundung bildete in weitere Folge einen Schwerpunkt in meiner Ausbildung. Während meiner Tätigkeit als studentischer Mitarbeiter bei Ao.Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Sulzer kam ich im Jahr 2013 erstmals mit UAV Daten einer archäologischen Ausgrabung in Kontakt und war von den Daten begeistert. Das Institut für Geographie und Raumforschung hat im Rahmen einer NAWI-Graz Kooperation seit Herbst 2014 Zugang zu zwei UAVs, welche eine Erfassung von hochaufgelösten Luftbildern ermöglichen. Das Thema zu dieser Arbeit entstand in weiterer Folge aus gemeinsamen Überlegungen mit Ao.Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Sulzer und Univ.-Prof. Dr. Oliver Sass im März 2015. Einen besonderen Reiz stellte für mich die Verbindung von einem fernerkundlichen Thema mit der Geomorphologie dar. Aufgrund eines bereits bestehenden Projektes der ALADYN Forschungsgruppe am Institut für Geographie und Raumforschung, zur Erforschung der Sedimentdynamik im Johnsbachtal (Sedyn-X) und der damit verbundenen sehr guten Datenlage wurde für diese Arbeit ein Testgebiet im Johnsbachtal ausgewählt.

Ohne die Hilfe von zahlreichen Personen wäre diese Masterarbeit nicht möglich gewesen. Ich möchte mich daher für die Betreuung der Arbeit bei Ao.Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Sulzer und Univ.-Prof. Dr. Oliver Sass bedanken. Ein besonderer Dank gilt Mag. Gernot Seier für: die Durchführung der UAV Befliegung, die Unterstützung bei der UAV Flugplanung, die Unterstützung bei der Einmessung der Passpunkte, für zahlreiche fachliche Diskussionen und die generell hervorragende Zusammenarbeit. Dipl.-Geogr. Eric Rascher danke ich für: die Aufbereitung der TLS Daten, die Beantwortung zahlreicher Fragen zum Sedyn-X Projekt und das Bereitstellen von weiteren Grundlagendaten und Literatur.

Dem Nationalpark Gesäuse, namentlich Mag. Daniel Kreiner, danke ich für die schnelle und unbürokratische Erlaubnis zur UAV-Befliegung und zur Durchführung von Feldarbeiten im Langgriesgraben. Dr. Andreas Kellerer Pirklbauer-Eulenstein danke ich für die Beantwortung von Fragen zum eingesetzten Differential GPS Gerät, Dr. Hannes Kleindienst von der Firma Grid-IT für den Support bei technischen Problemen mit dem Fluggerät, Josef Schöttl für die Unterstützung bei der Messung und Vermarkung der Passpunkte, Tímea Mareková MSc für die Unterstützung bei der Passpunktmessung und der Herstellung der Passpunktsignale und Mag. Patrick Zinner für die Unterstützung bei den TLS Feldarbeiten.

Ich möchte mich zudem namentlich bei meinem ehemaligen ArbeitskollegInnen an der Universität Graz: Andreas Salentinig MSc, Christian Aufreiter MSc, Mag. Gernot Seier, Dr. Katharina Kern, Marc Muick MSc, Mathias Wecht BSc, Michael Mollatz und Mag. Richard Pink für die gute Zusammenarbeit in den vergangenen Jahren bedanken.

Bei meinen Freunden, StudienkollegInnen und MitbewohnerInnen möchte ich mich für die schöne gemeinsame Zeit während des Studiums bedanken. Meiner Freundin möchte ich herzlich für die mentale Unterstützung, die fachlichen Diskurse und für das Korrekturlesen dieser Arbeit danken.

Der größte Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und meiner Schwester, die mich in jeglicher Hinsicht in meinem Leben unterstützt haben. Meinen Eltern, Sieglinde und Josef, danke ich für die Ermöglichung dieses Studiums, ohne euch wäre dies niemals möglich gewesen.

Abstract

This paper examines the potential of high resolution UAV-data for surveying sediment dynamics. For this purpose, a test area (Langgriesgraben, NP Gesäuse, Austria) was selected in a channel with episodic discharge and high morphodynamics. High resolution UAV images (mean GSD 2-3 cm) from three survey dates were used to derive digital point clouds, digital surface models and orthophotos using the SfM-MVS method. The processing was performed with Agisoft Photoscan Professional 1.2.4. Ground control points, measured with a dGPS, were used for georeferencing. The height accuracy from the raster terrain models and the planar accuracy of the orthophotos were estimated from dGPS measured check points using different statistical parameters. The achieved accuracy (e.g. height accuracy DTM: 4-7 cm RMSE) is in the expectable accuracy range found in literature. Shadow areas in the aerial images are leading to areas with higher uncertainty in the derived DTM. The digital point cloud and the DTM was compared with TLS data on three selected test sites. The deviation between UAV and TLS is 6-12 cm (percentile 95 of the deviation) depending on the method used for the comparison and test site. It was possible to estimate the surface change in the channel with the derived UAV-terrain models. The DoD method with a minLOD was used to accomplish that task. Based on the calculated minLOD (14 cm) a significant change could only be estimated at 12% of the total area. In the observed period (53 d) the deposition (295 m³) predominates the erosion (163 m³) of sediment. The results show that the used method SfM-MVS in combination with an UAV is able to detect bigger rates of change. Smaller changes, however, are not detectable due to the reached accuracy.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Potenzial von hochaufgelösten UAV-Daten zur Erfassung der Sedimentdynamik. Zu diesem Zweck wurde ein Testgebiet (Langgriesgraben, NP Gesäuse, Österreich) in einem Gerinne mit episodischer Wasserführung und hoher Morphodynamik ausgewählt. Aus den hochaufgelösten UAV Luftbildern (mittlere GSD 2-3 cm) von drei Befliegungszeitpunkten wurden mit der SfM-MVS Methode digitale Punktwolken, Geländemodelle und Orthophotos erstellt. Die Software Agisoft Photoscan Professional 1.2.4 kam dabei zum Einsatz und die Georeferenzierung erfolgte über dGPS eingemessene Passpunkte. Die Höhengenaugkeit der erzeugten Raster-Geländemodelle und die Lagegenauigkeit der Orthophotos wurden anhand von dGPS-Einzelpunkten und durch die Berechnung verschiedener statistischer Parameter abgeschätzt. Die dabei erzielte Genauigkeit (z.B. Höhengenaugkeit DGM: 4-7cm RMSE) liegt in dem aus der Literatur erwartbaren Genauigkeitsbereich. Schatten in den Luftbildern führen in weiterer Folge im DGM zu Bereichen mit größerer Unsicherheit. Die digitale Punktwolke und das DGM wurden für drei Testgebiete mit zeitnah erfassten TLS Daten verglichen, wobei die Abweichung zwischen UAV und TLS je nach gewählter Vergleichsmethode und Testgebiet 6-12 cm (Perzentil 95 der Abweichungen) beträgt. Auf Basis der erzeugten UAV-Geländemodelle konnte die Oberflächenveränderung im Gerinne durch die DoD Methode unter Verwendung eines minLOD quantifiziert werden. Aufgrund des ermittelten minLOD (14 cm) konnte eine signifikante Veränderung auf nur 12% der Gesamtfläche festgestellt werden. Die Deposition (295 m³) überwiegt im betrachteten Zeitraum (53 d) klar die Erosion (163 m³) von Sediment. Auf Basis der Ergebnisse kann man den Schluss ziehen, dass die eingesetzte Methode SfM-MVS in Kombination mit einem UAV zur Detektion von größeren Änderungsraten geeignet ist, kleine Änderungsraten sich jedoch aufgrund der erzielten Genauigkeit nicht bestimmen lassen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	12
1.1 Problemstellung	12
1.2 Ziele der Arbeit	13
1.3 Forschungsfragen	14
1.4 Eingesetzte Methoden	14
2 Untersuchungsgebiet	16
2.1 Allgemeine Beschreibung	16
2.2 Geologische und geomorphologische Gegebenheiten	17
2.3 Klimatische Verhältnisse	19
2.4 Hydrologische Verhältnisse	19
2.5 Nutzung	21
3 Theoretische Grundlagen	23
3.1 Sedimentdynamik und DoD-Methode	23
3.2 UAVs und SfM-MVS Photogrammetrie	24
3.2.1 UAVs	24
3.2.2 SfM-MVS Photogrammetrie	27
3.2.3 Anwendungen von UAVs und SfM-MVS.....	30
3.2.4 Vorteile und Nachteile von UAV Daten.....	33
3.3 Laserscanning	38
3.3.1 Airborne Laserscanning	39
3.3.2 Terrestrisches Laserscanning.....	40
3.4 GNSS Vermessung	42
4 Praktischer Teil	43
4.1 Erfassung, Prozessierung und Validierung der UAV Daten	44
4.1.1 Errichtung Passpunktmessnetz und GNSS Messung	44
4.1.2 UAV Datenerfassung	48
4.1.2.1 Flugplanung	48
4.1.2.2 Befliegung.....	55
4.1.3 Auswertung der UAV Daten	57
4.1.3.1 Datenvorverarbeitung	57
4.1.3.2 Prozessierung der UAV Daten	59
4.1.4 Qualitätsbeurteilung.....	64
4.1.4.1 DGM Validierung	64
4.1.4.2 Validierung Orthophoto	72

4.2 TLS – UAV Vergleich.....	74
4.2.1 TLS Daten.....	74
4.2.2 Allgemeine Anmerkungen zum Vergleich	75
4.2.3 Vergleich Cloud to Cloud Distanz	77
4.2.4 Vergleich Cloud to Mesh Distanz.....	79
4.2.5 DEM of Difference Vergleich	83
4.3 ALS – UAV Vergleich	87
4.4 Quantifizierung der Veränderung des Sedimentkörpers	88
4.4.1 Einführende Anmerkungen	88
4.4.2 Durchführung	89
4.4.3 Ergebnisse.....	94
5 Schlussfolgerungen.....	99
6 Quellenverzeichnis	104
7 Anhang.....	110

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lage Untersuchungsgebiet Langgriesgraben	16
Abbildung 2:	Geologie Untersuchungsgebiet Langgriesgraben	17
Abbildung 3:	Detailansicht vom Untersuchungsgebiet LGG	18
Abbildung 4:	Impression Untersuchungsgebiet	20
Abbildung 5:	Kategorien A-D für Unbemannte Luftfahrzeuge	26
Abbildung 6:	Typischer SfM-MVS Workflow	29
Abbildung 7:	ALS-Prinzip	40
Abbildung 8:	Workflow praktischer Teil	43
Abbildung 9:	Eingesetzte Vermarkung und Signalisierung der Passpunkte	45
Abbildung 10:	Messnetz LGG	46
Abbildung 11:	Targets TLS	47
Abbildung 12:	Schema Parameter Wegpunkt	52
Abbildung 13:	Flugplan	53
Abbildung 14:	Bestimmte Satellitenanzahl	54
Abbildung 15:	Ausschnitt UAV Bild	56
Abbildung 16:	UAV, Kamera und Bodenstation	57
Abbildung 17:	Beispiel txt-Datei mit Aufnahmezentren	58
Abbildung 18:	Eindruck digitale RGB codierte Punktwolke	61
Abbildung 19:	Detailansicht Geländemodelle	62
Abbildung 20:	Vergleich Aufnahmezentren UAV Kampagne	63
Abbildung 21:	Histogramme UAV DGM Z-Fehler	66
Abbildung 22:	QQ-Plot UAV DGM Z-Fehler	67
Abbildung 23:	Boxplot UAV DGM Z-Fehler	68
Abbildung 24:	Z-Fehler entlang von Profil	69
Abbildung 25:	Datenlückenmaske UAV	70
Abbildung 26:	Problematik von Schatten und Vegetation	71
Abbildung 27:	Lage Testflächen und Datenlückemaske UAV und TLS	76
Abbildung 28:	Histogramme C2C Distanz	79
Abbildung 29:	Histogramme C2M Distanz	80
Abbildung 30:	C2M Vergleich	82
Abbildung 31:	Histogramme DoD Vergleich	84
Abbildung 32:	DoD Vergleich	85
Abbildung 33:	Temperatur und Niederschlag Feldsaison 2015	89
Abbildung 34:	Beispiel DoD ohne minLOD	90
Abbildung 35:	Verteilung dz Werte / DoD Werte	93
Abbildung 36:	DoD mit minLOD	94
Abbildung 37:	DoD mit minLOD Detailansicht	95
Abbildung 38:	Verteilung Änderung von Fläche und Volumen	97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammengestellte Literaturübersicht	30-32
Tabelle 2:	Vorteile und Nachteile UAV Daten	37
Tabelle 3:	Eingangsdaten und Metainformation für Flugplanung LGG	49
Tabelle 4:	Flugplanung LGG	51
Tabelle 5:	Parameter für Planung GNSS Empfang	54
Tabelle 6:	Übersicht erfasster UAV Daten	55
Tabelle 7:	Bestimmte Innere Orientierung	60
Tabelle 8:	Übersicht der prozessierten UAV Daten LGG 2015	64
Tabelle 9:	Z-Fehler UAV-DGM Kontrollpunkte	65
Tabelle 10:	Z-Fehler UAV-DGM Profilpunkte	68
Tabelle 11:	Lagegenauigkeit Orthophotomosaik	73
Tabelle 12:	Kenndaten eingesetzter Laserscanner	74
Tabelle 13:	Vergleich der Testgebiete A-C	77
Tabelle 14:	C2C Distanz Statistik	78
Tabelle 15:	C2M Distanz Statistik	81
Tabelle 16:	DoD Statistik	83
Tabelle 17:	Bestimmte minLOD Werte im Vergleich	92
Tabelle 18:	Veränderung Sedimentkörper LGG	96
Tabelle 19:	Stärken und Schwächen UAV Daten	99

Abkürzungen

ACCz Vertical linear accuracy at the 95% confidence interval

ACCxy Horizontal accuracy at the 95% confidence interval

ALS Airborne Laser Scanning

APOS Austrian Positioning Service

C2C Cloud to Cloud

C2M Cloud to Mesh

DGM Digitales Geländemodell

dGPS Differential Global Positioning System

DOM Digitales Oberflächenmodell

DoD Dem of Difference

EPOSA Echtzeit Positionierung Austria

FOV Field of View

GNSS Global Navigation Satellite System

GPS Global Positioning System

GSD Ground Sampling Distance

IMU Inertiale Messeinrichtung

LFG Luftfahrtgesetz

LGG Langgriesgraben

MVS Multit View Stereo

minLOD Minimum Level of Detection

NMAD Normalized Median Absolute Deviation

LIDAR Light Detection and Rangig

RMSE Root Mean Square Error

ROA Remotely Operated Aircraft

RPA Remotely Piloted Aircraft

RPAS Remotely Piloted Aircraft System

RPV Remotely Piloted Vehicle

RTK Real Time Kinematik

SfM Structure from Motion

SfM-MVS Structure from Motion Multi View Stereo

TIN Triangulated Irregular Network

TLS Terrestrisches Laserscanning

UAS Unmanned Aerial System

UAV Unmanned Aerial Vehicle

ULFZ Unbemannte Luftfahrzeugen

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Im Johnsbachtal (Steiermark, Österreich) wird seit dem Jahr 2012 im Projekt Sedy-X (Interdisziplinäre Untersuchung von Sedimentströmen im Johnsbachtal) der Sedimenthaushalt auf eine interdisziplinäre Weise erforscht. Ein Ziel des Projektes ist es, ein konzeptionelles Modell der Sedimentkaskaden für das Johnsbachtal zu erstellen (FWF 2015). Zur Quantifizierung geomorphologischer Prozesse (z.B. Muren, Erosion, Transport, Umlagerung und Ablagerung von Sediment) werden an ausgewählten Standorten terrestrische Laserscanning-Aufnahmen durchgeführt (Rascher und Sass 2016). Durch die erzeugten Oberflächenmodelle unterschiedlicher Epochen können somit Veränderungen der Oberfläche und des Volumens quantifiziert werden. Die Erfassung der Sedimentdynamik soll neben den bereits erwähnten TLS (Terrestrisches Laserscanning) Aufnahmen auch durch ALS (Airborne Laser Scanning) Aufnahmen erfolgen (Strasser et al. 2013).

Der Nationalpark Gesäuse verfügt seit 2012 über einen Witterschutt und Geschiebe Managementplan. In diesem verpflichtet er sich zu einem Gefährdungsmonitoring bestimmter geschiebeführenden Gräben. Zudem findet ein wissenschaftliches Monitoring durch den Nationalpark und Kooperationspartner statt (Holzinger et al. 2012). Das Monitoring ökosystemarer Abläufe in natürlichen Lebensgemeinschaften zählt laut einem Evaluierungsbericht (Evaluierung 5 Jahre Nationalpark Gesäuse) zudem zu einer wesentlichen Aufgabe des Nationalparks (Jungmeier et al. 2008).

Das Institut für Geographie und Raumforschung Graz verfügt seit Herbst 2014 im Rahmen einer NAWI Graz Kooperation über zwei unbemannte Luftfahrzeuge (ULFZ). Mit diesen ist es möglich hochaufgelöste Luftbilder aufzunehmen. Durch Methoden der digitalen Photogrammetrie und Computer Vision können die aufgenommenen Bilder zur Erstellung von Punktwolken, Oberflächenmodellen und Orthophotos genutzt werden.

Die Methoden SfM (Structure from Motion) und MVS (Multi View Stereo) sind in diesem Zusammenhang zu nennen, wobei der SfM Ansatz der Computer Vision entspringt und der MVS Ansatz primär der Photogrammetrie zuzuordnen ist (Smith et al. 2016). Diese relativ neue Methode SfM-MVS (Structure from Motion- Multi View Stereo) in Kombination mit einem UAV (Unmanned Aerial Vehicle) kann als Ergänzung zu bestehenden Methoden der Topographieerfassung (z.B. TLS) gesehen werden. Die Methode steht zum Teil auch in Konkurrenz zu bereits etablierten Methoden.

UAVs haben laut Lucieer et al. (2014 a) das Potenzial die Maßstablücke zwischen terrestrischer Erfassung und der flugzeuggetragenen / satellitengestützten Fernerkundung zu schließen. Hochaufgelöste topographische Daten sind zudem eine wichtige Information für zahlreiche geowissenschaftliche Fragestellungen (Hackney und Clayton 2015, Lucieer et al. 2014 a). Eine Vielzahl von Publikationen zeigt das sehr große Potenzial von UAVs zur Geodatenerfassung und zum Umweltmonitoring (Whitehead et al. 2014, Pajares 2015, Smith et al. 2016). Es finden auch einige Arbeiten welche UAVs in fluvialen Umgebungen einsetzen. Nach Kenntnissen des Autors dieser Arbeit, gibt es nur wenige Arbeiten welche sich mit UAVs zur Erfassung der Sedimentdynamik in einem Wildbach mit nur episodischer Wasserführung beschäftigten. Das Fehlen von permanenten Wasserflächen im vorliegenden Untersuchungsgebiet, vereinfacht jedenfalls die Datenauswertung. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich primär mit der Frage, welches Potenzial UAVs in der Erfassung der Sedimentdynamik besitzen.

1.2 Ziele der Arbeit

Für die Masterarbeit ergeben sich folgende Ziele. (1) Für ein Testgebiet (Langgriesgraben) im Einzugsgebiet des Johnsbaches, werden hochaufgelöste Luftbilder mit einem UAV aufgenommen. Das Gebiet soll zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst werden. Im Testgebiet wird ein Passpunktnetz für die Auswertung eingerichtet. (2) Aus den Bildern werden mit Methoden der Photogrammetrie und Computer Vision (SfM-MVS) Punktwolken, Oberflächenmodelle und Orthophotos erstellt. (3) Das Ergebnis soll mit vorhandenen möglichst zeitnahen ALS-, TLS-Daten verglichen werden. Global Navigation Satellite System Messungen (GNSS) von Einzelpunkten dienen ergänzend zur Fehlerabschätzung. (4) Wenn die UAV Oberflächenmodelle in einer ausreichenden Qualität vorhanden sind, wird eine Analyse der Oberflächenveränderung angestrebt. (5) Aufgrund der erzielten Ergebnisse wird eine Aussage über das Potenzial von UAVs zur Erfassung der Sedimentdynamik getroffen. Aufgrund der Tatsache, dass der überwiegende Teil der Daten erst im Rahmen dieser Arbeit erfasst wird, ist nur die Bearbeitung eines relativ kleinen Untersuchungsgebiet möglich. Dem praktischen Teil, von der Planung der Datenerfassung bis zur Auswertung der Daten, kommt somit eine essentielle Bedeutung zu.

Es ist nicht Ziel der Arbeit ein Sedimentbudget für das Gesamtsystem Langgriesgraben (von der Felswand bis zum Vorfluter) zu erstellen oder die Erstellung eines solchen Sedimentbudgets in methodischer Hinsicht zu verbessern. Die Sedimentdynamik wird nur für einen räumlich sehr eingeschränkten Bereich (Umlagerungsbereich von Sediment in einem

Wildbach) und über eine sehr kurze Zeitskala betrachtet. Dies führt unweigerlich zu Einschränkungen in der thematischen Interpretierbarkeit der Ergebnisse. Es ist zudem auch nicht Ziel dieser Arbeit ein langfristiges Monitoring durchzuführen. Die thematischen Analysen auf Basis der beurteilten UAV-Geländemodelle in dieser Arbeit sollen das Potenzial der Daten, aber auch Einschränkungen der Daten aufzeigen.

1.3 Forschungsfragen

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, auf die folgenden vier Forschungsfragen eine Antwort zu geben. Die Fragen ergeben sich dabei aus den Zielen der Arbeit. Die eingesetzten Methoden werden in weiterer Folge der Arbeit näher erläutert.

- Worin liegen die Stärken und Schwächen von UAV-Daten in der Erfassung der Sedimentdynamik?
- Wie ist die Qualität der erzeugten Oberflächenmodelle im Allgemeinen und im Vergleich zu ALS- und TLS-Oberflächenmodellen in Hinblick auf die Analyse der Sedimentdynamik im Testgebiet einzustufen?
- Hat im Untersuchungsgebiet zwischen den Aufnahmezeitpunkten eine signifikante Veränderung des Sedimentkörpers stattgefunden?
- Lässt sich aus den Erkenntnissen der Arbeit, die Planung der Datenerfassung, die Datenerfassung selbst, die Auswertung und Nachbearbeitung von UAV Aufnahmen für zukünftig ähnliche Fragestellungen optimieren?

1.4 Eingesetzte Methoden

Zu Beginn der Arbeit wurde eine Literaturrecherche speziell zu folgenden Themen durchgeführt: UAV, SfM-MVS, Anwendungen von UAVs und SfM-MVS in fluvialen Umgebungen, TLS, ALS, GNSS und DoD-Methode. Anhand der Literatur konnten Stärken und Schwächen von UAV-Daten herausgearbeitet werden und Herausforderungen der einzelnen Methoden festgemacht werden.

Wie bereits im Kapitel 1.2 erwähnt, kommt dem praktischen Teil der Arbeit eine große Bedeutung zu. Es war daher trotz des vorhandenen Vorwissens im Bereich Fernerkundung und Photogrammetrie eine umfangreiche praktische Einarbeitung in folgende Bereiche notwendig: UAV-Flugplanung, Assistentenrolle bei einer UAV-Befliegung, GNSS-

Passpunktmessung, Auswertesoftware Agisoft Photoscan, Verarbeitung von Punktwolken. Es wurden vom Autor dieser Arbeit einige Testflüge, UAV Kampagnen und die Errichtung des Passpunktmessnetzes am Baltahof bei Graz (Testgebiet) im Vorfeld dieser Arbeit unterstützt. Die dabei gemachten Erfahrungen wurden bei der Umsetzung des praktischen Teils dieser Arbeit berücksichtigt.

Die Erstellung von digitalen Punktwolken, Oberflächenmodellen und Orthophotos aus den Luftbildern und Passpunkten erfolgte mit der SfM-MVS Methode. Die allgemeine Qualitätsbeurteilung der erzeugten Oberflächenmodelle und Orthophotos wurde anhand von GNSS-Einzelpunktmessungen und statistischen Methoden durchgeführt.

Die UAV-Punktwolken und Oberflächenmodelle wurden zudem anhand von Testgebieten mit TLS Daten verglichen, wobei unterschiedliche Vergleichsmethoden zur Anwendung kamen. Die Vergleiche wurden dabei mit der Software CloudCompare, R und ArcGIS durchgeführt.

Um der Frage nachzugehen, ob zwischen den beiden UAV-Erfassungszeitpunkten eine signifikante Veränderung des Sedimentkörpers stattgefunden hat, wurde die DoD-Methode angewendet. Die Veränderungen wurden quantifiziert und graphisch aufbereitet.

Die erarbeiteten theoretischen Grundlagen, die erzielten Ergebnisse aus der Qualitätsbeurteilung und der DoD Analyse ermöglichen eine Abschätzung des Potenzials von UAV Daten zur Erfassung der Sedimentdynamik und können Verbesserungsvorschläge für zukünftig ähnliche Fragestellungen liefern.

2 Untersuchungsgebiet

2.1 Allgemeine Beschreibung

Das Johnsbachtal befindet sich im Bundesland Steiermark (Österreich). Ein Teil des Einzugsgebietes des Johnsbaches liegt auf Nationalparkflächen (Nationalpark Gesäuse). In der ersten Phase der Masterarbeit galt es ein geeignetes Untersuchungsgebiet im Johnsbachtal auszuwählen. Folgende Punkte spielten bei der Auswahl eine Rolle: (a) Gebiet mit hoher Prozessdynamik, (b) potentielle Verfügbarkeit von zeitnahen Vergleichsdaten (z.B. TLS, ALS), (c) Zustimmung der Grundbesitzer bzw. des Nationalparks für die UAV-Befliegung und die Vermarktung der Passpunkte, (d) Start-, Lande- und Flugmöglichkeit für das eingesetzte unbemannte Fluggerät, (e) Erreichbarkeit des Untersuchungsgebietes, (f) GPS-Empfang, (g) Verfügbarkeit eines amtlichen Vermessungspunktes in der näheren Umgebung.

Langgriesgraben (LGG), Johnsbachtal, Nationalpark Gesäuse

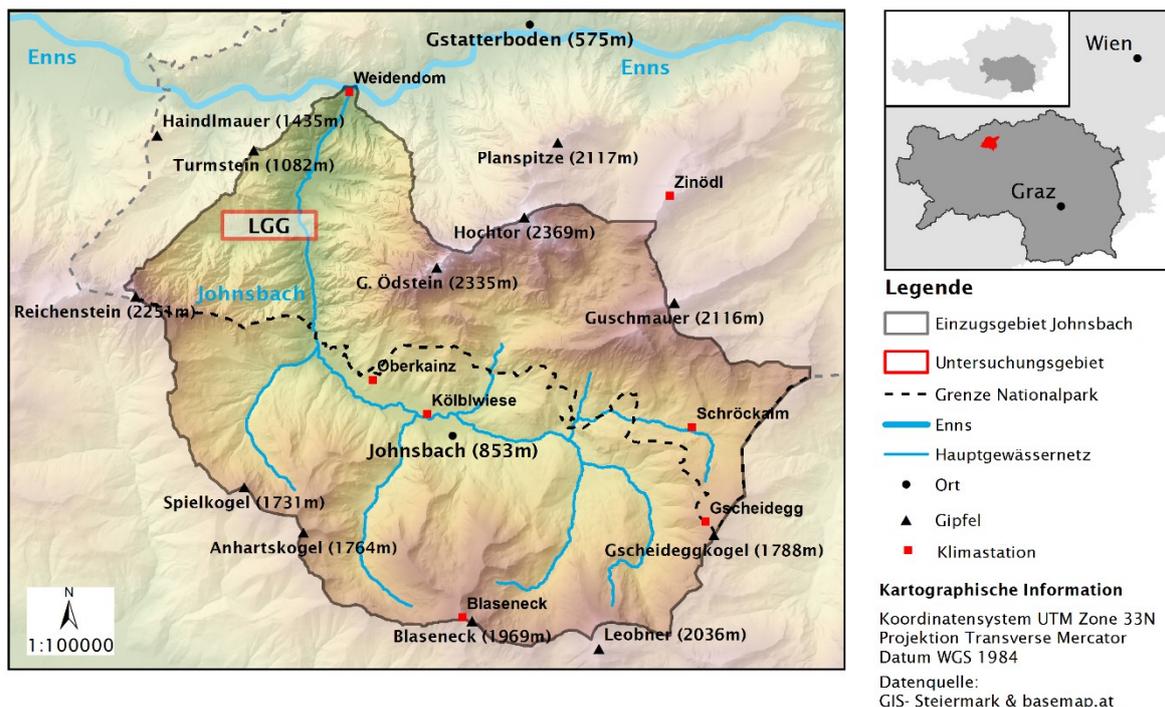


Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebietes LGG im Einzugsgebiet des Johnsbaches. (Eigene Darstellung)

Die Wahl fiel aufgrund der zuvor genannten Kriterien auf den Bereich Langgriesgraben (LGG). Dieser ist ein Seitengraben des Johnsbaches und befindet sich auf der orographisch linken Flussseite. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von der Langgriesbrücke ($47,561^\circ$ Nord und $14,580^\circ$ Ost) rund 650 m taleinwärts. Abbildung 1 zeigt die Lage des Untersuchungsgebietes innerhalb des Johnsbachtals. Der Langgriesgraben befindet sich wie aus der Abbildung 1 ersichtlich ist, auf Flächen des Nationalparks Gesäuse und im

Einzugsgebiet des Johnsbach. Das Gebiet ist durch eine hohe Reliefenergie (>1500 m) gekennzeichnet. Einen photographischen Eindruck des Untersuchungsgebiet gibt die Abbildung 4, eine Detailansicht befindet sich in der Abbildung 3.

2.2 Geologische und geomorphologische Gegebenheiten

Die Geologie im Untersuchungsgebiet ist, wie aus der Abbildung 2 ersichtlich, vor allem durch Wettersteindolomit bzw. Ramsaudolomit geprägt. Die folgenden Ausführungen basieren auf Ampferer (1935): der Ramsaudolomit wird auch als Unterer Dolomit bezeichnet, kommt in den unteren Berghängen des Gesäuses häufig vor und kann eine Mächtigkeit von größer 1000 Meter haben. Er wird im Reichensteinmassiv von den Raibler Schichten, Dachsteindolomit und Dachsteinkalk überlagert. Der Ramsaudolomit neigt zu starker Verwitterung und bildet interessante Formen z.B. Felstürme. Durch die Verwitterung entstehen sehr große Mengen an Sediment. Remich (2001) spricht von einer Dolomiterosionslandschaft mit hoher Morphodynamik.

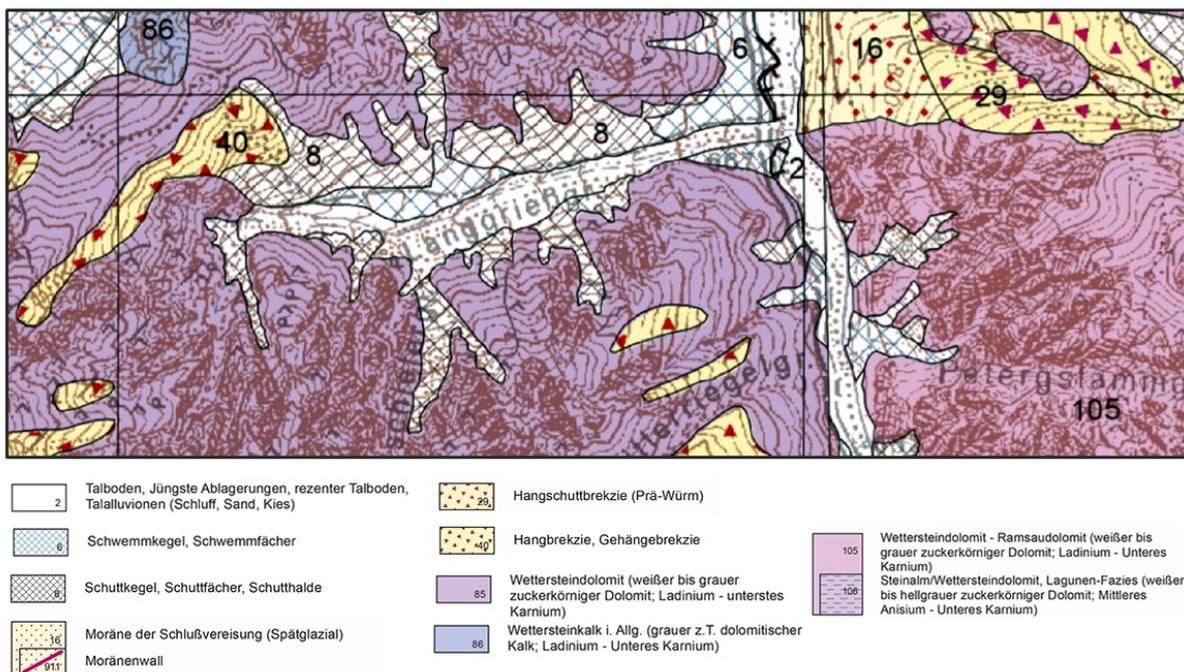


Abbildung 2: Ausschnitt der geologischen Karte Untersuchungsgebiet Langgriesgraben. Die Blattschnittgrenze der Geologischen Karte ist zu berücksichtigen. Durch die Blattschnittgrenze kommt es zur unterschiedlichen Darstellung und Nummerierung der gleichen Lithologie. Veränderte Abbildung nach Datengrundlagen der GBA (2014 a, b).

Die an den Felswänden angrenzenden Hangbereiche sind somit durch mächtige Schutthalden gekennzeichnet. Im Einzugsgebiet des Langgriesgraben sind neben den bereits genannten Gesteinen, Hängebrekzien / Gehängebrekzien zu finden. Der Talboden ist mit jüngeren

Sedimenten verfüllt (GBA 2014 a, b). Entlang des Johnsbach wurden im Rahmen des Projektes Sedin-X geophysikalische Messungen zur Bestimmung der Sedimentmächtigkeit durchgeführt. Eine der durchgeführten Profilmessung liegt dabei nördlich des Langgriesgraben (Straßenkilometer 2,8 der L753), bei dieser Messung wurde eine Sedimentmächtigkeit von etwa 40 m bis 50 m festgestellt (Laurentsich 2016).

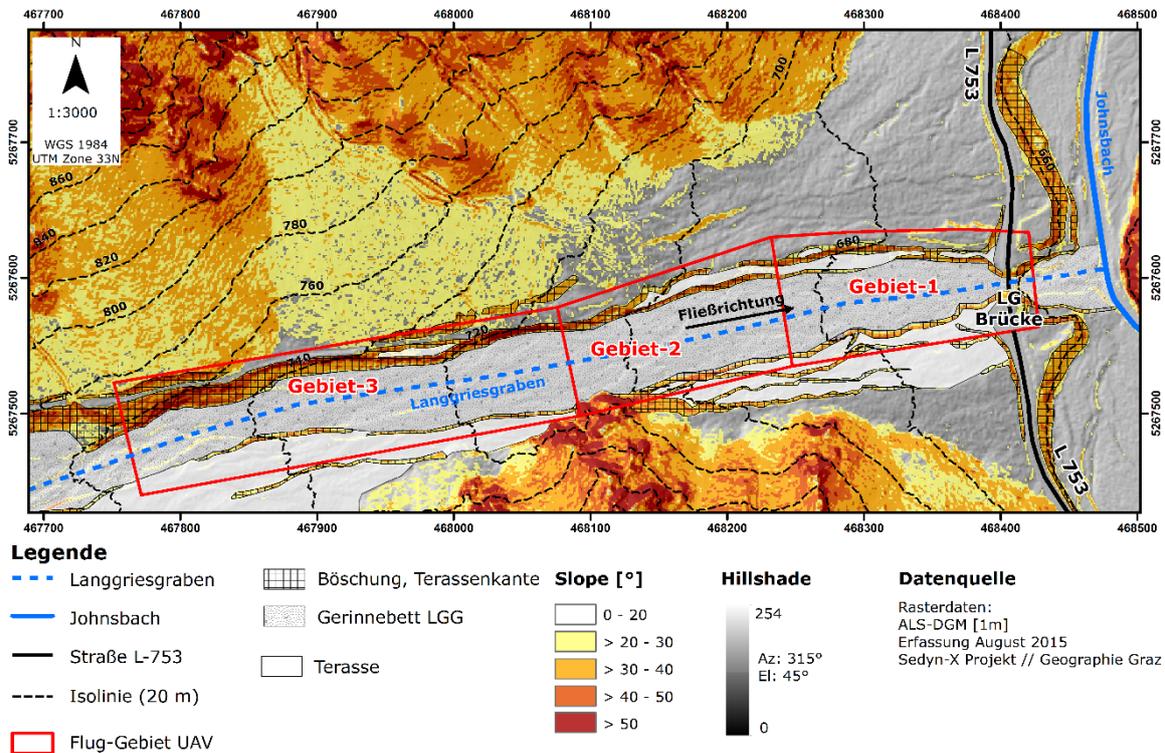


Abbildung 3: Detailansicht vom Untersuchungsgebiet LGG mit den UAV Fluggebieten Gebiet 1 bis Gebiet 3 und der Geländesituation. (Eigene Darstellung)

Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit befindet sich im Gerinnebett des LGG (Abbildung 3). Das Sediment wird durch fluviale Prozesse (insbesondere nach der Schneeschmelze und nach Starkregen) Richtung Vorfluter (Johnsbach) transportiert, die Brücke bildet dabei eine künstliche Engstelle für den Sedimenttransport. Fluviale Strukturen sind im Gelände deutlich erkennbar, siehe dazu etwa Abbildung 4 (C). Die Übergänge vom Gerinne zu den Seitenhängen zeichnen sich zum Teil durch steile Böschungen aus. An diesen Flächen lassen sich deutlich erosive Prozesse erkennen. So wurde z.B. eine Forststraße an der orographisch linken Seite stark erodiert. Ein Eindruck über die Erosion an den Seitenhängen gibt Abbildung 4 (B). Im Untersuchungsgebiet befinden sich zahlreiche Terrassen insbesondere auf der orographisch rechten Seite des LGG. Einige sind aufgrund der hohen Dynamik völlig frei von Vegetation, andere sind mit Gehölzvegetation bewachsen und somit über kürzere Zeiträume hin betrachtet stabil (Kammerer 2006).

2.3 Klimatische Verhältnisse

Die folgenden Aussagen zum Klima im Untersuchungsgebiet basieren auf LUIS (2016) und Wakonigg (1978): Das Untersuchungsgebiet ist der Klimaregion Gesäuse zuzuordnen, genauer gesagt der Klimasubregion G.6 (Gesäuse mit Teilbecken Johnsbach). Die hohe Reliefenergie führt zu Abschirmungseffekten. Die engen Täler sind durch Windarmut geprägt, das Klima kann als Schluchtenklima angesehen werden. Die Besonnung und Schneedeckendauer variiert aufgrund des steilen Reliefs stark. Das Johnsbachtal selbst weicht von diesem Schluchtenklima ab, die Durchlüftung ist erhöht, die tageszeitlichen Temperaturschwankungen sind größer. Der Niederschlag nimmt von West nach Ost merklich zu. Laut ZAMG (2016 a) lassen sich folgende Aussagen anhand von Stationsdaten tätigen: die Jahresmitteltemperatur beträgt für den Zeitraum 1971-2000 an der Station Admont (646 m) 6,6° C und an der Station Hieflau (492 m) 7,6° C. Der Jahresniederschlag für die zuvor genannte Periode beträgt in Admont 1400 mm und in Hieflau 1567 mm. Die durchschnittliche Neuschneemenge beträgt in Admont 141 cm und in Hieflau 251 cm.

Nach Pretenthaler et al. (2010) und Wakonigg (1978) ist das Untersuchungsgebiet den Tallagen im Nordstaugebiet zuzuordnen. Die Witterung ist dabei den Hochlagen im Nordstaugebiet ähnlich. Das Temperaturniveau ist (aufgrund der Seehöhe) im Vergleich zu den Hochlagen höher. Schneereichtum und Niederschlagsreichtum sind jedoch auch für die Tallagen typisch. Das Niederschlagsmaximum liegt im Sommer. Im Winter kommt es häufig zur Bildung von Temperaturinversionen.

Der Klimaatlas Steiermark ist in das Geographische Informationssystem der Steiermark eingebunden. Die folgenden Aussagen basieren daher auf eigenen Messungen im GIS Steiermark (2016 a). Die Jahresmitteltemperatur im LGG-Untersuchungsgebiet beträgt 6,4 °C. Die durchschnittliche Zahl der Tage mit Frost im Einzugsgebiet des Langgriesgrabens beträgt in den Tallagen etwa 135 Tage und in den Hochlagen etwa 230 Tage. Der durchschnittliche Jahresniederschlag beträgt im LGG etwa 1600 mm und in den Hochlagen des Einzugsgebietes etwa 2300 mm. Im Durchschnitt treten im Gebiet 5,3 Tage mit einem Tagesniederschlag größer gleich 30 mm auf.

2.4 Hydrologische Verhältnisse

Hydrologisch lässt sich der Langgriesgraben wie folgt charakterisieren. Der LGG liegt in einem Teileinzugsgebiet des Johnsbachs. Das Teileinzugsgebiet (Reichenstein) umfasst dabei eine Fläche von 350 ha (Holzinger et al. 2012). Die folgenden Angaben basieren auf eigenen

Messungen in GIS-Steiermark (2016 b): Bei Flusskilometer 2,75 des Johnsbaches und einer Seehöhe von rund 650 m mündet der LGG in den Johnsbach. Den höchsten Punkt im Einzugsgebiet bildet mit 2251 m der Admonter Reichenstein. Es ergibt sich somit ein maximaler Höhenunterschied von 1600 m. Einen Eindruck über den Reliefunterschied gibt Abbildung 4 (D). Die beiden Hauptgerinne im Einzugsgebiet (Langgriesgraben und Schwarzschiefergraben) sind im Oberlauf durch sehr steile Schluchten, Rinnen und Felswände gekennzeichnet. Dies ist aus der Abbildung 4 (A) und (D) ersichtlich.

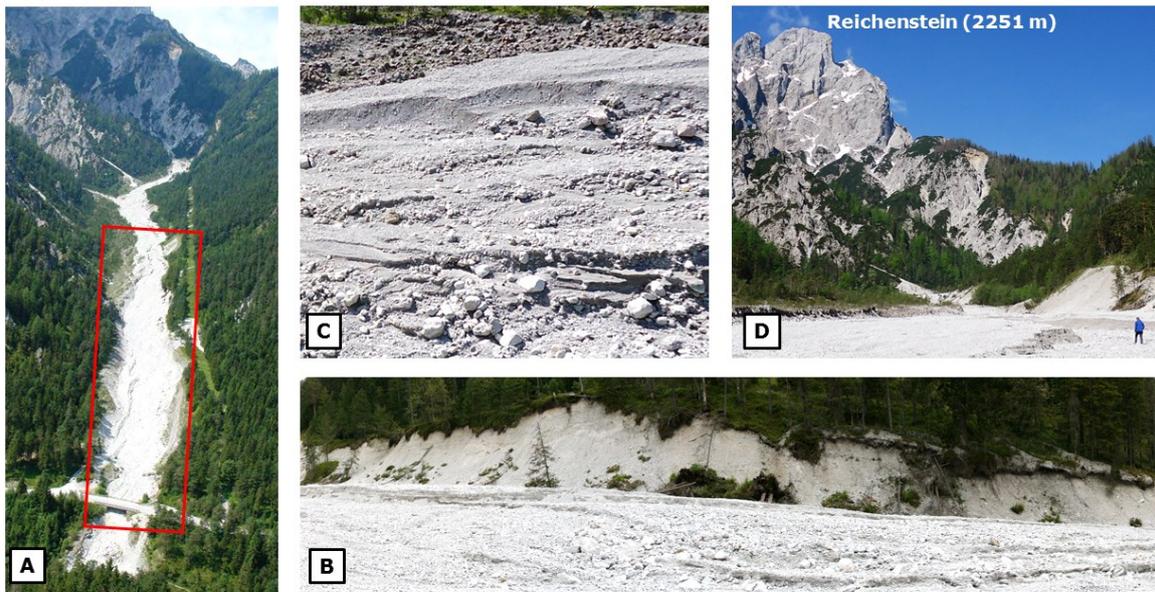


Abbildung 4: Impression aus dem Untersuchungsgebiet: (A) Übersicht Langgriesgraben Untersuchungsgebiet rotes Rechteck, (B) Erosion an der Böschung, (C) Gerinnestruktur und Terrassenbildung und (D) Eindruck vom Reliefunterschied im Einzugsgebiet. (Eigene Darstellung, Bild A verändert aus Holzinger et al. (2012))

Die folgenden Ausführungen zu der Hydrologie im Untersuchungsgebiet basieren auf im wesentlichen auf Haseke (2005 a, b): Schichtgrenzquellen sind vermutlich vorzufinden, wo in den brüchigen Steilwänden Raibler Schichten, Schwarzschiefer und Blauschiefer anstehen. Aufgrund der exponierten Lage wurden die Quellen bei den durchgeführten Quellkartierungen jedoch nicht im Gelände aufgesucht. Das Wasser rinnt über das Festgestein ab und infiltriert relativ schnell in den dolomitischen Schuttkörper. Nur bei erhöhtem Andrang kommt es zu Oberflächenabfluss. Oberflächlicher Abfluss findet vor allem im Frühjahr bei Schneeschmelze und nach Starkregenereignissen statt. Das Wasser folgt dann verschiedenen Fließpfaden durch das Torrentenbett. Die fluvialen Strukturen sind im Gelände deutlich erkennbar. Einen Eindruck über die Gerinnestruktur und die Terrassenbildung kann man sich in der Abbildung 4 (C) machen. Beim Langgriesgraben handelt es sich somit um ein Gerinne mit episodischem Abfluss. Haseke (2005 a, b) konnte bei der Quellkartierung keine

Folgequellen (z.B im Mündungsbereich) nachweisen. Ein ausgeprägter Quellhorizont konnte beidseitig des Mündungsbereiches des Schwarzschiefergrabens festgestellt werden. Das Wasser verschwindet auch dort relativ schnell im Untergrund. Ein weiterer Quellhorizont befindet sich auf 940 m in der Kälberleiten. Diese Quellaustritte erfolgen vermutlich an der Schichtgrenze zwischen dolomitischen Hangbrekzien und den Raibler Tongesteinen. Der Quellbach versickert im Anschluss auf der Höhe des ehemaligen Stichweges in den Untergrund. Der LGG kann nach Fischlschweiger (2004) als Wildbach mit erheblichem Feststoffanteil beschrieben werden. Auf die starke Geschiebeführung wird auch bei Holzinger et al. (2012) hingewiesen.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass das Einzugsgebiet des LGG aufgrund: der vorherrschenden geologischen Verhältnisse (Dolomitgestein, welches stark verwittert) und der damit verbundenen Schuttproduktion, den klimatischen Bedingungen (z.B. hohe Niederschläge) und aufgrund des Reliefs, ein Bereich mit hoher geomorphologischer Aktivität ist. Die Kombination dieser Faktoren führt auch zur starken Geschiebeführung des LGG. Die damit zu erwartenden Oberflächenveränderungen im Gerinne über die Zeit machen den LGG somit zu einem interessanten Untersuchungsgebiet für diese Arbeit. Der nur episodisch vorhandene Abfluss erleichtert die Daten-Auswertung, da die Topographie ohne den „störenden“ Einfluss von permanenten Wasserflächen erfasst werden kann.

2.5 Nutzung

Aus dem Langriesgraben wurde bis in das Jahr 2010 zumindest vereinzelt Schotter entnommen (Holzinger et al. 2012). Laut Kammerer (2006) begann der Abbau vermutlich in der Nachkriegszeit spätestens jedoch in den 1970er Jahren. Nach Fischlschweiger (2004) wurde die gewerbliche Schotterentnahme im Langgriesgraben im Jahr 1991 vertraglich fixiert. Er geht jedoch ebenfalls davon aus, dass im Langgriesgraben bereits früher, insbesondere im Frühjahr (nach der Schneeschmelze) und nach Starkregenereignissen Schotter entnommen wurde. Der Pachtvertrag der Schotterentnahmeflächen endete im Jahr 2005 (Fischlschweiger 2004). Derzeit wird der LGG nicht zur gewerblichen Schotterentnahme genutzt. Eine gewerbliche Nutzung würde den Managementzielen des Nationalparks auch widersprechen.

Haseke (2005 a) verweist darauf, dass der Langriesgraben aufgrund der Schotterentnahmen lateral und longitudinal abgesenkt wurde. Die seitlichen Schuttkörper rutschen dadurch zudem zum Teil nach. Die Erosion an den Seiten des Gerinnes sind aus der Abbildung 4 (B) sehr gut erkennbar. Der untere Bereich des Grabens wird somit als extrem instabil eingestuft. Kammerer (2006) spricht ebenfalls die Eintiefung des Grabens durch die Schotterentnahme an.

Folgende Ausführungen basieren auf Holzinger et al. (2012): Der Geländehöhenunterschied zwischen dem derzeitigen Gerinnebett und der ehemaligen natürlichen Geländeoberfläche beträgt in etwa 3 bis 5 m. Es wird davon ausgegangen, dass die Langgriesgrabenbrücke sich derzeit auf dem Niveau des ehemaligen Schuttkegels befindet. Daraus ergibt sich ein gewisses Gefährdungspotenzial für das Bauwerk und in weiterer Folge auch für die Straße L753. Die L753 bildet dabei die Hauptverbindung nach Johnsbach. Als Zufahrtalternativen stehen ansonsten nur Forststraßen zur Verfügung, die Straße ist somit lokal von Bedeutung.

Es kann festgehalten werden, dass das Untersuchungsgebiet (Unterlauf des LGG) und somit auch der Sedimenthaushalt durch die Nutzung massiv anthropogen beeinflusst ist. Es wird in der Arbeit somit als ein stark vom Menschen gestörtes nicht natürliches System betrachtet. Dies ist bei der Interpretation von Ergebnissen zu berücksichtigen.

3 Theoretische Grundlagen

Kapitel 3 behandelt theoretischen Grundlagen und Methoden der Arbeit: Sedimentdynamik und DoD (Dem of Difference) Methode Kapitel 3.1, UAVs und SfM-MVS Photogrammetrie Kapitel 3.2, Laserscanning (ALS und TLS) Kapitel 3.3 und GNSS Kapitel 3.4.

3.1 Sedimentdynamik und DoD-Methode

Unter dem Begriff Sedimentdynamik wird im Kontext der Arbeit die Erosion, der Transport und die Ablagerung von Sediment innerhalb eines Wildbachsystems verstanden. Zur Quantifizierung der Veränderung des Sedimentkörpers durch Erosion und Deposition von Sediment soll in der Arbeit die DoD-Methode zum Einsatz kommen. James et al. (2012) verwendet für die Methode auch den Begriff geomorphologisches Change Detection (GCD). Die Methode ist zudem auch unter dem Begriff morphometrische Methode oder in der Glaziologie unter dem Begriff geodätische Massenbilanz bekannt. Im GIS-Umfeld ist der Begriff Cut-Fill Analyse für diese Methode weit verbreitet. Morche et al. (2007) verweist darauf, dass sich die morphometrische Methode zur Quantifizierung der Erosion und Akkumulation von Sediment in fluvialen Umgebungen als sehr nützlich erwiesen hat. Die DoD Methode wird in der Fluvialgeomorphologie nach Williams et al. (2012) häufig angewendet zur: (a) Bestimmung von Geröllfracht-Transportraten, (b) zur Interpretation von fluvialen Prozessen, (c) Kartierung von Störungen von ökologischen Flusshabitaten, (d) Validierung von morphologischen Modellen und (e) Erstellung von Sedimentbudgets. Die DoD-Methode benötigt dabei Geländemodelle von zumindest zwei unterschiedlichen Zeitpunkten (Williams et al. 2012). Morche et al. (2007) verwendet zur Erstellung eines Sedimentbudgets in einem alpinen Wildbach die DoD Methode. Die Geländemodelle wurden dabei aus Tachymeter Messungen erstellt. Rascher und Sass (2016) verwenden multitemporale TLS-Geländemodelle zur Erstellung von Sedimentbudgets ebenfalls in alpinen Wildbächen. Aus UAV-Bilddaten können DGMs mit hoher geometrischen und zeitlichen Auflösung erstellt werden (z.B. Harwin und Lucieer 2012, Hugenholtz et al. 2013, Woodget et al. 2015). UAV-Daten besitzen somit grundsätzlich ein bestimmtes Potenzial für die zuvor genannten Anwendungsbereiche. Die weitere Beschreibung der DoD-Methode erfolgt im Zuge der praktischen Umsetzung der Methode in Kapitel 4.4.

3.2 UAVs und SfM-MVS Photogrammetrie

3.2.1 UAVs

UAVs sind nach Van Blyenburgh (1999) unbemannte, wiederverwendbare und motorisierte Luftfahrzeuge. Zudem sind die Begriffe, Remotely Piloted Vehicle (RPV), Remotely Operated Aircraft (ROA), Remotely Piloted Aircraft (RPA) und Drohne üblich (Eisenbeiß 2009). Im Luftfahrtgesetz (LFG) von Österreich wird der Begriff Unbemanntes Luftfahrzeug verwendet (RIS 2016). Die Begriffe UAS (Unmanned Aerial Systems) und RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) hingegen meinen meist das gesamte System nicht nur das Fluggerät. Neben dem Fluggerät (UAV) welches meist mit zahlreichen Sensoren ausgestattet ist, besteht ein UAS aus weitere Komponenten, dazu zählen: Bodenstation, Fernsteuerung, Kommunikation und Payload z.B. Fernerkundungssensor (Colomina und Molina 2014). Häufig werden die genannten Begriffe jedoch synonym verwendet und die verwendeten Akronyme sind teilweise auch mehrdeutig. Der Autor der Arbeit verwendet daher in weiterer Folge aus Gründen der Konsistenz den Begriff UAV/UAVs, unter dem Begriff werden sowohl das Fluggerät, als auch alle damit verbunden Systemkomponenten verstanden. Aus der Perspektive der Fernerkundung betrachtet, können UAVs als Trägerplattform von Sensoren gesehen werden. Dabei ist anzumerken, dass Fernerkundungsanwendungen nur einen kleinen Anwendungsbereich von UAVs darstellen und die Entwicklung von UAVs nicht primär für den Fernerkundungsbereich erfolgte. Dies ändert nichts an der Tatsache, dass UAVs aktuell ein sehr dynamisches Feld innerhalb der Fernerkundung darstellen (Toth und Jozkow 2016). In weiteren Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass UAVs primär zur Geodatenerfassung eingesetzt werden.

UAVs lassen sich nach Eisenbeiß (2009) wie folgt kategorisieren: mit Antrieb und ohne Antrieb, in „leichter wie Luft Systeme“ und „schwerer wie Luft Systeme“ und in die Kategorien Flexible Wing, Fixed Wing und Rotary Wing. Van Blyenburgh (2013) hat ein umfangreiches Inventar an UAVs erstellt und teilt diese nach Größe, Gewicht, Einsatzreichweite und notwendiger Zertifizierung ein. Ob eine direkte Georeferenzierung der Bilddaten möglich ist oder nicht, wäre eine weitere Einteilungsmöglichkeit (Eisenbeiß 2009). Diese Einteilung ist vor allem aus der Perspektive der Photogrammetrie sinnvoll. Hackney und Clayton (2015) unterscheidet bei UAVs für geomorphologische Anwendungen zwischen dem Typ Fixed Wing und Rotary Wing. Colomina und Molina (2014) unterteilt UAVs hauptsächlich nach dem Gewicht: Micro (weniger als 5 kg), Mini (weniger als 30 kg), und Tactical (weniger als 150 kg). Für die Geodatenerfassung kommen häufig Micro und Mini

UAVs zum Einsatz (Pajares 2015, Whitehead et al. 2014). Man kann festhalten, dass kein einheitliches System zur Klassifikation der UAVs existiert. Betrachtet man die Anforderungskriterien einer Geodatenerfassung (z.B. das Einhalten einer bestimmten Längs- und Querüberdeckung der Luftbilder), wäre auch eine Einteilung in Systeme, bei deren ein kontrollierter Wegpunktflug möglich oder eben nicht möglich ist, denkbar.

Nach Eisenbeiß und Sauerbier (2011) kann man drei Flugmodi bei UAVs unterscheiden, manueller Modus, semiautomatisch bzw. unterstützter Modus und autonomer Flugmodus. Die meisten UAVs verfügen mittlerweile über eine Wegpunktflugfunktion und fliegen zumindest teilweise autonom. Einige UAVs ermöglichen einen völlig autonomen Flug. Für beide Fälle sind ein Autopilot und umfangreiche Navigationssensoren notwendig. Zur Navigation werden GNSS Sensoren, Barometer, Magnetometer, Beschleunigungssensoren und Gyroskope eingesetzt (Colomina und Molina 2014). Auf weitere technische Aspekte wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Die Fernsteuerung ist eine weitere Komponente eines UAVs, über diese erfolgt primär die manuelle Kontrolle (z.B. Steuerung) des Fluggerätes. Die folgenden Ausführungen basieren, wenn nicht anders angegeben auf Colomina und Molina (2014): UAVs verfügen meist über eine Bodenstation, diese dient primär zur Überwachung des Flugs. Es werden zum Beispiel die aktuelle Position, der Akkuzustand, Fehlermeldungen, der Flugmodus, häufig auch Livebilder vom Fluggerät an die Bodenstation übertragen. Zum Teil können auch Befehle oder zumindest Daten (z.B. der Flugplan) von der Bodenstation an das Gerät übertragen werden. Die Bodenstation besteht in der Regel aus Hardware Komponenten (Funkantenne, Rechner und Bildschirm) und einer entsprechenden Software zur Flugüberwachung. Zudem können die Funksteuerung und die Bodenstation auch kombiniert werden. In der Flugüberwachungssoftware ist häufig auch eine Flugplanungssoftware integriert. Die Flugplanung wird im praktischen Teil dieser Arbeit näher behandelt. Zudem muss eine Kommunikation zwischen Fluggerät, der Bodenstation und der Funksteuerung gegeben sein, dies ist der Kommunikationsteil eines UAV und spielt für die Flugsicherheit eine wichtige Rolle.

Bezüglich der verwendeten Fernerkundungssensoren auf UAVs lässt sich folgendes feststellen, am häufigsten kommen handelsübliche Kameras als Sensor zum Einsatz. Diese sind günstig, relativ leicht, nehmen im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums Bilder auf und sind im Vergleich zu einer Luftbildkamera geometrisch instabil. Zudem werden handelsübliche Kameras oft so modifiziert, dass Aufnahmen im Nahen Infrarot erfolgen können (z.B. Bühler et al. 2016). Zahlreiche Sensorhersteller haben auch Multispektralkameras, Hyperspektralkameras und Thermalkameras für UAVs entwickelt.

Größe und Gewicht sind meist limitierende Faktoren. Mittlerweile gibt es auch aktive Fernerkundungssensoren z.B. Laserscanner und Radarverfahren welche zum Einsatz auf UAVs geeignet sind. Die rechtliche Situation zum Betrieb von UAVs ist in einzelnen Länder recht unterschiedlich (Hackney und Clayton 2015). Weltweit sind folgende gesetzliche Einschränkungen am häufigsten anzutreffen, Sichtflug und eine maximal erlaubte Flughöhe von 150 m über Grund. Anwendungen sind somit neben technischen Grenzen, häufig rechtliche Grenzen gesetzt (Toth und Jozkow 2016). In Österreich wurde das Luftfahrtgesetz mit 01.01.2014 novelliert und der Betrieb von einem ULFZ ist seitdem gesetzlich geregelt (RIS 2016). Neben dem Luftfahrtgesetz sind bei einer UAV Datenerfassung meist weitere rechtliche Aspekte zu beachten. Zu diesen zählen, Datenschutzbestimmungen, Einhaltung von Sicherheitszonen, Naturschutz, Zustimmung der Grundeigentümer zum Betreten einer Liegenschaft (Austro Control 2015). Die meisten dieser weiteren Aspekte gelten generell für Feldarbeiten und werden daher im Rahmen dieser Arbeit nicht näher behandelt.

Die folgenden Ausführungen basieren auf RIS (2016) und Austro Control (2015): Im LFG wird zwischen Flugmodellen, Unbemannten Geräten bis zu 79 Joule maximaler Bewegungsenergie, Unbemannten Luftfahrzeugen der Klasse 1 und Unbemannten Luftfahrzeugen der Klasse 2 unterschieden. Sobald Luftaufnahmen gemacht werden, sind Modellflugzeuge per Gesetz eigentlich Unbemannte Luftfahrzeuge. Unbemannte Geräte bis zu 79 Joule maximaler Bewegungsenergie und damit verbundene rechtliche Einschränkungen (z.B. maximal erlaubte Flughöhe von 30 m) und technische Einschränkung (z.B. sehr geringe Payload) spielen für die Geodatenerfassung kaum eine Rolle. Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1 benötigen eine Betriebsbewilligung der Austro Control. Für die Klasse 2 gelten Bestimmungen wie für zivile Luftfahrzeuge, überdies ist ein Pilotenschein notwendig.

	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

Abbildung 5: Kategorien A-D für Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1 samt Einsatzgebiet und Betriebsmasse für Unbemannte Luftfahrzeuge Austro Control (2015).

In weiterer Folge wird daher nur auf die Klasse 1 näher eingegangen. Das Gewicht des Fluggerätes darf 150 kg nicht übersteigen, beim Flug muss permanenter Sichtkontakt bestehen und eine Flughöhe von 150 m über Grund darf nur mit einer Sondererlaubnis überschritten werden. Neben diesem groben Rahmen wurden im Gesetz Kategorien gebildet. Jede Kategorie ist mit dementsprechenden Anforderungen an Fluggerät und Pilot verbunden. Die angesprochene Kategorisierung ist aus der Abbildung 5 ersichtlich.

Für den eingesetzten Hexacopter in dieser Arbeit liegt ein Bescheid für die Kategorie A vor. Nachdem das Fluggerät samt Payload kleiner gleich 5 kg wiegt, kann es im unbebauten und unbesiedelten Gebiet eingesetzt werden. Betrachtet man die veröffentlichte Liste der zugelassen unbemannten Luftfahrzeuge in Österreich (Austro Control 2016) so wird klar, dass die meisten zugelassen ULFZ einen Bescheid für die Kategorie A besitzen. Auf weitere rechtliche Details wird nicht näher eingegangen. Es kann festgehalten werden, dass in Österreich wie in zahlreichen anderen Ländern Anwendungen mit UAVs jedenfalls klare rechtliche Grenzen gesetzt sind.

3.2.2 SfM-MVS Photogrammetrie

Aufgrund der speziellen Eigenschaften von UAV Daten (instabile Kamerageometrien, unregelmäßige Luftbildblockstrukturen und häufig relativ große geometrische und radiometrische Variationen) waren klassische photogrammetrische Softwarepakete in der Vergangenheit oft nur eingeschränkt zur Auswertung von UAV Daten geeignet. UAV Bilddaten sind klassischen Luftbilddaten zwar ähnlich, es treten jedoch typische Effekte wie bei photogrammetrischen Aufnahmen aus dem Nahbereich auf (Colomina und Molina 2014). Algorithmen und Ansätze aus der Computer Vision wie etwa SfM haben jedenfalls zu Fortschritten in der Auswertung von UAV Aufnahmen und zur 3-D Modellierung aus Bildern im Allgemeinen geführt (Westoby et al. 2012, Colomina und Molina 2014, Micheletti et al. 2015 a). Die folgenden Aussagen basieren auf Smith et al. (2016): Die meisten derzeit verfügbaren Softwarepakete enthalten dabei sowohl Algorithmen, welche ihren Ursprung in der Computer Vision haben, als auch Algorithmen der „klassischen“ Photogrammetrie wie z.B. MVS Algorithmen zum Verdichten der Punktwolke. Die Methode wäre daher treffender als SfM-MVS zu bezeichnen, da SfM im engeren Sinn nur einen kleinen Teil der gesamten Prozessierung bezeichnet. In der Literatur ist der Begriff SfM-Photogrammetrie jedoch häufig zu finden (z.B. Westoby et al. 2012, Micheletti et al. 2015 a). Eisenbeiß (2009), der einem klassischen photogrammetrischen Ansatz folgt, spricht von UAV Photogrammetrie. Nach Westoby et al. (2012) lassen sich folgende Feststellungen zur Methode machen: das

Grundprinzip der SfM Methode aus überlappenden Bildern (stereoskopischen Bildern) 3D Information abzuleiten ist ident mit dem klassischen Ansatz der Stereo-Photogrammetrie. Der wesentliche Unterschied der SfM-Methode liegt darin, dass die interne Geometrie, die Lage und Orientierung der Kamera aus der Bildinformation ohne a priori Information bestimmt werden kann.

Hierbei ist anzumerken, dass dieser Vorgang üblicherweise im Bildraum und nicht im Objektraum erfolgt. Um metrische Aussagen tätigen zu können muss zumindest eine Skalierung der abgeleiteten Modelle erfolgen (Micheletti et al. 2015 a). Die Bildüberlappungen sind üblicherweise bei SfM-MVS Aufnahmen sehr groß (Smith et al. 2016).

Die interne Geometrie wird dabei in der Photogrammetrie üblicherweise als innere Orientierung, die Lage und Orientierung im Raum als äußere Orientierung bezeichnet. Zur Georeferenzierung bzw. Orientierung von Bilddaten stehen in der „klassischen“ Photogrammetrie nach Toth und Jozkow (2016) drei Ansätze zur Verfügung: (a) direkte Georeferenzierung durch ein GPS-IMU (Inertiale Messeinrichtung) System, (b) indirekte Georeferenzierung durch Verknüpfungspunkte (Tie Points) und Passpunkte (GCP), (c) Integrierte Sensor Orientierung eine Kombination aus Ansatz (a) und (b).

Abbildung 6 soll groben Überblick über einen typischen SfM-MVS Workflow basierend auf Smith et al. (2016) unabhängig von der verwendeten Software zur Prozessierung der Daten geben. Der vorgestellte Workflow ist zudem auch unabhängig von der eingesetzten Aufnahmeplattform. Es kann angemerkt werden, dass gerade bei kommerziellen Softwarepaketen oder webbasierten Diensten der exakte Workflow und die eingesetzten Algorithmen meist nicht bekannt sind. Es handelt sich somit um Blackbox Systeme, welche ein tieferes Verständnis der Methode und das Abschätzen von Unsicherheit erschweren. Diese Punkte treffen auch auf die in dieser Arbeit eingesetzte Software Agisoft Photoscan zu.

Die nun folgenden Ausführungen zum prinzipiellen SfM-MVS Workflow basieren, wenn nicht anders angegeben, auf Smith et al. (2016) und Westoby et al. (2012): in einem ersten Schritt werden in den Bildern Features (Keypoints) gesucht, wobei die Punktdeskriptoren dabei unabhängig von Maßstab, Orientierung und der Perspektive sind und somit auch für weite Basislinien funktionieren. In der Computer Vision wurden Algorithmen zur Lösung dieser komplexen Problemstellung entwickelt. Der SIFT (Scale Invariant Feature Transform) Operator kommt dabei häufig zum Einsatz. Dieser wurde von Lowe (1999) erstmals publiziert und ist einer von vielen derartigen Algorithmen. Im Anschluss erfolgt die Suche nach korrespondierenden Punkten (Keypoints) zwischen den Bildern (Feature Matching), wobei verschiedene Methoden zur Bewerkstelligung dieses Arbeitsschrittes existieren. Die Matches

sind nicht frei von Fehlern und werden daher gefiltert bzw. geprüft. Fehlerhafte bzw. ungenaue Verknüpfungen werden in weitere Folge gelöscht. Anhand der gefilterten korrespondierenden Punkten werden in weiterer Folge beispielsweise durch einen Bündelblockausgleich, die Geometrie (Struktur) einer Szene, die innere Orientierung der Kamera und die äußere Orientierung der Kamera (im Bildraum) bestimmt. Dieser Arbeitsschritt bildet im engeren Sinn den SfM Teil. In zahlreichen Softwarepaketen wird dies zu Beginn nur für das Bildpaar mit den meisten gemeinsamen Keypoints durchgeführt. Im Anschluss wird das nächste Bild hinzugefügt und die Berechnung erfolgt erneut. Dieser Vorgang wird wiederholt bis alle Bilder orientiert sind.

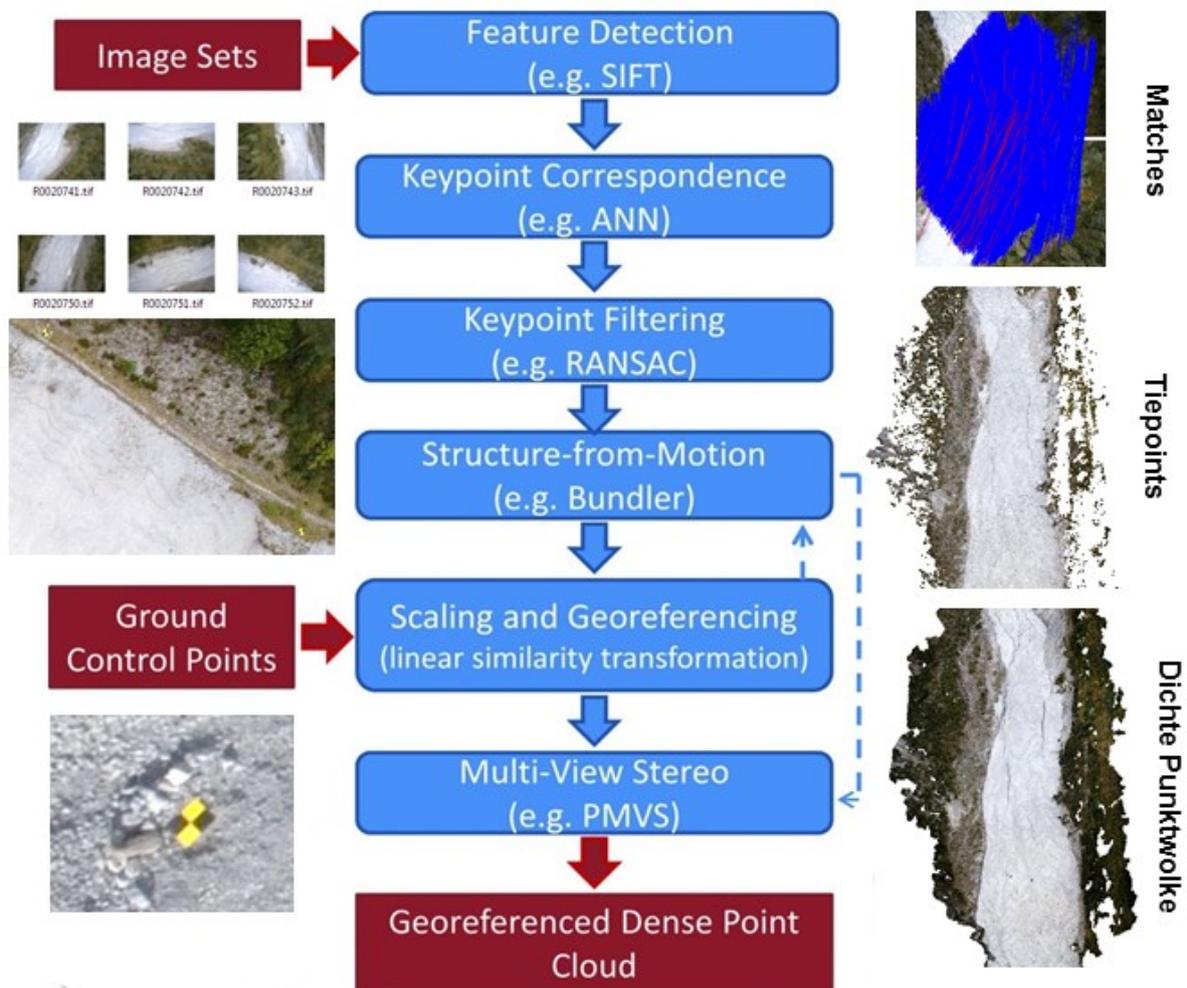


Abbildung 6: Typischer SfM-MVS Workflow. Veränderte Abbildung basierend auf Smith et al. (2016).

Die daraus berechneten Punktwolken sind nicht skaliert und die Einheit der Koordinaten sind zudem willkürlich (arbitrary units). Für weitere Auswertungen (Ausnahme sind z.B. reine Visualisierungen) findet zumindest eine Skalierung der Punktwolke statt, bei UAV Auswertungen in der Regel auch eine Georeferenzierung. Die Georeferenzierung erfolgt häufig über Passpunkte und eine 7-Parameter Helmert Transformation (drei

Translationsparameter, drei Rotationsparameter und ein Skalierungsparameter). Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit der direkten Georeferenzierung oder der Kombination aus direkter und indirekter Georeferenzierung (Integrierte Sensor Orientierung). Passpunkte werden meist auch zur Optimierung der Kamerakalibration und zur Verbesserung der Szenengeometrie verwendet.

Im letzten Schritt wird die bestehende Punktwolke wesentlich verdichtet. Dabei kommen Multi-View Stereo Matching-Algorithmen zum Einsatz. Der Prozess ist sehr rechenintensiv, es wurden daher Verfahren zur Optimierung der Rechenzeit wie z.B. das Clustering Views for Multi-View Stereo Verfahren entwickelt. Endergebnis bildet eine digitale georeferenzierte Punktwolke. Auf die Erstellung von Geländemodellen aus den georeferenzierten SfM-MVS Punktwolken wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

3.2.3 Anwendungen von UAVs und SfM-MVS

Das folgende Kapitel gibt einen kurzen Überblick über aktuelle Anwendungsmöglichkeiten von UAVs und SfM-MVS. Eine umfassende Zusammenstellung von UAV Anwendungen findet sich bei Pajares (2015) und Colomina und Molina (2014). Die Methode wurde in Kapitel 3.2.2 bereits näher vorgestellt. Eine gute Übersicht über Anwendungen und die SfM-MVS Methode mit geomorphologischem Hintergrund sind bei Smith et al. (2016) und Westoby et al. (2012) zu finden. Generell kann gesagt werden, dass es mittlerweile eine Vielzahl von Publikationen gibt wo UAVs und SfM-MVS zur Erforschung der: Lithosphäre, Pedosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre, Kryosphäre, Atmosphäre und Anthroposphäre eingesetzt werden. Aufgrund des thematischen Hintergrundes dieser Arbeit, werden in weitere Folge Studien ausschließlich aus dem fluvialen Bereich vorgestellt. Tabelle 1 soll dabei einen Überblick über durchgeführte Arbeiten, den Inhalt der jeweiligen Studien, die dabei eingesetzten Sensorplattformen und die Lage des jeweiligen Untersuchungsgebietes geben. Es wurden in der Tabelle auch Studien berücksichtigt welche zur Datenerfassung kein UAV einsetzen, aber den SfM-MVS Ansatz folgen und für die Datenaufnahme nicht metrische Kameras einsetzen.

Tabelle 1: Zusammengestellte Literaturübersicht SfM-MVS mit terrestrischen Plattformen, UAVs und bemannten Plattformen in fluvialen Untersuchungsgebieten.

Publikation	Inhalt	Plattform	Study Area
Adams et al. (2016) High resolution debris flow volume mapping with Unmanned Aerial Systems (UAS) and photogrammetric techniques	Sediment Budget in einem Wildbacheinzugsgebiet nach Murgang Ereignis und Quantifizierung der Murgang Ablagerung im Talbereich, Pre-Event ALS DGM und Post-Event UAV DGM	Fixed Wing und Multirotor	Einzugsgebiet Seigesbach und Ortsteil von Sellrain Tirol Österreich

Dietrich (2014) Applications of Structure-from-Motion Photogrammetry to Fluvial Geomorphology	DGM Erstellung in fluvialer Umgebung mit SfM, Validierung von SfM Daten, Vergleich SfM Daten mit TLS Daten, Change Detection auf unterschiedlichen Maßstabsebenen (100 m ² bis mehrere km ²), Schwerpunkt auf Methoden	Hubschrauber und Terrestrisch	Granite Boulder Creek und Middle Fork John Day River Oregon USA
Flener et al. (2013) Seamless Mapping of River Channels at High Resolution Using Mobile LiDAR and UAV-Photography	Kombination mobiler Laserscanner mit UAV Photogrammetrie, Bathymetrie erstellt aus den UAV Bildern, Validierung durch zahlreiche Zusatzdaten z.B. GPS, Change Detection des Gerinnebetts	Modell-hubschrauber	Fluss Pulmanki Lappland Finnland
Fonstad et al. (2013) Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement	DGM Erstellung in einer fluvialen Umgebung, Vergleich SfM mit TLS, Validierung mit GPS, Schwerpunkt auf Methoden	Manuell gesteuerter Helikopter	Pedernales River Texas USA
Hervouet et al. (2011) Analysis of Post-Flood Recruitment Patterns in Braided-Channel Rivers at Multiple Scales Based on an Image Series Collected by Unmanned Aerial Vehicles, Ultra-light Aerial Vehicles, and Satellites	Vegetationsdynamik in einem Braided River, verschiedene Maßstabsebenen zur Kartierung der Vegetation, UAV Daten lokal bis Satelliten Daten regional, Zeitreihe der Daten	Gleitschirm-System und Bemannter Paragleiter mit Motor	Drome und Durance Einzugsgebiet Frankreich
Jaud et al. (2016) Assessing the Accuracy of High Resolution Digital Surface Models Computed by PhotoScan and MicMac	Softwarevergleich, Vergleich mit TLS, Geländemodell- und Orthophotoproduktion in einem Gerinne mit episodischer Wasserführung und komplexer Topographie	Multirotor	Insel Reunion Frankreich
Javernick et al. (2014) Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry	DGM Erstellung in einer fluvialen Umgebung, Bathymetrie aus der Bildinformation, Validierung mit GPS und Sonar Bathymetrie, Methoden Schwerpunkt	Hubschrauber	Ahuriri Einzugsgebiet Neuseeland
Javernick et al. (2015) Numerical Modelling of braided rivers with Structure-from-Motion derived terrain models	SfM Geländemodelle eines Braided Rivers als Eingangsdatensatz für eine hydrodynamische Modellierung mit hoher räumlicher Auflösung	Hubschrauber	Ahuriri Einzugsgebiet Neuseeland
Lejot et al. (2007) Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform	Bathymetrie aus den UAV Bildern, photogrammetrische DGM Erstellung von Schotterbänken	Gleitschirm-System	Ain und Drome Fluss Frankreich
Micheletti et al. (2015 b) Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone	Softwarevergleich, Vergleich mit TLS, Smartphone vs. Spiegelreflexkamera, Anwendungsbeispiele (Nahbereich sehr kleinräumig) Flussufer und (größere Distanz Kamera Objekt, großräumiger) Alluviale Schuttfächer, Methoden Schwerpunkt	Terrestrisch	Wallis Schweiz

Mirijovsky et al. (2015 a) Spatiotemporal evolution of a unique preserved meandering system in Central Europe – The Morava River near Litovel	UAV Bilder in Zeitreihe mit zahlreichen weiteren Geodaten, Analyse der Mäander und Flusssufer Veränderung	Multirotor	Fluss Morava Tschechien
Mirijovsky et al. (2015 b) Multitemporal Monitoring of the Morphodynamics of a Mid-Mountain Stream Using UAS Photogrammetry	DGM Erstellung in einer fluvialen Umgebung, auf relativ kleinen Flächen Geomorphologisches Change Detection, Quantifizierung der Ufererosion	Multirotor	Upper Vydra Basin Tschechien
Smith et al. (2014) Reconstructing flash flood magnitudes using Structure-from-Motion: A rapid assessment tool	Geländemodellerstellung mit SfM in fluvialer Umgebung, Anwendbarkeit für die Hochwasserkartierung in Vergleich zu herkömmlichen Methoden, SfM Modelle und abgeleitete Produkte für hydraulische Modellierung, Best Practice Workflow wird angeführt	Terrestrisch	Barranco del Prado Spanien
Tamminga et al. (2014) Hyperspatial remote sensing of channel reach morphology and hydraulic fish habitat using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A first assessment in the context of river research and management	Gewässermorphologie, Flusshabitate hydrologisch charakterisiert, DGM Erstellung, Bathymetrie, Eingangsdaten für eine hydraulische Modellierung, Anwendbarkeit der Methode in Vergleich zu alternativen Methoden	Multirotor	Elbow River Alberta Kanada
Tamminga et al. (2015) UAS-based remote sensing of fluvial change following an extreme flood event	Geomorphologisches Change Detection mit UAV Daten, Validierung der Modelle mit GPS, DGM vor und nach einem Hochwasser, Hydraulische Modellierung, Vergleich Ergebnis Hydraulisches Modell mit beobachteter Veränderung	Fixed Wing und Multirotor	Elbow River Alberta Kanada
Williams et al. (2013) Hyperscale terrain modelling of braided rivers: fusing mobile terrestrial laser scanning and optical bathymetric mapping	Mobiler terrestrischer Laserscanner und Digitale Bilder, Wassertiefe aus Bildinformation und Referenzdaten, Bathymetrie, Wasseroberfläche aus TLS, Gerinnetopographie (nicht unter Wasser) aus TLS, Fusionsmethode der Daten, Validierung der Daten, Herausforderungen und Probleme	Hubschrauber	Rees River Neuseeland
Woodget (2015) Quantifying physical river habitat parameters using hyperspatial resolution UAS imagery and SfM-photogrammetry	Hydromorphologische Parameter z.B. Topographie Über- und Unterwasser, Substratgröße Überwasser und Fließtypen quantifiziert in drei Flusshabitaten mit SfM und UAVs Validierung der Methode und der erzeugten Daten, Vergleich mit anderen Methoden Einsetzbarkeit der Methode	Multirotor	San Pedro River Chile, River Arrow und Coledale Beck England

In den meisten angeführten Studien wurde zur Datenerfassung eine Digitalkamera verwendet, welche im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums aufnimmt. Die innere Orientierung der Kamera wird zudem meist über eine Selbstkalibrierung bestimmt. In keiner der angeführten Studien wurden aktive Sensoren von einem UAV aus angewendet. Die

Georeferenzierung findet in allen Studien über Passpunkte und nicht über direkte Georeferenzierung statt. Die Passpunkte werden dabei in den meisten Arbeiten über eine GNSS Messung bestimmt. Meist wurden digitale RGB codierte Punktwolken und DGMs (Digitale Geländemodelle) erzeugt, die erstellten Orthophotomosaiken dienen häufig nur der Übersichtsdarstellung. Einige Studien verwenden die Bildinformation auch zur Bestimmung der Unterwassertopographie (Bathymetrie für seichte und klare Gewässer). Der überwiegende Anteil der Untersuchungsgebiete ist zudem durch eine geringe Vegetationsbedeckung gekennzeichnet. Nicht alle Studien folgen dem SfM-MVS Ansatz, zum Teil werden auch herkömmliche photogrammetrische Auswertverfahren angewendet.

3.2.4 Vorteile und Nachteile von UAV Daten

Im folgenden Kapitel wird versucht die Stärken und Schwächen von UAV Daten herauszuarbeiten. Der thematische Hintergrund der Arbeit (Sedimentdynamik) wird dabei berücksichtigt. Unter dem Begriff UAV Daten werden in diesem Zusammenhang Bilddaten verstanden, welche von einem UAV aus und durch passive Fernerkundungssensoren (primär digitale Kameras) aufgenommen werden. Der Autor ist sich der Tatsache bewusst, dass mittlerweile auch aktive Sensoren von UAVs aus eingesetzt werden. Aus den Daten abgeleitete Produkte z.B. digitale photogrammetrische Punktwolken sind dabei ebenfalls im Begriff inkludiert. Der Schwerpunkt der Betrachtung bezieht sich dabei auf Micro UAVs (weniger als 5 kg) und Mini UAVs (weniger als 30 kg), Einteilung nach Colomina und Molina (2014), welche typischerweise für zivile Anwendungen und im Umweltmonitoring zum Einsatz kommen.

Ein klarer Vorteil von UAVs liegt darin, dass aufgrund der relativen niedrigen Flughöhe geometrische hochaufgelöste Bilddaten (wenige cm bis in den Subzentimeterbereich) erfasst werden können (z.B. Harwin und Lucieer 2012, Hugenholtz et al. 2013, Woodget et al. 2015). Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit zur Erfassung von Geodaten mit hoher zeitlicher Auflösung (Hugenholtz et al. 2013, Woodget 2015). Das Beobachtungsintervall oder der Beobachtungszeitpunkt lässt sich zudem flexibel an die jeweilige Fragestellung anpassen. Im Kontext der Arbeit wäre z.B. eine ereignisbezogene Befliegung (nach Starkregenereignissen, mit dementsprechendem Abfluss im Gerinne und Mobilisierung von Sediment) denkbar. In Phasen mit weniger Aktivität könnte die Beobachtungsfrequenz verringert werden. Von zahlreichen Firmen wurden oder werden multispektrale Fernerkundungssensoren speziell für UAVs entwickelt (Colomina und Molina 2014), durch diese Entwicklungen wird auch die Erfassung von UAV Daten mit hoher spektraler Auflösung ermöglichen. Ist man an etwa an

der Vegetationsdynamik in fluvialen Umgebungen interessiert (z.B. die Hervouet et al. 2011), liefern multispektrale Daten sicherlich einen Mehrwert. Gerade für relativ kleine Untersuchungsgebiete eröffnen UAVs die Möglichkeiten zur kostengünstigen Geodatenerfassung (Woodget 2015).

Nach Eisenbeiß (2009) verfügen UAVs über die folgenden weiteren Vorteile: Der Einsatz in Risikozonen ohne Menschenleben zu gefährden ist möglich. Die Erfassung von unzugänglichen Gebieten wird ermöglicht. Die Bilddatenerfassung in Gebieten wo kein bemanntes Fluggerät vorhanden ist oder keine Flugerlaubnis für bemannte Flüge gegeben wird kann durch UAVs grundsätzlich erfolgen. Eine Datenerfassung ist aufgrund der geringen Flughöhe auch bei starker Bewölkung durchführbar. Zu diesem Punkt kann ergänzt werden, dass grundsätzlich die Beleuchtungsverhältnisse für die Bildaufnahme mit UAVs stärker vom Nutzer berücksichtigt werden können als bei herkömmlichen Fernerkundungsdaten. Die Datenerfassungsmethode ist relativ schnell. Bei Einsatz von low cost Systemen und der Erfassung von relativ kleinen Flächen ist die Methode zudem sehr kostengünstig. Multirotorsysteme brauchen nur eine relativ kleine Start- und Landefläche, dieser Aspekt ist besonders bei komplexer Topographie, etwa im Hochgebirge, von Bedeutung.

Die photogrammetrisch abgeleiteten Punktwolken sind in der Regel sehr dicht, detailreich, regelmäßig und beinhalten neben der geometrischen Information auch die Farbinformation aus den Bilddaten (z.B. Niethammer et al. 2012, Mancini et al. 2013, Lucieer et al. 2014 a, b). Die Farbinformation kann in weiterer Folge zur Klassifizierung der Punktwolke genutzt werden (z.B. Anders et al. 2016, Neugirg et al. 2016). In fluvialen Umgebungen kann die Bildinformation zudem zur Abgrenzung in Wasser und nicht Wasser Bereiche genutzt werden (z.B. Woodget et al. 2015). Aus den Bilddaten ist zumindest bei geringen Wassertiefen und geringer Trübung die Erfassung der Unterwassertopographie (optische Bathymetrie) flächendeckend möglich (z.B. Lejot et al. 2007, Tamminga et al. 2014, Woodget et al. 2015, Woodget 2015).

Ein weiterer Vorteil ist, dass zahlreiche Systeme die Kamera schwenken können und somit sowohl Senkrechtaufnahmen, als auch Schrägaufnahmen z.B. von vertikalen Strukturen wie Felswänden möglich sind (z.B. Salvani et al. 2016). Die meisten UAVs bewegen sich mit einer relativ geringen Geschwindigkeit, Multirotorsysteme besitzen zudem die Möglichkeit an einer Position zu schweben, beide Eigenschaften wirken sich dabei positiv auf die Bildaufnahme aus (Hardin und Jensen 2011).

Der Einsatz von UAV Daten ist jedoch auch mit einigen Herausforderungen bzw. Nachteilen verbunden. Die folgenden Ausführungen basieren auf Eisenbeiß (2009): Speziell bei Micro UAVs und Mini UAVs ist die Größe und das Gewicht der Payload stark limitiert, es kommen somit häufig kleinformatige oder mittelformatige Consumer-Kameras zum Einsatz. Diese sind meist geometrisch relativ instabil. Im Vergleich zu Großformat Kameras ist zudem eine größere Anzahl von Bildern zur Abdeckung derselben Fläche mit ähnlicher Bildauflösung notwendig. Die Gewichtsproblematik trifft auch auf die Sensoren zur Navigation zu, die Orientierung ist somit häufig etwas ungenauer. Spezielle Softwarepakete zur Auswertung von UAV Daten sind kaum vorhanden. UAVs besitzen meist kein System zur Kommunikation mit nationalen Flugbehörden oder anderen Luftfahrzeugen und in der Regel auch keine Systeme welche Flughindernisse automatisch erkennen. An dieser Stelle gilt es anzumerken, dass gerade bei Navigationssensoren in Bezug auf Gewicht, Größe und Genauigkeit enorme Fortschritte gemacht wurden (Colomina und Molina 2014) und auch zahlreiche freie und kommerzielle Softwarepakete speziell zur Auswertung von UAV Daten mittlerweile vorhanden sind. Die zuvor getätigten Aussagen basierend auf Eisenbeiß (2009) sind daher teilweise zu relativieren.

Die Reichweite bzw. die kurze Einsatzdauer von UAVs und der damit verbundenen Flächenleistung wird in der Literatur häufig als weiterer Nachteil genannt. Die Reichweite kann dabei begrenzt sein durch: die Energieversorgung des Antriebes und der Sensorik (Woodget 2015, Hardin und Jensen 2011), die Funkverbindung zwischen Operator und Fluggerät (Eisenbeiß 2009) und gesetzliche Grundlagen (Toth und Jozkow 2016). Auf die rechtlichen Grundlagen in Österreich wurde bereits in Kapitel 3.2.1 eingegangen. Gerade low cost Systeme erhalten häufig nur einen Bescheid zum Betrieb in unbesiedelten Gebieten, dies schränkt zahlreiche Anwendungen ein. Bei unübersichtlichem Gelände führt der geforderte Sichtflug zu weiteren Einschränkungen in der Anwendbarkeit der Methode.

Eisenbeiß (2009) und Hardin und Jensen (2011) verweisen zudem auf die Wichtigkeit von erfahrenen und gut ausgebildeten UAV Piloten, insbesondere bei schwierigen Bedingungen. In letzter Konsequenz trägt auch bei einem autonomen Flug in den meisten Ländern der Pilot die Verantwortung für sein Fluggerät. Der damit verbundene Zeitaufwand und somit auch Kostenaufwand zum Erlernen des Betriebes eines UAVs ist im Vergleich zum Bedienen eines TLS Scanners relativ groß. Das Erlernen des Betriebs eines UAVs ist, im Vergleich zum Erwerb eines Pilotenscheins für bemannte Luftfahrzeuge, mit weit geringeren Kosten verbunden und zudem auch weniger anspruchsvoll (Haarbrink 2011).

Hardin und Jensen (2011) weisen auf folgende weitere Herausforderung im Zusammenhang mit UAV Daten hin: die meisten UAVs sind gegenüber Wind sehr anfällig, die manuelle Steuerung wird zur Herausforderung und bei einem autonomen Flug kommt es zu Abweichungen vom Flugplan. Der Energiebedarf zum Flug ist bei Wind erhöht und die Operationsdauer verkürzt sich somit weiter. Eine Bildaufnahme ist bei starkem Wind zudem nicht sinnvoll, bzw. führt meist zu unbrauchbaren Daten für die Auswertung. Häufig werden Flüge am Morgen oder frühem Vormittag aufgrund geringerer Thermik durchgeführt, nicht ideale Beleuchtungsverhältnisse (lange Schatten) sind dabei meist die Konsequenz. In der Auswertung ergeben sich weitere Herausforderungen, dazu zählen: die entstehenden Datenmengen einer UAV Befliegung können relativ groß sein, insbesondere bei der Erfassung von größeren Gebieten. Aufgrund des Einsatzes von nicht metrischen Kameras ist die korrekte Sensormodellierung eine Herausforderung. Aufgrund der teils stark unterschiedlicher Radiometrie zwischen den Bildern und Variationen in der geometrischen Auflösung ist die Prozessierung der Daten relativ komplex und macht teilweise umfangreiche Prozessierungsschritte notwendig (Woodget 2015).

Nach Colomina und Molina (2014) sind UAV Daten zudem durch instabile Kamerageometrien, unregelmäßige Luftbildblockstrukturen (deutliche Abweichung von Nadir Aufnahme, stark variabler Bildmaßstab, wechselnde Bildüberdeckungen und unterschiedliche Flughöhe innerhalb eines Streifens) und zum Teil große geometrische und radiometrische Variationen gekennzeichnet. Es finden in der Literatur auch einige Anwendung wo eine direkte Georeferenzierung der UAV Daten erfolgt (z.B. Cramer et al. 2016). In den meisten Anwendungen (siehe dazu auch Kapitel 3.2.3) werden jedoch Passpunkte verwendet. Die Passpunkte werden in der Regel künstlich signalisiert, dies ist mit erheblichem Aufwand verbunden und kann somit als Nachteil angesehen werden. Gerade bei komplexer Topographie, und schwierigen Gelände kann die Schaffung von Passpunkten viel Zeit beanspruchen. Tabelle 2 stellt abschließend wesentliche Vorteile und Nachteile von UAV-Daten übersichtlich zusammen.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Vorteile und Nachteile von UAV-Daten basierend auf folgenden Quellen: Anders et al. (2016), Colomina und Molina (2014), Cramer et al. (2016), Eisenbeiß (2009), Haarbrink (2011), Hardin und Jensen (2011), Harwin und Lucieer (2012), Hervouet et al. (2011), Hugenholtz et al. (2013), Lejot et al. (2007), Lucieer et al. (2014 a, b), Mancini et al. (2013), Neugirg et al. (2016), Niethammer et al. (2012), Salvani et al. (2016), Tamminga et al. (2014), Toth und Jozkow (2016), Woodget et al. (2015) und Woodget (2015). Eine detaillierte Diskussion findet sich im Text.

Vorteile	Nachteile
Hohe geometrische Auflösung der Daten	Gewichtsbegrenzung der Payload, somit Einschränkungen bei der Sensorik
Hohe zeitliche Auflösung möglich	Größenbegrenzung der Payload, somit Einschränkungen bei der Sensorik
Flexibel einsetzbar	Häufig Einsatz von Sensoren mit relativ instabiler Kamerageometrie
Hohe spektrale Auflösung möglich	Einsatz von Klein-, Mittelformat Kameras; mehr Bilder zur Abdeckung der gleichen Fläche und selber Auflösung notwendig
Kostengünstig speziell für relativ kleine Untersuchungsgebiete	Vorhandensein von spezieller Auswertesoftware für UAV Daten
In Risikozonen, nicht zugänglichen Gebieten und Gebieten, wo eine Datenerfassung mit bemannten Flügen nicht möglich ist, kann eine Datenaufnahme erfolgen	Meist kein System zur Kommunikation mit Flugbehörden oder anderen Luftfahrzeugen oder ein System zur Erkennung von Flughindernissen vorhanden
Aufgrund geringer Flughöhe Datenerfassung auch bei starker Bewölkung möglich	Geringe Einsatzreichweite und Flugdauer und damit verbundene Flächenleistung
Grundsätzlich können die Beleuchtungsverhältnisse bei der Aufnahme berücksichtigt werden	Einschränkungen durch gesetzliche Regelungen und Richtlinien
Relativ schnelle Erfassungsmethode	Hoher Trainingsaufwand für UAV-Operator
Multirotorsysteme benötigen nur relativ kleine Start- und Landeflächen	Starke Anfälligkeit gegenüber Wind bzw. äußeren Umwelteinflüssen
In der Regel, dichte, detailreiche und regelmäßige Punktwolke	Häufig Verarbeitung von großen Datenmengen notwendig
Farbinformation der Punktwolke vorhanden	Sensormodellierung von instabilen Kamerageometrien
Bildinformation weiter nutzbar: z.B. zur Abgrenzung von Wasser, Bathymetrie ...	Unregelmäßige Luftbildblockstrukturen (wechselnde Bildüberdeckung, Schrägluftbilder und Senkrechtluftbilder in einem Block, stark variable Bildmaßstäbe...)
Schrägaufnahmen und Senkrechte Aufnahmen möglich	Variable Geometrie und Radiometrie und damit verbundene komplexe Prozessierung
Meist relativ geringe Fluggeschwindigkeit bei der Datenaufnahme	Notwendigkeit von Passpunkten für genaue Auswertungen

3.3 Laserscanning

Laserscanning häufig auch als LIDAR (Light Detection and Rangig) bezeichnet, ist ein aktives Aufnahmeverfahren der Fernerkundung. Wenn ein Flugzeug oder Hubschrauber als Trägerplattform fungiert, spricht man von Airborne Laserscanning (ALS). Beim Terrestrischen Laserscanning (TLS) erfolgt die Datenaufnahme von erdfesten Standorten aus. Die Trägerplattform kann beim TLS sowohl statisch (z.B. Stativ) als auch mobil (z.B. Auto) sein (Kohlstock 2011). Primäres Ziel beider Systeme ist die Erfassung einer großen Anzahl von Punkten, welche das jeweilige zu vermessende Objekt geometrisch beschreiben. Die Intensität des reflektierten Signals wird zudem aufgezeichnet und bildet eine zusätzliche Objektinformation (Albertz 2009).

Die folgenden Ausführungen basieren auf Pfeifer et al. (2007), sowohl beim Airborne Laserscanning als auch beim TLS wird zur Entfernungsmessung (Distanz Sensor-Objekt) ein Laser eingesetzt. Der Laserstrahl wird vom System ausgesendet, am Objekt reflektiert und vom Detektor am Scanner wieder empfangen. Die Abtastung der Oberfläche (Scanning) erfolgt in einem systematischen Muster. Es werden je nach Fragestellung Wellenlängen im sichtbaren als auch im nahen Infrarot eingesetzt. Die Entfernungsbestimmung kann je nach eingesetztem System über unterschiedliche Methoden erfolgen, Impulslaufzeitverfahren (siehe Abbildung 7), Phasenvergleichsmessung und Triangulation. Die genaueste Methode ist das Triangulationsverfahren (Genauigkeit kleiner 1 mm), kann jedoch nur bei Sensor-Objekt Distanzen von wenigen Metern eingesetzt werden. Durch Phasenvergleichsmessung werden Genauigkeiten im mm-Bereich möglich, die Reichweite ist im Vergleich zum Impulslaufzeitverfahren eingeschränkt. Unter idealen Bedingungen werden beim Impulslaufzeitverfahren Genauigkeiten im cm Bereich erreicht und die Methode kann auch für größere Sensor-Objekt Distanzen eingesetzt werden. Die Messgeschwindigkeit ist im Vergleich zum Phasenvergleichsverfahren jedoch geringer. Neben der Distanz wird bei allen Systemen auch der jeweilige Auslenkwinkel des Lasers gemessen. Auf die unterschiedliche Realisierung von Scannern, dies betrifft insbesondere die Ablenkeinrichtung, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Außerdem wird auch keine Übersicht über die derzeit am Markt erhältlichen ALS und TLS Scanner und deren Performance gegeben. Kapitel 3.3.1 behandelt das ALS, Kapitel 3.3.2 das TLS.

3.3.1 Airborne Laserscanning

Ein ALS System besteht aus einem Airborne Segment, dazu zählen: Flugplattform, Laserscanner, dynamisches Positionierungs- und Orientierungssystem und dem Ground Segment bestehend aus: GNSS-Referenzstation, Hardware und Software zur Prozessierung der Daten (Gallay 2013).

Beim ALS kommt zur Entfernungsmessung (aufgrund der größeren Distanz Sensor-Objekt) meist das Impulslaufzeitverfahren zum Einsatz. Die Ablenkung des Laserpulses erfolgt senkrecht nach unten und quer zur Flugrichtung. Der jeweilige Ablenkwinkel wird wie bereits erwähnt mitgemessen. Durch die Ablenkung des Laserstrahls und die Vorwärtsbewegung des Flugzeugs erfolgt die Abtastung des Geländes. Der Punktabstand und die Punktverteilung an der Geländeoberfläche sind von der Flughöhe, der Fluggeschwindigkeit, der Scanfrequenz und der Ablenkeinrichtung abhängig (Kohlstock 2011 und Heritage und Large 2009). Abbildung 7 zeigt schematisch ein ALS System und das Prinzip einer Impulslaufzeitmessung zur Bestimmung der Sensor-Objekt Distanz (Range).

Ein großer Vorteil vom ALS ist die Tatsache, dass grundsätzlich die Reflexion eines Laserpulses von mehreren Oberflächen (z.B. Baumkrone, Unterwuchs, Boden) gemessen werden kann. Erste ALS Systeme zeichneten jedoch meist nur das erste Echo (First return) auf. Mittlerweile gibt es Full Wave Scanner welche das gesamte Echo aufzeichnen (Gallay 2013). Dieser Vorteil ist zugleich auch ein Nachteil und kann sich zumindest bei nicht Full Wave Systemen auf die Entfernungsbestimmung negativ auswirken. Da sich die äußere Orientierung für jeden Laserpuls ändert, wird diese über ein GNSS System und über eine inertielle Messeinrichtung IMU gemessen. Die erfassten Punktwolken werden somit direkt georeferenziert. Alle Messungen müssen zeitlich synchronisiert werden und die Exzentrizitäten der Messsysteme zueinander müssen bestimmt werden. Zur Reduktion von Fehlern ist zudem meist ein Kalibrationsflug notwendig (Pfeifer et al. 2007). Zur Genauigkeitssteigerung kann eine integrierte Sensororientierung mit Verknüpfungspunkten und Passpunkten Sinn machen (Kohlstock 2011).

Die Punktwolken werden je nach Zielsetzung z.B. DGM-Erstellung entsprechend weiterbearbeitet. Die Klassifizierung einer Punktwolke in Bodenpunkte und nicht Geländepunkte ist dabei ein wichtiger Schritt. Der letzte Return muss dabei nicht zwingend ein Bodenpunkt sein, daher sind spezielle Filteroperatoren und Algorithmen zur Klassifikation notwendig. Im Anschluss an die Klassifikation kann die jeweilige Oberfläche modelliert werden. Zur Modellierung der Oberfläche gibt es eine Vielzahl von Methoden,

zudem kann eine Oberfläche auch durch unterschiedliche Datenstrukturen repräsentiert werden (Gallay 2013).

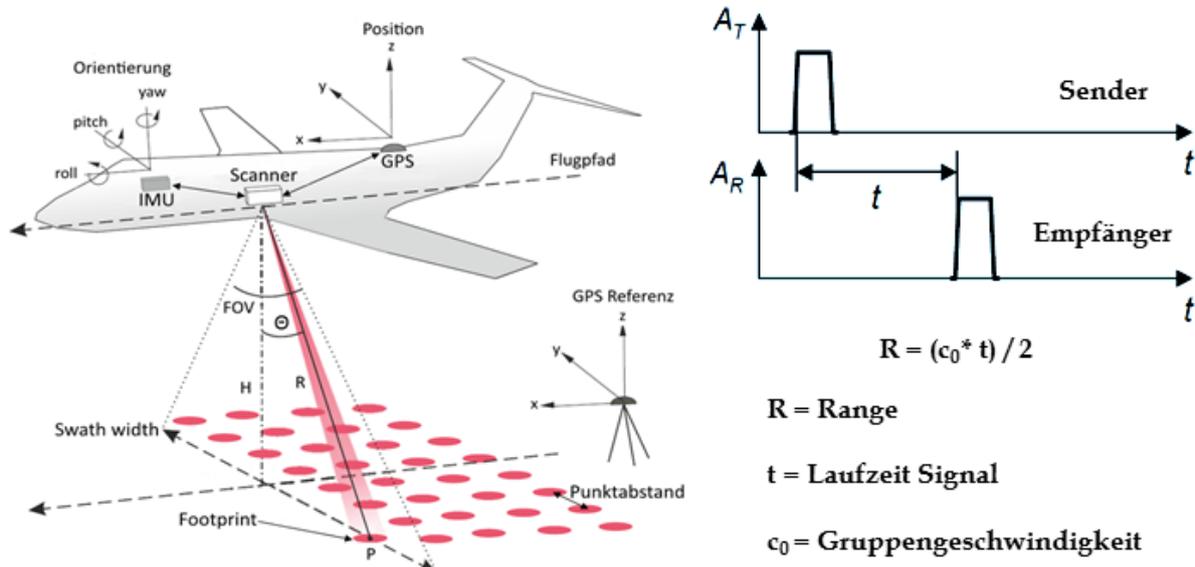


Abbildung 7: ALS Prinzip. Links die grundlegenden geometrischen Komponenten und Systemkomponenten eines ALS Systems, rechts das Impulslaufzeitverfahren schematisch dargestellt. Verändert auf Grundlagen von Gallay (2013) und Brenner (2006).

In der vorliegenden Arbeit ist es geplant ausschließlich mit bereits prozessierten ALS-Produkten zu Arbeiten. Auf die genaue Prozessierung der Daten, auf Fehlereinflüsse und Fehlerbudgets der Methode wird daher nicht gesondert eingegangen. Zur Genauigkeit lässt sich folgende Aussage tätigen, der horizontale Fehler ist in der Regel beim ALS zweimal bis dreimal so groß wie der vertikale Fehler (Gallay 2013). Laut Wilson (2012) liegt die typische Genauigkeit von ALS Geländemodellen in der Höhe bei 0,15 -1 m und die horizontale Genauigkeit bei etwa 1 m. Für das Bundesland Steiermark ist ein ALS Geländemodell mit 1 m Rasterauflösung flächendeckend vorhanden. Die Punktwolke hat eine Höhengenaugigkeit von $\pm 0,15$ m und eine Lagegenauigkeit von $\pm 0,40$ m (GIS Steiermark 2016 c).

3.3.2 Terrestrisches Laserscanning

Das grundlegende Messprinzip ist das Gleiche wie beim Airborne Laserscanning. Die Sensor-Objekt Distanz ist jedoch meist geringer, die Trägerplattform häufig nicht in Bewegung und die Aufnahmeperspektive schräg. Daraus resultiert eine höhere Punktdichte und eine größere Genauigkeit im Vergleich zum ALS (Smith 2015).

Bei einer statischen Aufnahmeplattform (z.B. Stativ) muss das System den Laserstrahl sowohl vertikal als auch horizontal ablenken. Dies kann etwa durch eine Kombination von optischen

Systemen (z.B. Spiegel) mit mechanischen Systemen (z.B. Rotation des Scanners um die Vertikalachse) erfolgen. Das Gesichtsfeld (FOV /Field of View) ist je nach Scanner System unterschiedlich groß. Die Strahldivergenz (Öffnungswinkel des Lasers) und die Winkelschrittweite sind weitere grundlegende Eigenschaften eines Scanners (Kohlstock 2011). Die Distanzmessung kann über die bereits zuvor erwähnten Methoden erfolgen. Das jeweilige Einsatzgebiet bzgl. der Reichweite wurde bereits kurz diskutiert. Für einen Scanner gibt es in der Regel auch eine minimale Sensor-Objekt Distanz, für welche dieser eingesetzt werden kann (Smith 2015).

Die maximale Reichweite eines Scanners ist zudem von den Objekteigenschaften (Rauigkeit, Farbe, Feuchtigkeit), dem Einfallswinkel (Winkel zwischen einfallendem Laserstrahl und Objekt) und von den atmosphärischen Bedingungen abhängig (Kohlstock 2011).

Um Schattenbereiche (= nicht einsehbare Bereiche und somit Datenlücken) zu vermeiden, wird ein Objekt meist von mehreren Standorten aus gescannt. Für jeden erfassten Objektpunkt ist die Distanz vom Scanner zum Objekt und der dazugehörige Horizontalwinkel und Vertikalwinkel bekannt. Es liegen somit sphärische Koordinaten vor. Je nach Scanner oder Scaneinstellungen können auch mehrere Distanzen pro Winkelpaar vorliegen. Die sphärischen Koordinaten werden in kartesische Koordinaten umgerechnet. Die Koordinaten sind dabei jeweils in einem scannereigenen Koordinatensystem. Um die Scans von unterschiedlichen Standorten zusammenzufügen, werden diese zueinander relativ orientiert (Registration). Dies kann durch unterschiedliche Methoden z.B. über künstliche Targets erfolgen. Der Scan liegt im Anschluss in einem Projektkoordinatensystem vor. Für die Georeferenzierung werden die exakten Standpunktkoordinaten des Laserscanners und oder Kontrollpunkte in einem übergeordneten Koordinatensystem benötigt (Pfeifer et al. 2007).

Die TLS Daten in der vorliegenden Arbeit wurden über künstliche zylinderförmige Targets relativ orientiert. Im Anschluss erfolgte die Georeferenzierung der gesamten Punktwolke. Hierzu wurden ebenfalls die zuvor verwendeten Targets mit bekannten Koordinaten verwendet. Details zu den TLS Daten und zur Weiterverarbeitung der Punktwolken dieser Arbeit folgen im Kapitel 4.2.1. TLS Daten können durch zahlreiche Fehlerquellen beeinflusst sein, die folgenden Ausführungen basieren auf Smith (2015). Mögliche Fehlerquellen sind zufällige und systematische Instrumentenfehler, Fehler aufgrund der atmosphärischen Eigenschaften, Reflexionseigenschaften der zu vermessenden Oberfläche, methodische Fehler, grobe Fehler (z.B. Personen oder Ausrüstungsgegenstände im Scan) und Fehler aufgrund der Aufnahmegeometrie. Eine umfangreiche Diskussion von Fehlereinflüssen, mit Ausnahme der Instrumentenfehler ist bei Avian (2015) zu finden.

3.4 GNSS Vermessung

Laut Kohlstock (2011) hat die satellitengestützte Vermessung Global Navigation Satellite System zunehmend an Bedeutung gewonnen. Das bekannte amerikanische GPS (Global Positioning System) ist mittlerweile eines von mehreren solchen Systemen. Nach Thurston et al. (2003) besteht ein GNSS im Wesentlichen aus drei Segmenten, dem Weltraumsegment (Satelliten), dem Kontrollsegment (Stationen an der Erdoberfläche) und dem Nutzersegment (GNSS-Empfänger). Das Standardmessfahren ist für grobe Navigationsaufgaben ausreichend, für Vermessungsaufgaben jedoch meist zu ungenau (Kohlstock 2011). Im Laufe der Zeit wurden daher Methoden, z.B. die differenzielle GNSS Messmethode mit dem primären Ziel der Genauigkeitssteigerung der Koordinatenbestimmung entwickelt (Bill 2010). Die differenzielle GNSS Messmethode wird häufig als dGPS (differential Global Positioning System) bezeichnet. Das Grundprinzip einer dGPS-Messung besteht darin, dass die Koordinaten einer Referenzstation (die Koordinaten der Station sind bekannt) durch das Navigationssystem permanent gemessen werden. Aus der Differenz zwischen den gemessenen Koordinaten und bekannten Koordinaten der Referenzstation lassen sich Korrekturwerte errechnen. Unter der Annahme, dass ein GNSS Empfänger sich in der Nähe der Referenzstation befindet und somit ähnliche Messfehler aufweist können die ermittelten Korrekturwerte für die Neupunktbestimmung genutzt werden (Bauer 1997). Es handelt bei dieser Methode somit um eine Relativmessung (Bill 2010). Die Referenzstation bzw. Basisstation kann dabei z.B. auf einen Vermessungspunkt mit bekannten Koordinaten für ein Vermessungsprojekt aufgestellt werden. In zahlreichen Ländern gibt es jedoch mittlerweile auch ein Netz an permanenten Referenzstationen (Kohlstock 2011). In Österreich ist in diesen Zusammenhang der Positionierungsdienst APOS (Austria Positioning Service) und EPOSA (Echtzeit Positionierung Österreich) zu nennen. Thurston et al. (2003) unterscheidet zwischen zwei Varianten der dGPS Messung, dem Postprocessing Verfahren und dem RTK (Real Time Kinematik) Verfahren. Beim RTK Verfahren werden die Korrekturdaten während der Messung von der Basisstation oder von permanenten Referenzstationen (meist wird eine virtuelle Referenzstation aus mehreren Referenzstationen errechnet) an den Rover übertragen. Auf das Postprocessing Verfahren wird nicht näher eingegangen. Die Genauigkeit beim RTK-Verfahren liegt bei $\leq \pm 1$ cm in der Lage und $\leq \pm 3$ cm in der Höhe. Kommen permanente Referenzstationen zum Einsatz liegt die Genauigkeit bei $\leq \pm 2$ cm in der Lage und bei $\leq \pm 6$ cm in der Höhe (Kohlstock 2011).

4 Praktischer Teil

Der praktische Teil bildet einen wesentlichen Bestandteil dieser Masterarbeit. Das nun folgende Kapitel beinhaltet dabei zusammenfassend die folgenden Punkte: Planung der Datenakquisition, UAV Befliegung und Erfassung von Zusatzdaten für die Auswertung und Qualitätskontrolle, Prozessierung der UAV Daten (Ergebnis: digitale Punktwolken, DGMs, Orthophotos), Qualitätsbeurteilung der erzeugten Produkte, Vergleich der UAV Daten mit zeitnahen TLS Daten und Quantifizierung der Veränderung des Sedimentkörpers (Change Detection) anhand der UAV DGMs. Die folgende Abbildung 8 veranschaulicht stark vereinfacht den durchgeführten Workflow der Arbeit.

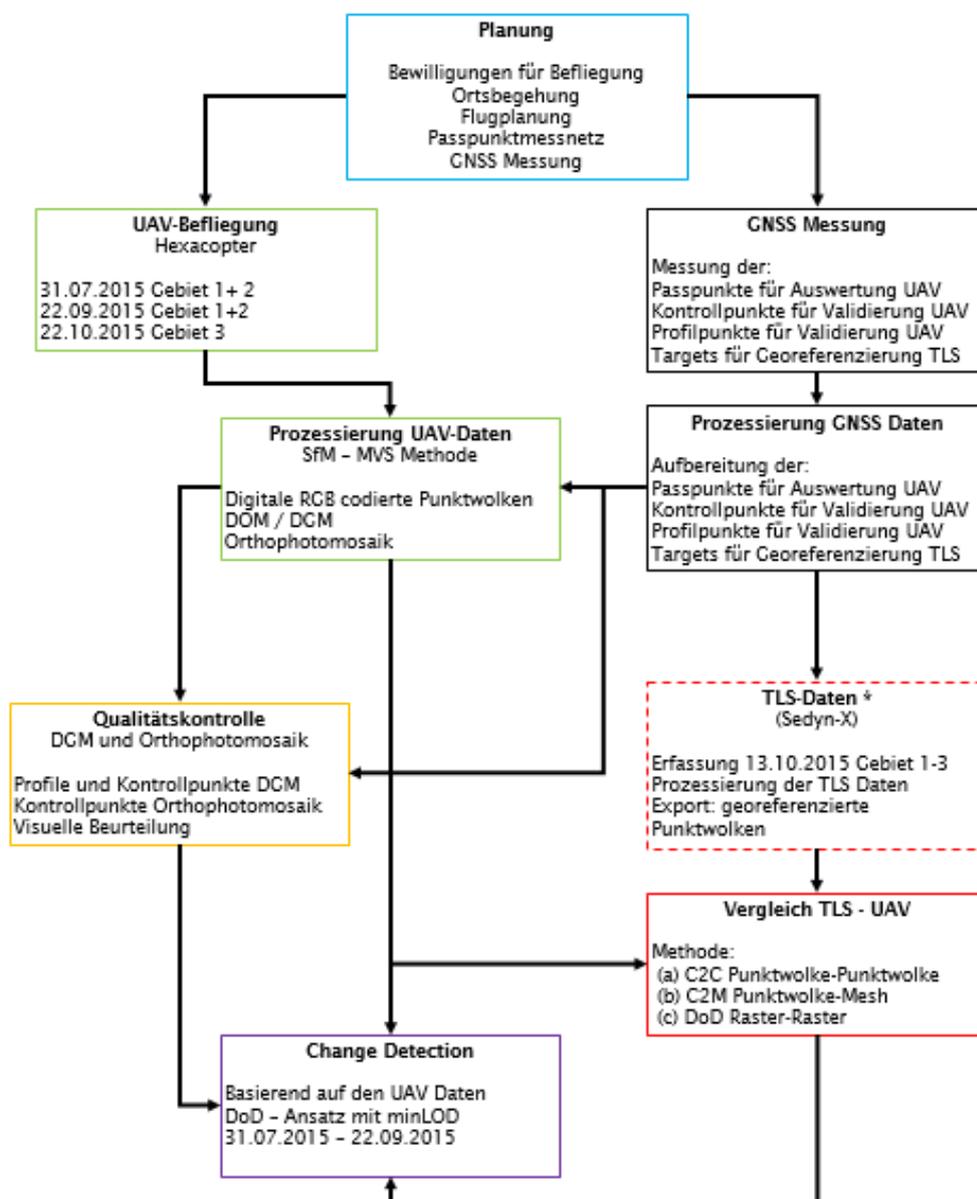


Abbildung 8: Workflow des praktischen Teiles der Masterarbeit * Daten aus Sedyn-X Projekt Details Kapitel 4.2.1. (Eigene Darstellung)

4.1 Erfassung, Prozessierung und Validierung der UAV Daten

4.1.1 Errichtung Passpunktmessnetz und GNSS Messung

Für die photogrammetrische Auswertung der UAV-Daten werden Passpunkte mit bekannten Koordinaten benötigt. Ein solches Passpunktmessnetz musste für das vorliegende Untersuchungsgebiet im Rahmen dieser Arbeit erst geschaffen werden. Durch das Projekt Sodyn-X sind fix installierte Targets zur Orientierung der TLS Aufnahmen vorhanden. Die Koordinaten der Targets in einem übergeordneten Koordinatensystem waren jedoch zu Beginn dieser Arbeit nicht bekannt. Die Einmessung der Targets erfolgte daher im Zuge der Passpunktmessung. Zudem wurden einige temporäre mobile Targets an den Passpunktpositionen für die TLS-Datenerfassung im Herbst 2015 montiert. Die Mobil Targets wurden vom Autor analog zu den fix installierten Targets erstellt. Die Passpunkte müssen bei der Befliegung entsprechend signalisiert werden. Der überwiegende Anteil der eingesetzten Passpunktsignale wurden ebenfalls vom Autor der Arbeit hergestellt. Es handelt sich dabei um Sperrholzplatten im Format DIN A2 (Abbildung 9 C), zudem wurden auch Sperrholzplatten im Format DIN A3 und kreisförmige Plastikscheiben mit einem Durchmesser von 24 cm verwendet (Abbildung 9 D). Aufgrund der Tatsache, dass mehrere Aufnahmezeitpunkte (Bildflüge) geplant waren, wurden die Passpunkte im Gelände vermarktet. Die Vermarkung erfolgte durch Rohre, welche in den Untergrund versenkt wurden (siehe Abbildung 9 A und B). In jedem Rohr befindet sich ein Hohlwanddübel. Die Passpunktsignale konnten dadurch an der Vermarkung festgeschraubt werden. Teilweise wurden zur Vermarkung auch Spreizdübel in Felsblöcke eingebohrt. An diesen ist ebenfalls die Befestigung der Signaltafeln mit einer Schraube möglich. Generell ist anzumerken, dass es sich bei der eingesetzten Vermarkung um eine Low-Budget Lösung handelt. Für ein Monitoring über mehrere Jahre müsste man die Vermarkung jedenfalls optimieren. Passpunkte mit permanenten Signalen wären sinnvoll, da das Auslegen und Einsammeln der Passpunkte mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden ist. In unmittelbarer Nähe der Langgriesbrücke befindet sich ein amtlicher Vermessungspunkt (Triangulierungspunkt). Von diesem wurden die Koordinaten beim BEV erhoben. Die Koordinaten liegen im Landes Koordinatensystem (GK M31) vor. Der Vermessungspunkt ist im Gelände mit einem KT-Stein vermarktet. Abbildung 10 veranschaulicht die Lage, der Passpunkte, der TLS-Targets, der Kontrollpunkte, der Profilpunkte und des amtlichen Vermessungspunktes. Zudem werden aus der Abbildung die Fluggebiete (Gebiet 1-3) ersichtlich. Es wurde versucht die Passpunkte möglichst regelmäßig über das Gebiet zu verteilen, wobei die Schaffung von Passpunkten im

Gerinnebett naturgemäß schwierig ist. Es wurde darauf geachtet, dass sich die für die Auswertung relevanten Bereiche innerhalb des Passpunktnetzes befinden. Die Einmessung der Passpunkte, Targets, Kontrollpunkte und Profilpunkte erfolgte am 05.08.2015 und 03.11.2015. Die Einmessung am 05.08.2015 wurde von Mag. Gernot Seier und Josef Schöttl, die Passpunktmessung am 03.11.2015 durch Tímea Mareková MSc unterstützt.

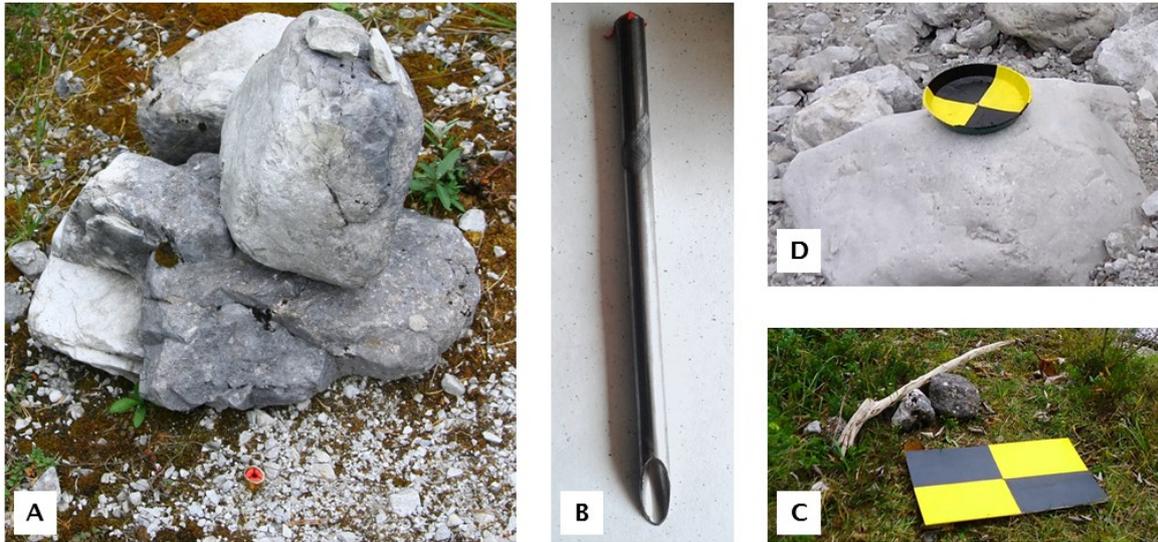


Abbildung 9: Eingesetzte Vermarkung (A und B) und die verwendete Signalisierung der Passpunkte (C und D). (Eigene Darstellung)

Am 05.08.2015 wurde die Basisstation über dem amtlichen Vermessungspunkt mit bekannten Koordinaten aufgestellt. Die Basisstation sendet über eine Funkverbindung lokale Korrekturdaten an den Rover. Die Basisstation stand für die zweite Messung (03.11.2015), aufgrund eines Defekts im Herbst 2015 nicht mehr zur Verfügung. Die Messung erfolgte daher mit dem GNSS-Satelliten-Positionierungsdienst EPOSA. Für die Übermittlung der Korrekturdaten in Echtzeit ist Mobilfunkempfang notwendig. Der Mobilfunkempfang war im Bereich Langgriesgraben dafür ausreichend. Die zweite Messung war zwingend erforderlich, da einige Vermarkungen im Untersuchungsgebiet (insbesondere im Gebiet 3) von Unbekannten entfernt wurden. Eine Kontrollmessung ist zudem generell als sinnvoll zu erachten. Diese zweite Vermessung wurde zusätzlich dafür genutzt, die TLS-Targets, ein Profil außerhalb des Gerinnebettes und einige wenige zusätzliche Punkte für die Datenvalidierung einzumessen. Es wurden bei der zweiten Messung auch alle nicht entfernten Passpunkte erneut eingemessen. Zudem wurden die Koordinaten des amtlichen Vermessungspunktes im Laufe der Messung mehrmals gemessen. Für die Auswertung der UAV Daten, die Georeferenzierung der TLS Daten und die Datenvalidierung wird ein homogener Koordinatendatensatz benötigt. Zwischen der Messung am 05.08.2015 (Basis

befindet sich am Vermessungspunkt, die amtlichen Koordinaten werden als fix angenommen) und der Messung am 03.11.2015 (EPOSA Messung ohne lokale Basisstation) wurden Differenzen in der Lage und Höhe festgestellt. Die Richtigkeit der Koordinaten, des amtlichen Fixpunktes konnten nicht weiter überprüft werden. Die Differenz könnten sich aus den unterschiedlich eingesetzten Messverfahren ergeben. Ein Unterschied aufgrund einer Oberflächenveränderung oder Veränderung der Passpunkte ist auszuschließen, da Differenzen auch bei Punkten im Straßenbereich und am Brückenbauwerk festgestellt wurden. Die EPOSA Messung ist hierbei jedenfalls als die ungenauere Messmethode anzusehen (Kohlstock 2011). Generell ist anzumerken, dass auch die erste Messung nicht frei von Fehlern ist.

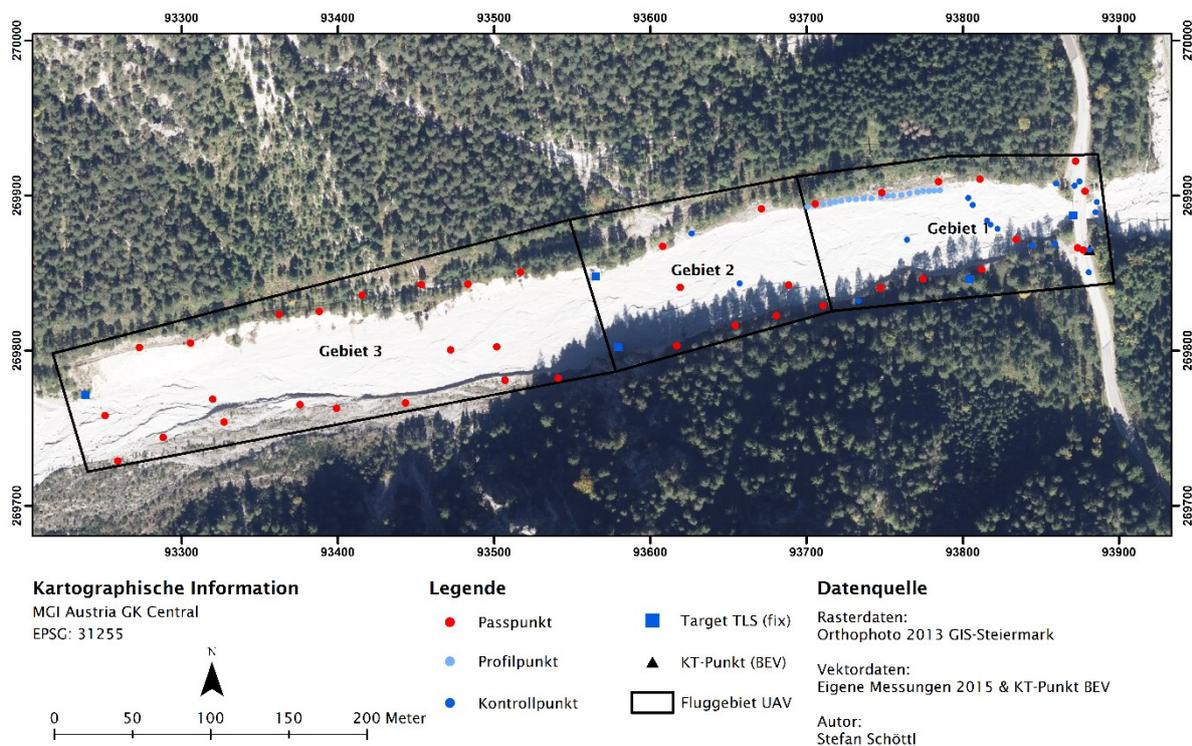


Abbildung 10: Messnetz LGG: Fluggebiete UAV (Gebiet 1 bis 3), Passpunkte zur Auswertung, fix installierte Targets (TLS), Kontrollpunkte, Profilpunkte und KT-Punkt im LGG. (Eigene Darstellung)

Die Koordinaten wurden für die weitere Auswertung homogenisiert. In einem ersten Schritt wurde die Differenz zwischen erster Messung und zweiter Messung anhand von „stabilen“ Punkten (z.B. nicht im Gerinne befindlich) bestimmt. Die erste Messung wird dabei als Referenz, die zweite Messung als zu korrigierender Datensatz angesehen. Der RMSE (Root Mean Square Error) beträgt in X-Richtung (7,9 cm), in Y-Richtung (9,8 cm) und in Z-Richtung (17,8 cm). In einem zweiten Schritt, wurde die mittlere Abweichung zwischen dem KT-Punkt und den mehrfach durchgeführten EPOSA-Messungen am KT-Punkt ermittelt. Die

Einzelabweichungen zeigen dabei alle in die gleiche Richtung und weisen zudem auch eine ähnliche Magnitude in der jeweiligen Richtung auf. Die mittlere Abweichung beträgt dabei in X-Richtung (-7,1 cm), in Y-Richtung (-8,9 cm) und in Z-Richtung (-9,6 cm). Im dritten Schritt wurden die EPOSA Messungen mit einem Korrekturfaktor (Mittlerer Abweichung aus dem Schritt 2) korrigiert. Im Anschluss wurden die Differenzen aus der ersten Messung und der korrigierten zweiten Messung erneut bestimmt. Dabei verbesserte sich der RMSE wesentlich. Der RMSE beträgt in X-Richtung (1,8 cm), in Y-Richtung (2,4 cm) und in Z-Richtung (8,9 cm). Endergebnis dieses Arbeitsschrittes ist ein homogenisierter Datensatz für die weiteren Auswertungen. Der Datensatz beinhaltet dabei die Passpunkte für die UAV Auswertung, die Kontrollpunkte und Profilpunkte für die Validierung der UAV Daten und die Targets für die Registrierung der TLS Scans. Sowohl bei der Messung am 05.08.2015 als auch bei der Messung am 03.11.2015 wurden einzelne Punkte im Untersuchungsgebiet doppelt gemessen. Aus den Differenzen von der jeweilig ersten und zweiten Messung, wurde die mittlere absolute Abweichung berechnet. Dadurch ist eine grobe Abschätzung der Wiederholbarkeit der Messung möglich. Bei der Messung am 05.08.2015 beträgt die mittlere absolute Abweichung in X-Richtung (1,0 cm), in Y-Richtung (0,8 cm) und in Z-Richtung (2,4 cm). Für den 03.11.2015 beträgt die mittlere absolute Abweichung in X-Richtung (1,2 cm), in Y-Richtung (1,8 cm) und in Z-Richtung (4,1 cm).



Abbildung 11: Eingesetzte TLS Targets im LGG (A) Fixe Targets Sedyn-X Projekt, (B) Mobile Target groß, (C) Mobile Targets klein. (Eigene Darstellung)

Die eingemessenen TLS Targets müssen für die Georeferenzierung der TLS-Daten noch weiter korrigiert werden. Die Targets sind zylinderförmig, haben einen Durchmesser von 11 cm und die Zylinderhöhe beträgt je nach Typ 10 cm oder 30 cm. Der Zylindermantel ist jeweils mit einer 10 cm hohen stark reflektierenden Folie überklebt. Abbildung 11 zeigt, die eingesetzten fixen und mobilen Targets. Durch einen Aufsatz wurde das horizontale Zentrum (Mittelpunkt der kreisförmigen Grundfläche) an der Zylinderoberseite eingemessen. Den

Koordinatenbezugspunkt bildet jedoch das Zylinderzentrum. Bei den fix installierten Targets ist somit eine Korrektur der Höhe ($Z_{\text{korrigiert}} = Z_{\text{messung}} - 5 \text{ cm}$) notwendig. Die Mobilten Targets wurden für die TLS Aufnahme im Herbst auf die Vermarkung aufgeschraubt. Die Höhenkorrektur erfolgt daher abhängig vom eingesetzten mobilen Target über die Formel $Z_{\text{korrigiert}} = Z_{\text{messung}} + 5 \text{ cm}$ oder $Z_{\text{korrigiert}} = Z_{\text{messung}} + 25 \text{ cm}$. Dieser zusätzliche Korrekturschritt ist ausschließlich für die fixen und mobilen TLS-Targets notwendig.

4.1.2 UAV Datenerfassung

Im folgenden Kapitel werden die durchgeführte Flugplanung und planerische Aspekte im Zusammenhang mit der Befliegung näher beschrieben (Kapitel 4.1.2.1). Zudem wird die durchgeführte UAV-Datenerfassung erläutert und aufgetretene Probleme bei der Datenerfassung angesprochen (Kapitel 4.1.2.2).

4.1.2.1 Flugplanung

Die Planung erfolgte in enger Absprache mit Mag. Gernot Seier, dem Piloten des UAVs. Das zu erfassende Gebiet lässt sich wie folgt beschreiben: es besitzt eine Breite von etwa 100 m und eine Länge von circa 630 m. Potenzielle Hindernisse bei der Befliegung stellen Bäume, Felsen, und eine Stromleitung, welche den Langgriesgraben quert, dar. Im Nahbereich befinden sich keine Flughäfen, Flugplätze oder sonstige Sicherheitszonen. Das Untersuchungsgebiet befindet sich auf Nationalparkflächen. Die betroffenen Grundstücke sind im Besitz der Steiermärkischen Landesforste und werden vom Nationalpark gepachtet. Die notwendigen Einwilligungen für die Befliegungen und Feldarbeiten wurden an den entsprechenden Stellen eingeholt. Aus Sicherheitsgründen wurde ein Überflug über die Johnsbachstraße L743 vermieden. Dies hat zur Konsequenz, dass der Mündungsbereich des Langgriesgrabens in den Johnsbach nicht vollständig erfasst werden kann. Das Fluggebiet entspricht somit laut dem LFG einem Gebiet der Kategorie 1 (unbebautes Gebiet).

Aus der Zielsetzung der Arbeit ergeben sich weitere Anforderungen an die Befliegung: (a) stereoskopische Senkrechtluftbilder mit ausreichender Längs- und Querüberdeckung, (b) hohe geometrische Auflösung. Aufgrund der Größe des Untersuchungsgebietes, dem verfügbaren Fluggerät, und der eingesetzten Kamera, war eine Erfassung in nur einem Flug nicht möglich. Das Projektgebiet wurde daher in drei Subgebiete (Gebiet 1 bis 3) unterteilt, die Unterteilung ist aus der Abbildung 10 ersichtlich. Eine Übersicht der Bildflugparameter befindet sich in der Tabelle 4. Das eingesetzte UAV besitzt einen Autopiloten, dies ermöglicht einen autonomen Wegpunktflug; der Start- und Landevorgang muss manuell durchgeführt

werden. Die Flugplanung wurde durch die Flugplanungssoftware Grid IT Flightmanager in der Version 2.5 unterstützt. Zur Planung werden Informationen zum Fluggerät (Fluggerättyp und Autopilottyp), zur Kamera (Brennweite, Sensorgröße) und Geobasisdaten (DGM und Orthophoto) benötigt. Die Planung erfolgte im Räumlichen Referenzsystem WGS 1984 UTM Zone 33 N. Die Erstellung der Flugpfade, der Wegpunkte und der Kameraauslösepunkte ist in der Software automatisch als auch manuell möglich. Die automatische Berechnung der Parameter des Wegpunktfluges basiert dabei auf bekannten Formeln der Photogrammetrie, siehe dazu z.B. Kraus (2007, 2004).

Tabelle 3: Eingangsdaten und Metainformation für Flugplanung LGG

Geobasisdaten Planung	
DGM	ALS, 2011, 1 m, EPSG 32633
Orthophoto	RGB, 2013, 20 cm, EPSG 32633
Fluggerät	
Typ	Multirotor / Hexakopter
Autopilot	Mikrokopter
Steigrate Kopter [dm/s]	40-50
Geschwindigkeit Kopter (v) [dm/s]	40-50
Kamera	
Name	Ricoh GXR GR Lens A12 28 mm F 2.5
Brennweite (f) [mm]	18,3
Breite Sensor (long side) [mm] / [pix]	23,6 / 4288
Höhe Sensor (short side) [mm] / [pix]	15,7 / 2848
Pixelgröße (p) [mm]	0,0055
Pixel sind quadratisch	ja
Sensor	CMOS-Sensor
Megapixel	12
Projektanforderung	
Anzahl der Fluggebiete	3
GSD [cm] Gebiet 1 und 2	2
GSD [cm] Gebiet 3	3
Längsüberdeckung (l) [%]	80
Querüberdeckung (q) [%]	60
Blickrichtung Kamera	Senkrechtaufnahme

Der im Büro geplante Flugplan wurde den Gegebenheiten vor Ort weiter angepasst. Dies betrifft insbesondere den Startpunkt (Launch-Point) des Fluggerätes. Eine geeignete Start- und Landefläche für den Kopter zu finden war aufgrund der Oberflächeneigenschaften im Untersuchungsgebiet schwierig. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die verwendeten Datengrundlagen, Metainformationen und die Projektanforderungen.

Auf die Berechnung der wesentlichen Parameter der Flugplanung soll in weiterer Folge näher eingegangen werden. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in der Tabelle 4 zusammengefasst. Formeln (1-7) und Erläuterungen basieren auf Kraus (2007) und Aber et al. (2010). Wenn die Brennweite (f), die Größe eines Sensorpixels (p) und die gewünschte geometrische Auflösung (GSD / Ground Sampling Distance) bekannt ist, lässt sich die Flughöhe über Grund (h_g) aus der Formel 1 berechnen.

$$h_g = f \times \frac{GSD}{p} \quad (1)$$

Über die Flughöhe über Grund (h_g) und der Brennweite (f) wird durch die Formel 2 die Bildmaßstabszahl (m_b) berechnet. Formel 3 zeigt den grundsätzlichen Zusammenhang von Maßstab (M), Bildmaßstabszahl (m_b), Brennweite (f), Flughöhe über Grund (h_g), Strecke im Bildraum (s) und Strecke im Objektraum (S).

$$m_b = \frac{h_g}{f} \quad (2)$$

$$M = \frac{1}{m_b} = \frac{f}{h_g} = \frac{s}{S} \quad (3)$$

Die Länge (s_l) und Breite (s_b) eines Bildes im Objektraum kann über die Formel 4 ausgerechnet werden, wobei l_s für die Länge des Bildsensors und h_s für die Breite des Bildsensors steht.

$$s_l = \frac{h_g}{f} \times l_s \quad s_b = \frac{h_g}{f} \times h_s \quad (4)$$

Die Basislänge (B) und der Streifenabstand (A) wird über die Formel 5 berechnet. Dabei muss die Längsüberdeckung (l) bzw. die Querüberdeckung (q) bekannt sein bzw. bei der Flugplanung definiert werden. Aus der Flughöhe über Grund und der Basislänge kann das Basis- Höhenverhältnis (BH) berechnet werden, siehe dazu Formel 6.

$$B = s_b \times \left(1 - \frac{l}{100}\right) \quad A = s_l \times \left(1 - \frac{q}{100}\right) \quad (5)$$

$$BH = \frac{B}{h_g} \quad (6)$$

Die folgenden Ausführungen stützen sich im Wesentlichen auf Aber et al. (2010). Für alle Berechnungen und gezeigten Formeln der Flugplanung gibt es folgende Einschränkungen. Sie gelten streng genommen nur für eine ideale zentralperspektivische Abbildung (z.B. keine Linsenabbildungsfehler), nur für ideale Senkrechtaufnahmen und ausschließlich für ebenes Gelände (keine Reliefunterschiede). Dies ist in der Realität, insbesondere bei UAV Befliegungen im alpinen Gelände, mit handelsüblichen Digitalkameras nicht der Fall. Der Maßstab in einem Luftbild ist daher nicht einheitlich.

Tabelle 4: Flugplanung LGG (Eigene Berechnungen)

Parameter	Ergebnis (gerundet)
h_g Flughöhe über Grund [m] bei GSD 2 cm	67
h_g Flughöhe über Grund [m] bei GSD 3 cm	100
m_b Bildmaßstabszahl bei GSD 2 cm	3637
m_b Bildmaßstabszahl bei GSD 3 cm	5454
Footprint (s_l / s_b) [m] bei GSD 2 cm	86 / 57
Footprint (s_l / s_b) [m] bei GSD 3 cm	129 / 85
B Basislänge [m] bei GSD 2 cm	11
B Basislänge [m] bei GSD 3 cm	17
A Streifenabstand [m] bei GSD 2 cm	34
A Streifenabstand [m] bei GSD 3 cm	51
Basis- Höhenverhältniss (BH) bei GSD 2 cm	0,16
Basis- Höhenverhältniss (BH) bei GSD 3 cm	0,17

Anhand der Informationen aus der Tabelle 3 bzw. den Parametern aus der Tabelle 4 können, die Flugpfade, die Wegpunkte und die Auslösepunkte der Bilder in der Flugplanungssoftware erstellt werden. Für die Wegpunkte sind in der Software eine Wartezeit (Delay time) und ein Wegpunktradius (Radius) zu definieren. Zudem muss die horizontale Ausrichtung der Kamera (Heading) und die Neigung vertikale Ausrichtung der Kamera (Tilt) eingestellt werden. Abbildung 12 stellt diesen Sachverhalt schematisch dar.

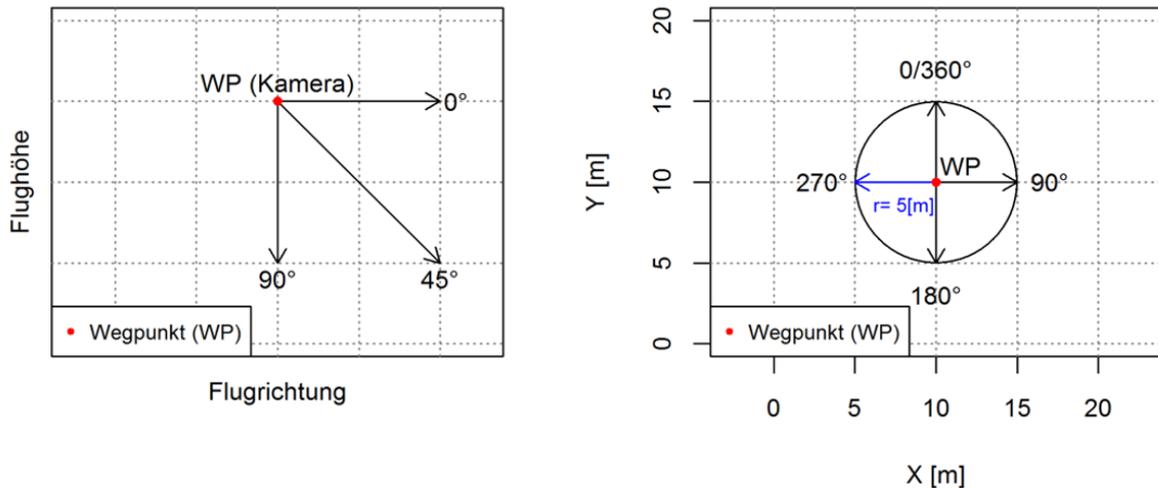


Abbildung 12: Schema der Parameter eines Wegpunktes, links Aufriss, rechts Grundriss. (Eigene Darstellung)

Die Wartezeit wurde auf 2 s eingestellt. Wenn der Kopter einen Wegpunkt erreicht hat bleibt dieser 2 s lang an der Wegpunktposition stehen. Damit soll sichergestellt werden, dass die Kamera bei der Bildaufnahme möglichst ruhig ist und die Auslösezeitpunkte der Kamera sich nicht überlagern. Die Aufnahmezeit Δt kann durch die Formel 7 berechnet werden. Die Geschwindigkeit (v) des Fluggerätes und die Basislänge (B) werden hierfür benötigt. Der Grenzwert einer kritischen Auslösezeit (t_{krit}) hängt von den Kameraeinstellungen und der Geschwindigkeit des Prozessors der Kamera ab. Im konkreten Fall ist die Aufnahmezeit kein kritischer Parameter, weil der Kopter zur Bildaufnahme am Wegpunkt stehen bleibt. Die Aufnahmezeit ist insbesondere von Bedeutung wenn das Fluggerät permanent in Bewegung ist, bzw. das Fluggerät zur Bildaufnahme nicht stehen bleibt Aber et al. (2010). Dieser Fall tritt bei Fixed Wing UAVs häufig auf, kann aber auch bei Multirotorsystemen zu Verlängerung der Flugzeit genutzt werden.

$$\Delta t = \frac{B}{v} > t_{krit} \quad (7)$$

Zur horizontalen Ausrichtung ist folgendes zu sagen, 0° bzw. 360° entspricht der Ausrichtung Nord, die Ausrichtung der Bilder wurde der Flugpfadneigung angepasst. Die längere Seite des Bildes ist quer zur Flugrichtung ausgerichtet, die kürzere Bildseite in Flugrichtung (landscape format).

Die Neigung der Kamera kann zwischen 0° und 90° eingestellt werden. 90° entspricht dabei einer Senkrechtaufnahme (siehe Abbildung 12 links). Die 0° Position ist beim verwendeten Hexacopter nicht absolut definiert, sondern von der Neigung der Kamera beim Einschalten

des Fluggerätes abhängig. Abbildung 13 zeigt beispielhaft einen Flugplan. Aus dem Flugplan wird ersichtlich, dass am Ende des Wegpunktfluges, zwei Wegpunkte vom regelmäßigen Befliegungsmuster deutlich abweichen. Diese Punkte wurden manuell hinzugefügt und erfüllen folgenden Zweck, das Fluggerät soll für den manuellen Landevorgang in eine übersichtliche Position und auf eine geringere Flughöhe gebracht werden. Zudem soll die Kamera in die Nullposition (Neigung 0°) gestellt werden. Die Kamera ist bei der Landung dadurch besser geschützt (nicht senkrecht nach unten ausgerichtet). Die Reihenfolge der anzufliegenden Wegpunkte wurde dahingehend verändert, sodass der vom Startpunkt am weitesten entfernte Punkt zuerst angefliegen wird.

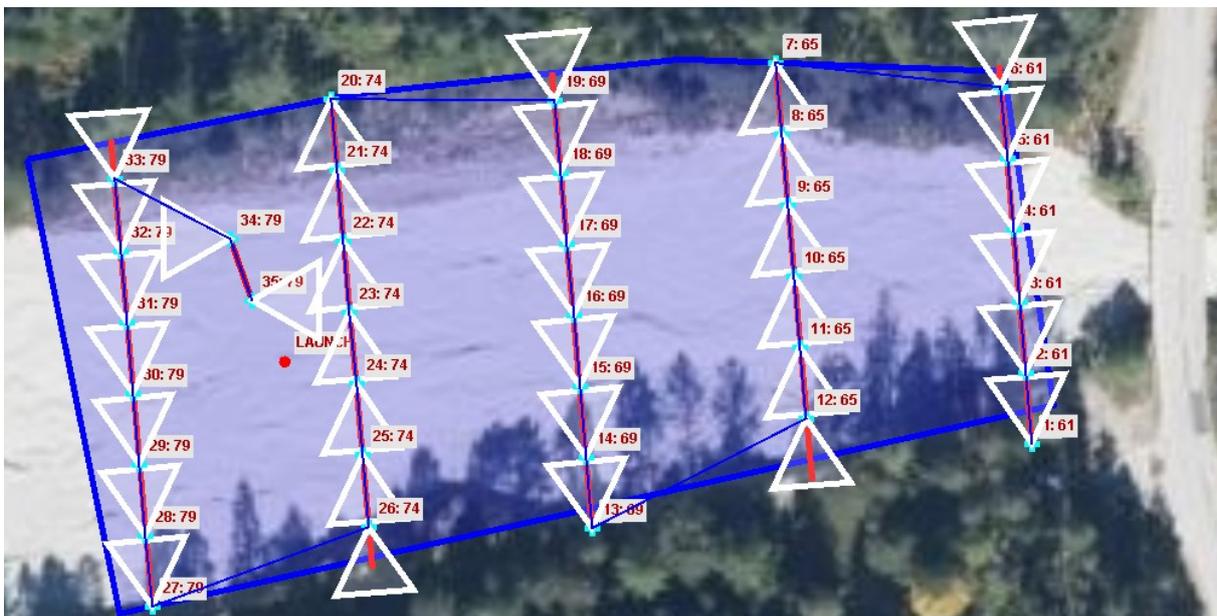


Abbildung 13: Flugplan für Gebiet 1 am 22. 09. 2015. Die Flugpfade sind als rote Linien dargestellt, das Planungsgebiet als blaues Polygon, die Wegpunkte als hellblaue Kreuze, die Photoauslösepunkte als weiße Dreiecke. Die Basis der weißen Dreiecke entspricht dabei der längeren Bildseite. Die Wegpunktnummer ist die erste Zahl neben dem jeweiligen Wegpunkt, die Flughöhe über Launch die zweite Zahl. Der Startpunkt ist als roter Punkt eingezeichnet und befindet sich zwischen Flugstreifen 4 und 5. (Eigene Darstellung)

Für den autonomen Wegpunktflug, das Aufzeichnen der Position des Fluggerätes und Funktionen, die den manuellen Flug enorm erleichtern (Position hold, Coming home), befindet sich ein GNSS-Empfänger am Fluggerät. Der eingebaute GNSS Empfänger kann jedoch nur GPS Satelliten empfangen. In Gebieten mit großer Abschattung wie im vorliegendem Fall ist dies äußerst problematisch. Gerade für Anwendungen im Hochgebirge wo die Topographie häufig zu Abschirmungseffekten führt und Zeitfenster für eine Befliegung aufgrund der meteorologischen Gegebenheiten häufig kurz sind wäre eine Aufrüstung zu einem Doppelfrequenzempfänger sehr empfehlenswert. Aufgrund der vorhandenen technischen Ausstattung musste der GPS-Empfang in der Planung besonders

berücksichtigt werden. Für einen Flug werden zumindest 6 GPS Satelliten benötigt. Nicht nur die Anzahl, sondern auch die Signalqualität der Satelliten ist dabei von Bedeutung. Die Planung erfolgte in einer Online GNSS Planungssoftware der Firma Trimble (www.trimble.com/gnssplanningonline/). Die Parameter welche für die Planung verwendet wurden sind der Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Parameter für Planung GNSS Empfang

Parameter	Wert
Breitengrad / Längengrad [°] / Höhe [m]	47,5608 / 14,5776 / 685
Datum	Tag der Befliegung (z.B 22.10.2015)
Zeitintervall	08:00- 20:00
Satellitensysteme	GPS
Abschattung [°] (alle Azimutrichtungen)	25

Für die Planung wurde ein Abschattungswinkel von 25°, für alle Azimutrichtungen angenommen. Ein Ergebnis-Plot (Anzahl der Satelliten) für die Werte aus der Tabelle 5 ist in Abbildung 14 dargestellt. Man erkennt deutlich die Zeiträume mit günstigem Satellitenempfang.

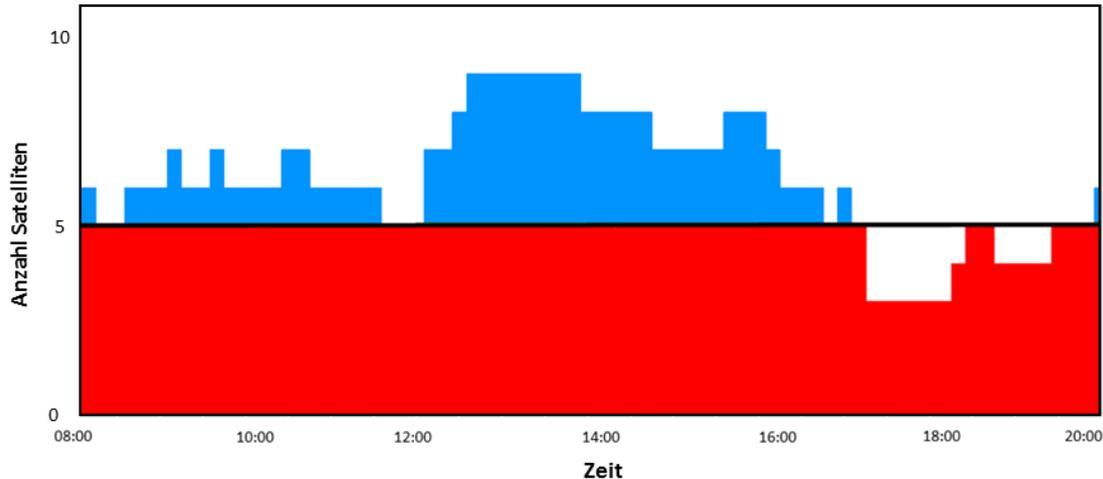


Abbildung 14: Bestimmte Satellitenanzahl. Veränderte Abbildung aus der Online Planungssoftware von Trimble (www.trimble.com/gnssplanningonline/).

Die Zeitfenster mit günstigem Satellitenempfang galt es für die Befliegung zu nutzen. Der Abschattungswinkel (ϵ) kann für einen Standort und eine bestimmte Richtung über die Formel 8 (Standardformel der Trigonometrie) bestimmt werden. Hierzu wird die Höhendifferenz (Δz), und Distanz (d) zum Objekt mit der größten Abschattung in der

jeweiligen Azimuthrichtung benötigt. Die Höhendifferenz und Distanz wurde aus einer topographischen Karte im GIS Steiermark gemessen.

$$el = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta_z}{d} \right) \quad (8)$$

Für die Befliegung sind bestimmte Wetterbedingungen notwendig. Kein Niederschlag und möglichst geringe Windgeschwindigkeiten sind ideal. Laut dem Bescheid (2015) für das eingesetzte Fluggerät darf bei böigem Wind und Windgeschwindigkeiten größer 8 m/s das Gerät nicht betrieben werden. Ergänzend ist eine Bildaufnahme bei hohen Windgeschwindigkeiten nicht sinnvoll. Laut den Technischen Dokumenten des Herstellers (Technische Dokumente 2015) sollte der Hexacopter bei Lufttemperaturen unter 0°C nicht betrieben werden. Bei niedrigen Lufttemperaturen ist die Leistung der Akkus vermindert. Wolkenbedeckung mit Ausnahme von Bodennebel, stellt aufgrund einer maximal erlaubten Flughöhe von 150 m über Grund kein Problem dar. Kein direktes Sonnenlicht wirkt sich auf die Ausleuchtung der Bildszene positiv aus. Aufgrund von technischen Einschränkungen (GPS-Empfang, nur sehr kurze Zeiträume mit funktionsfähigem Fluggerät), den benötigten Witterungsbedingungen und der personellen Verfügbarkeit konnte auf die Beleuchtungsverhältnisse in der Planung kaum Rücksicht genommen werden.

4.1.2.2 Befliegung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mehrere Bildflüge durchgeführt. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die dabei erfassten Bilddaten. Der ursprüngliche Plan alle Gebiete an einem Tag zu erfassen konnte aus technischen Gründen (Rotorarmausfall) am 31.07.2015 und aufgrund von zu starkem Wind am Nachmittag des 22.09.2015 nicht umgesetzt werden.

Tabelle 6: Übersicht der erfassten UAV Daten im LGG 2015

UAV Daten Langgriesgraben 2015			
Datum	31.07.2015	22.09.2015	22.10.2015
Gebiet erfasst	Gebiet 1+2	Gebiet 1+2	Gebiet 3
Senkrechtluftbilder	60	66	31
Bilder verdreht	ja Gebiet 1	nein	ja
Doppelauslösung	nein	ja Gebiet 1+2	ja
Fehlende Bilder	ja Gebiet 1+2	ja Gebiet 1	nein

Anfänglich war die erste Befliegung für Anfang Juni 2015 geplant, dies war aus technischen Gründen (nicht funktionsfähiges Fluggerät) nicht möglich. Die Befliegung wurde jeweils von Mag. Gernot Seier (Pilot) und dem Autor der Arbeit durchgeführt. Abbildung 15 soll einen ersten Eindruck über die erfassten Luftbilddaten geben. Das eingesetzte UAV mit weiteren Systemkomponenten ist in der Abbildung 16 dargestellt. Beim UAV handelt es sich um ein Multirotorsystem mit sechs Rotorarmen (siehe Abbildung 16).

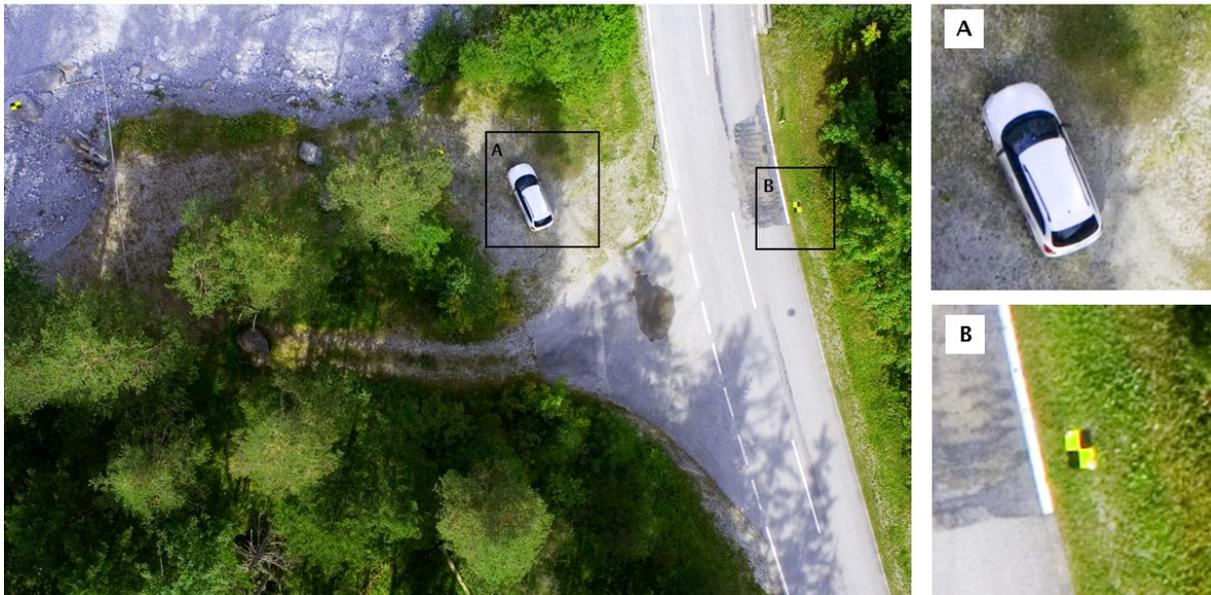


Abbildung 15: Ausschnitt eines erfassten UAV-Bildes im Bereich Langgriesgraben (A) Zoom auf Auto und (B) Zoom auf Passpunktsignal am amtlichen Vermessungspunkte. (Eigene Darstellung)

Wie bereits erwähnt erfolgte der Startvorgang und der Landevorgang manuell, der Wegpunktflug autonom. Während des Fluges werden Telemetrie Daten (Position, Distanz zum nächsten Wegpunkt, Flugmodus, Akkuzustand etc.) an die Bodenstation übertragen. Die Bodenstation besteht dabei aus einem Laptop, einer USB Antenne und der Software zur Flugüberwachung (MikroKopterTool-OSD). Das MikroKopterTool-OSD kann neben der Flugüberwachung auch zur Flugplanung eingesetzt werden. Auf eine umfangreiche Beschreibung des genauen Ablaufs der Befliegung und technische Details wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

Details zur verwendeten Kamera sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Bei den Bildflügen gab es zum Teil technische Probleme mit dem UAV. Drei Fehler in Bezug auf die Bildaufnahme sind dabei zu erwähnen, Doppelauslösung der Kamera am Wegpunkt (Fehler 1), fehlende Bildauslösung am Wegpunkt (Fehler 2) und verdrehte Bilder aufgrund von einer vermutlich falschen Ausrichtung des Fluggerätes am Wegpunkt (Fehler 3). Fehler 1 stellt kein wirkliches Problem dar, Fehler 2 und 3 kann sich auf die gewünschte Überdeckung der Bilder auswirken.

Eine Übersicht darüber, welche Problem bei welchem Flug auftraten gibt Tabelle 6. An dieser Stelle ist anzumerken, dass trotz der aufgetretenen Probleme eine ausreichend hohe Bildüberdeckung erreicht wurde. Auf zahlreiche weitere aufgetretene technische Probleme wird hier nicht näher eingegangen, da sich diese nicht auf die Auswertung der Daten auswirken.

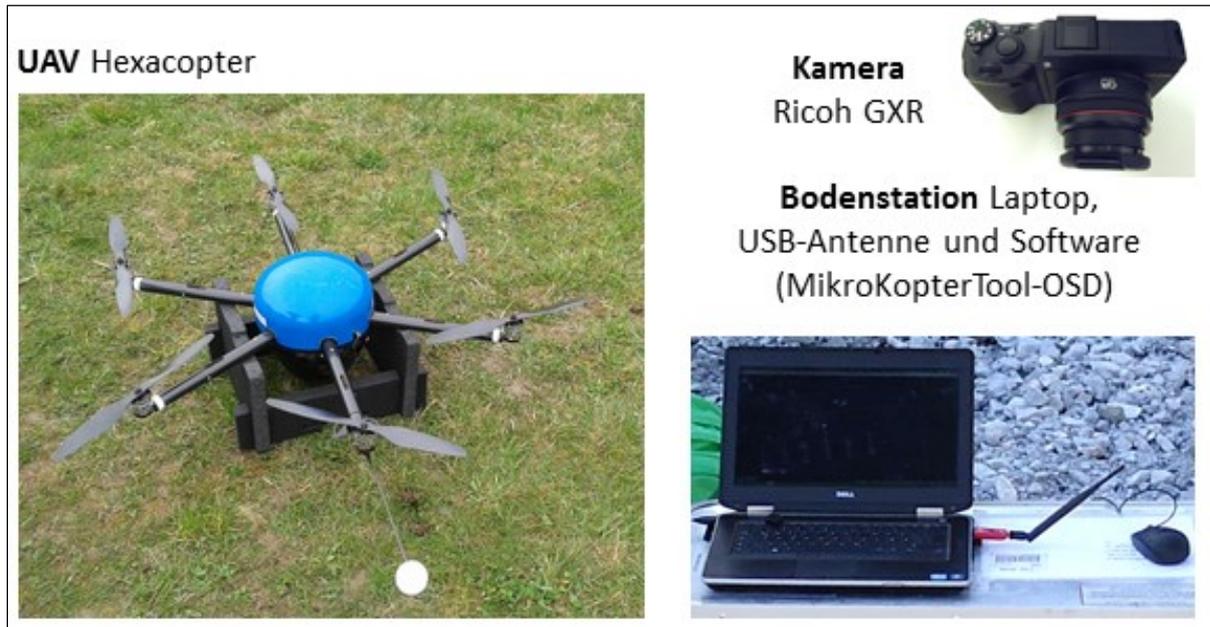


Abbildung 16: Eingesetztes UAV inklusive Kamera und Bodenstation zur Datenerfassung im LGG. (Eigene Darstellung)

Zur Bildqualität kann jedenfalls angemerkt werden, dass die Aufnahmen am 31.07.2015 und 22.09.2015 als nicht ideal einzustufen sind. An der orographisch rechten Seite sind Schattenflächen vorzufinden, das Gerinne ist zudem in manchen Bereichen überstrahlt. Ideal waren aufgrund einer dichten Bewölkung die Beleuchtungsverhältnisse am 22.10.2015.

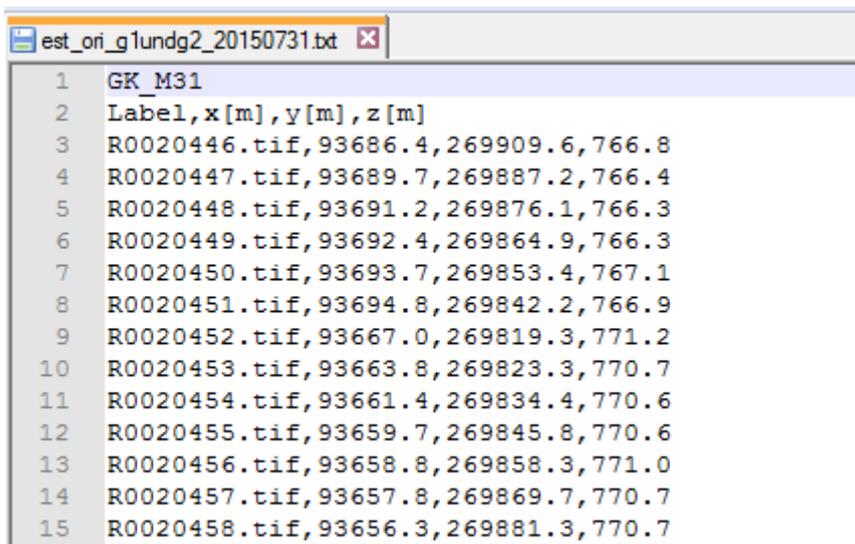
4.1.3 Auswertung der UAV Daten

4.1.3.1 Datenvorverarbeitung

Das folgende Kapitel behandelt die durchgeführte Vorverarbeitung der UAV-Daten (Luftbilder und Log-Daten). Die Kamera am Hexacopter speichert die aufgenommenen Bilder im JPEG und DNG Format. Um möglichst keine Bildinformation für die Weiterverarbeitung zu verlieren wurden die DNG Bilder in das TIFF Format konvertiert. Die Konvertierung erfolgte mit der der Bildbearbeitungssoftware Adobe Photoshop. Die Bilder wurden nicht weiter verändert. Dieser Schritt ist notwendig, da das Verwenden von DNG Bildern in der Auswertesoftware erst seit Juli 2016 möglich ist. Falls vorhanden wurden unscharfe Bilder,

Testbilder und Schrägaufnahmen, welche nicht in die Auswertung eingehen sollen, aussortiert. Der Hexacopter zeichnet zudem während dem Flug Log-Daten (KML und GPX Format) auf. In der Flugplanungssoftware (Grid IT Flightmanager) können die Log-Dateien für ein Post-Flight Assessment geladen und auch als csv-Datei exportiert werden. Die Log-Datei enthält zahlreiche Parameter zum Flug, unter anderem Informationen zur Auslösung der Kamera und zur Position des Fluggerätes. Mit dieser Information kann näherungsweise die Bildaufnahme-Position (X, Y, Z) im Raum bestimmt werden. Die Kenntnis über die ungefähre Aufnahme-Position von jedem Luftbild, beschleunigt in weiterer Folge die Prozessierung der Daten in Agisoft PhotoScan.

Das dafür vorgesehene Tool in der Flugplanungssoftware konnte kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielen. Vom Autor der Arbeit wurde daher folgender Lösungsweg gewählt. Erstellung eines R-Skripts zur Extraktion der Auslösezeitpunkte. Die Log-Datei (csv-Format) wird dabei im R-Skript eingelesen, die Aufnahmezentren werden im Anschluss extrahiert und das Ergebnis (X-, Y-, Z-Koordinaten der Aufnahmezentren in UTM 33 N inklusive aller anderen Parameter) exportiert. Eventuelle Fehler (z.B. Doppelauslösungen der Kamera) wurden manuell entfernt. Die Auswertung in Agisoft PhotoScan erfolgt aufgrund der Passpunktkoordinaten im Landeskoordinatensystem GK M31. Die Umrechnung der Koordinaten wurde mit Hilfe der Software Geotrafo (<http://www.geotrafo.com>) bewerkstelligt.



```
est_ori_glundg2_20150731.txt
1 GK_M31
2 Label, x [m], y [m], z [m]
3 R0020446.tif, 93686.4, 269909.6, 766.8
4 R0020447.tif, 93689.7, 269887.2, 766.4
5 R0020448.tif, 93691.2, 269876.1, 766.3
6 R0020449.tif, 93692.4, 269864.9, 766.3
7 R0020450.tif, 93693.7, 269853.4, 767.1
8 R0020451.tif, 93694.8, 269842.2, 766.9
9 R0020452.tif, 93667.0, 269819.3, 771.2
10 R0020453.tif, 93663.8, 269823.3, 770.7
11 R0020454.tif, 93661.4, 269834.4, 770.6
12 R0020455.tif, 93659.7, 269845.8, 770.6
13 R0020456.tif, 93658.8, 269858.3, 771.0
14 R0020457.tif, 93657.8, 269869.7, 770.7
15 R0020458.tif, 93656.3, 269881.3, 770.7
```

Abbildung 17: Beispiel txt-Datei mit den bestimmten Aufnahme-Positionen der Luftbilder. (Eigene Darstellung)

Im letzten Schritt wurde den Aufnahmezentren der jeweilige Dateiname vom Luftbild halbautomatisch zugeordnet. Endergebnis dieser Arbeitsschritte ist jeweils eine txt-Datei pro UAV-Bildflug. Diese enthält die Dateinamen der Luftbilder und die dazugehörigen X-, Y-, Z-

Koordinaten. Die txt-Datei von Gebiet 1 (31.07.2015) wurde mit der txt-Datei von Gebiet 2 (31.07.2015) für die weitere Auswertung in eine Datei zusammengeführt. Dies erfolgte analog dazu für den Bildflug vom 22.09.2015. Ein beispielhaftes Endergebnis ist in der Abbildung 17 ersichtlich. Die txt-Datei kann in Agisoft Photoscan importiert werden. Über die Label Spalte ist die Verknüpfung zwischen jeweiligem Luftbild (Bilddaten) und den Koordinaten möglich.

4.1.3.2 Prozessierung der UAV Daten

Die Prozessierung der UAV Daten erfolgte in der Software Agisoft Photoscan Professional (Version 1.2.4). Es handelt sich dabei um eine kommerzielle Photogrammetrie Software mit SfM und MVS Algorithmen. Die Software deckt dabei den gesamten photogrammetrischen Workflow ab. Endergebnisse sind: eine digitale RGB-codierte Punktwolke, ein DOM (Digitales Oberflächenmodell) / DGM und ein Orthophotomosaik. Die Prozessierung der Daten folgt dabei dem Tutorial (Agisoft 2015 a) und dem Agisoft User Manual (Agisoft 2015 b). An dieser Stelle ist anzumerken, dass es sich bei der Software um eine Blackbox handelt. Die eingesetzten Algorithmen sind geschlossen und nach Meinung des Autors nur unzureichend dokumentiert. Im Zuge der Arbeit wurden zahlreiche Programmeinstellungen und Funktionen im Programm getestet, in weiterer Folge wird ausschließlich der durchgeführte finale Workflow mit den getroffenen Einstellungen vorgestellt.

Zu Beginn wurden Grundeinstellungen für das Programm (z.B. Projektionssystem) getroffen, die Bilder (TIFF-Format) ins Programm geladen und die txt-Datei mit den Aufnahmepositionen der Bilder (siehe Kapitel 4.1.3.1) importiert. Die Auswertung der beiden Bildflüge am 31.07.2015 erfolgte in einem gemeinsamen Projekt. Dies wurde analog dazu für den 22.09.2015 durchgeführt. Für den 22.10.2015 wurde ebenfalls ein eigenes Projekt erstellt. Im nächsten Schritt wird die Innere und Äußere Orientierung für jedes Bild aus der Bildinformation bestimmt. Dieser Schritt nennt sich in Agisoft Photoscan „Align Photos“. Für die Verknüpfung werden Key Points und in weiterer Folge Tiepoints (Verknüpfungspunkte) berechnet. Endergebnis ist eine erste Punktwolke (Sparse cloud). Die ungefähre Aufnahmeposition der Bilder ist bereits bekannt (siehe Kapitel 4.1.3.1), als Pair preselection Methode wurde daher die Einstellung Reference gewählt. Das Key point limit wurde auf 1000000, das Tie point limit wurde auf 0 (entspricht keinem Limit) und die Accuracy wurde auf High gestellt. Offensichtlich falsche Punkte in der Sparse cloud wurden manuell aus der Punktwolke entfernt. Generell wurden Tiepoints mit einem Reprojection error kleiner gleich 0,45 Pixel akzeptiert. Im Anschluss folgte die manuelle Messung der Passpunkte (Marker). Die Passpunktsignale wurden hierfür im Bild manuell lokalisiert und gemessen (markiert). Dem

jeweiligen Marker wurde eine entsprechende Passpunktnummer zugeordnet. Nachdem ein Passpunkt zumindest in einem Bild gemessen wurde, wird die Passpunktmessung durch Vorausberechnungen unterstützt, es ist somit nur eine kleine Anpassung und die Aktivierung des Passpunktes notwendig. Diese Funktion beschleunigt den Arbeitsvorgang enorm. Sämtliche Passpunkte wurden nach der erfolgten Messung in den Luftbildern erneut kontrolliert. Nach der Kontrolle wurden die Passpunktkoordinaten als txt-Datei in die Software importiert.

In weiterer Folge wurden die Parameter der Äußeren- und Inneren Orientierung anhand der Passpunkte verbessert. Die folgenden Parameter der Inneren Orientierung wurden dabei optimiert: f (Brennweite), c_x und c_y (Koordinaten des Bildhauptpunktes), die Parameter der radialen Verzeichnung (k_1, k_2, k_3) und die tangentialen Verzeichnungsparameter (p_1, p_2). Alle Bilder eines Bildfluges werden im Projekt zudem mit einem eigenen Kameramodell versehen, dies bedeutet, dass die Auswertungen am 31.07.2015 und 22.09.2015 jeweils zwei Kameramodelle enthalten. Vor der Optimierung der Kameraparameter und äußeren Orientierung wurden die Passpunkte anhand der Passpunkt-Fehlerstatistik kontrolliert. Offensichtlich falsche Passpunkte wurden korrigiert oder gegeben falls gelöscht. Tabelle 7 fasst die berechneten Parameter in der inneren Orientierung zusammen, die Koordinaten des Bildhauptpunktes und die Brennweite sind dabei in Pixel angegeben.

Tabelle 7: Bestimmte Innere Orientierung aus Agisoft Phostoscan

Parameter	31.07.2015 Kamera_1	31.07.2015 Kamera_2	22.09.2015 Kamera_1	22.09.2015 Kamera_2	22.10.2015 Kamera_1
f Brennweite [pix]	3333,157685	3339,970836	3334,542213	3329,960112	3342,786723
c_x Bildhauptpunkt Koordinate x [pix]	-43,298414	-42,432064	-43,568858	-43,422105	-43,208736
c_y Bildhauptpunkt Koordinate y [pix]	10,830110	10,430395	7,343572	9,415159	8,149393
k_1 Parameter radiale Verzeichnung	-0,062824	-0,063053	-0,063728	-0,064676	-0,064486
k_2 Parameter radiale Verzeichnung	0,042504	0,042273	0,043777	0,047006	0,046260
k_3 Parameter radiale Verzeichnung	0,023660	0,025388	0,022370	0,018427	0,019929
p_1 Parameter tangentiale Verzeichnung	0,000524	0,000593	0,000553	0,000547	0,000501
p_2 Parameter tangentiale Verzeichnung	0,000235	0,000281	0,000329	0,000325	0,000382

Im nächsten Schritt erfolgt die Berechnung der dichten Punktwolke (Dense cloud). Dieser Schritt ist sehr rechenintensiv und benötigt je nach getroffenen Einstellungen sehr viel Arbeitsspeicher. Aufgrund der geringen Bildanzahl ist der Arbeitsspeicher in der vorliegenden Arbeit zumindest für die Auswertungen in Agisoft kein kritischer Punkt. Folgende Einstellungen wurden dabei für die Punktwolkenberechnung verwendet: Quality (Ultra high) und Depth filtering (Moderat). Bei der Einstellung Ultra High werden die Bilder für die Punktwolkenberechnung in der Originalauflösung verwendet, es kommt zu keiner

Skalierung der Bilder. Die Punktwolke wurde in weiterer Folge an den Rändern manuell zugeschnitten und offensichtlich fehlerhafte Punkte manuell entfernt. Die RGB codierte Punktwolke wurde zur Weiterbearbeitung in externen Programmen und zu Archivierung in das laz-Format exportiert. Einen Eindruck über die farbcodierte Punktwolke aus dem Gebiet 3 im LGG gibt Abbildung 18. Aus der Punktwolke wurde in Agisoft Photoscan ein Mesh mit den folgenden Einstellungen generiert: Surface Type (Height field), Source Data (Dense cloud), Face count (High), Interpolation (Enabled) und Point classes (All).

Im nächsten Schritt wurde ein Rastermodell mit einer Auflösung von 5 cm, 10 cm und 20 cm erstellt. Für weitere Analysen und Bearbeitungen wurden die Digitalen Oberflächenmodelle als TIFF exportiert. Die erstellten Oberflächenmodelle mit einer Auflösung von 5 cm und 10 cm sind als kartographische Darstellung im B-1 bis B-6 der Arbeit zu finden.



Abbildung 18: Eindrucks der digitalen RGB codierten Punktwolke, LGG Gebiet 3 erstellt aus Bilddaten der UAV Befliegung am 22.10.2015. (Eigene Darstellung)

Die Oberflächenmodelle wurden im Anschluss auf das engere Untersuchungsgebiet zugeschnitten. Bereiche mit Vegetation wurden ausmaskiert. Diese Arbeitsschritte erfolgten in ArcGIS 10.3. Es handelt sich beim finalen Rastermodell für das Untersuchungsgebiet (Gerinne) per Definition um ein Digitales Geländemodell.

Im letzten Bearbeitungsschritt wurde ein Ortophotomosaik erstellt, die folgenden Einstellungen wurden dabei gewählt: Surface (DEM), Blending mode (Mosaic) und Enable color correction. Für das Gebiet 3 (22.10.2015) wurde aufgrund der höheren Flughöhe eine Pixelauflösung von 3 cm gewählt, für die übrigen Gebiete eine Pixelauflösung von 2 cm. Die

Orthophotomosaiken wurden als TIFF exportiert und ebenfalls auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten. Die finalen Orthophotos befinden sich in Kartenform im Anhang A-1 bis A-3 dieser Arbeit. Die folgende Abbildung 19 soll einen Eindruck über die erzielte Auflösung der Orthophotos und Geländemodelle (als Hillshade visualisiert) ermöglichen. Aus der Abbildung wird zudem der Unterschied zwischen den Geländemodellen mit einer Rasterauflösung von 5 cm und 10 cm deutlich. Ergänzend wird anhand der Abbildung 19 auch ersichtlich, dass eine Veränderung im Gerinne zwischen den Aufnahmezeitpunkten stattgefunden hat.

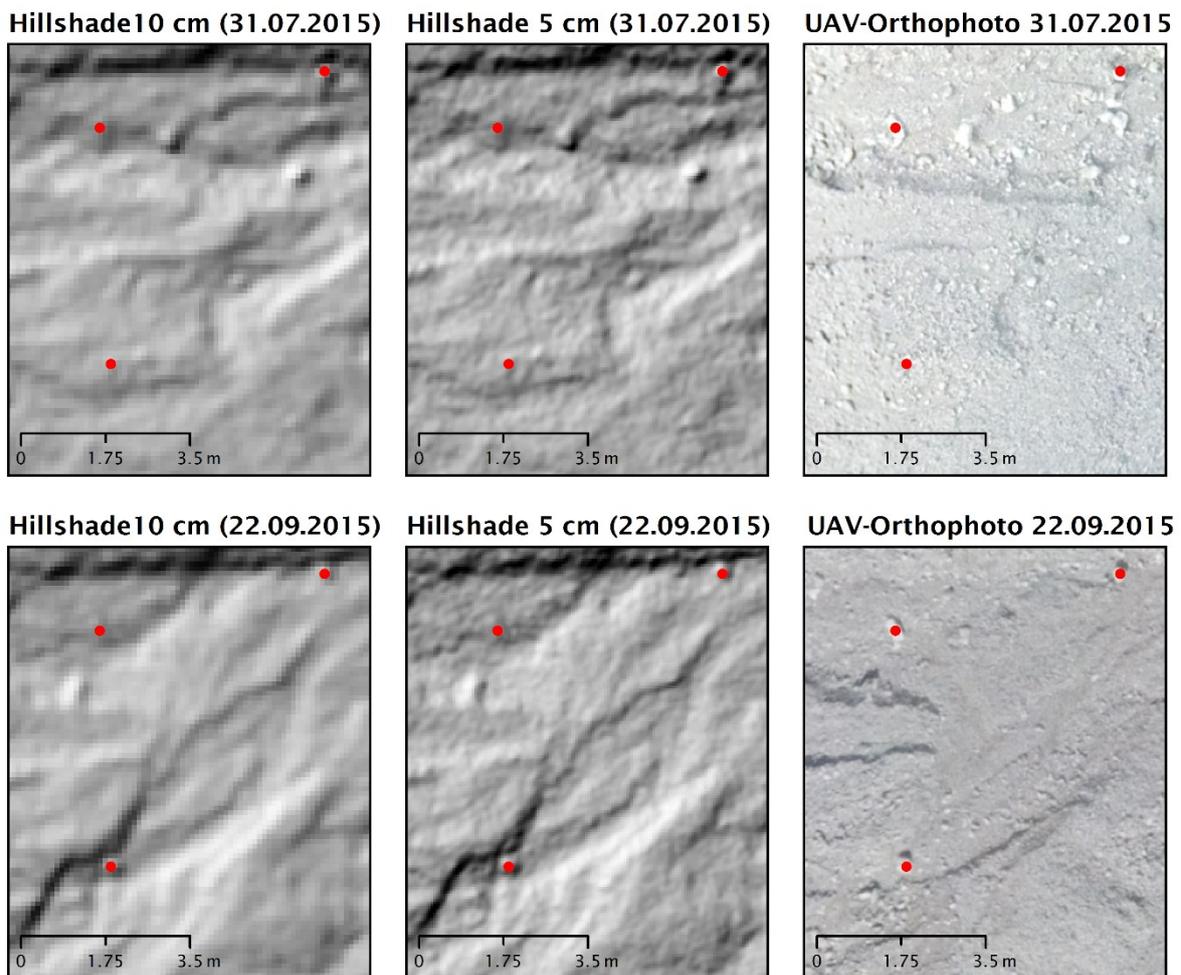


Abbildung 19: Detailansicht der Geländemodelle mit einer Rasterauflösung 5 cm und 10 cm (visualisiert als Hillshade) und der erstellten UAV-Orthophotos für einen Bereich im Gerinne des LGG für den 31.07.2015 und 22.09.2015. Die roten Punkte sollen den Vergleich erleichtern. (Eigene Darstellung)

Bei der Prozessierung der Daten wurde auf die Vergleichbarkeit der finalen Ergebnisse (dies trifft insbesondere für das Gebiet 1 und 2 zu) großer Wert gelegt, da die erzeugten Geländemodelle in weiterer Folge die Grundlage für ein Change Detection (Quantifizierung

der Veränderung des Sedimentkörpers) bilden. Die Daten wurden daher soweit wie möglich in ähnlicher Weise prozessiert. Einen Vergleich der drei Datensätze soll Tabelle 8 ermöglichen. Die Anzahl der verwendeten Bilder ist am 22.09.2015 im Vergleich zum 31.07.2015 etwas höher, dies führt zu einer größeren Anzahl von Tiepoints und Punkten in der Punktwolke am 22.09.2015. Die Bildaufnahmezentren vom 31.07.2015 und 22.09.2015 sind in der Abbildung 20 gegenübergestellt.

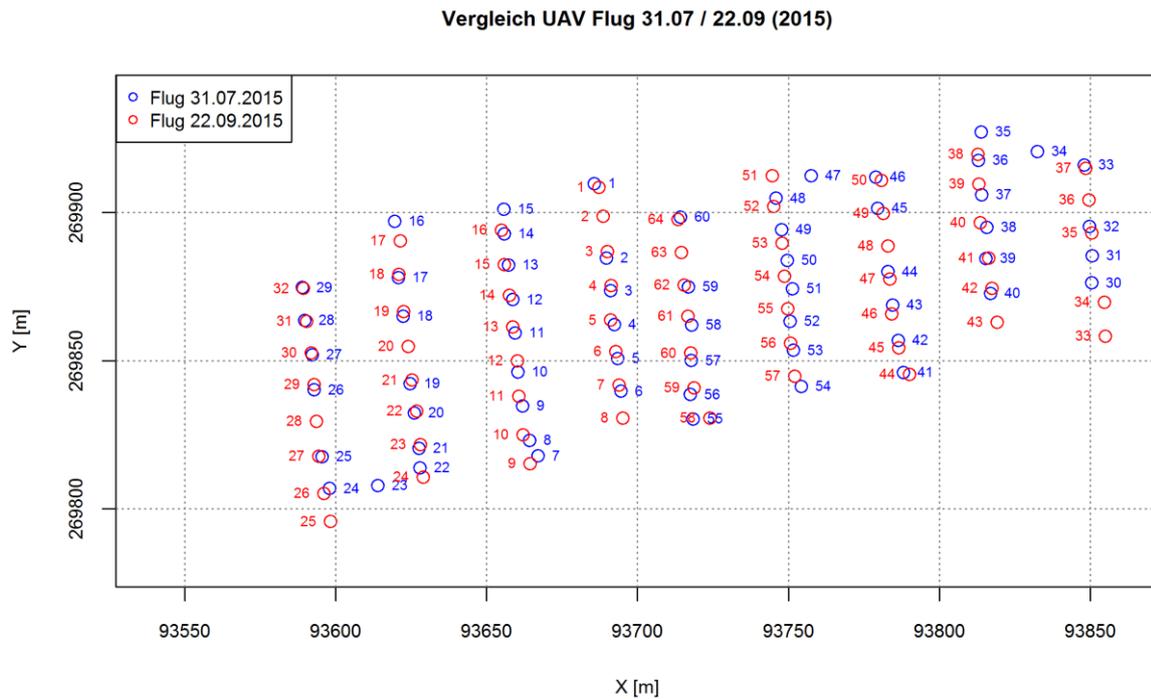


Abbildung 20: Vergleich der Aufnahmezentren (XY-Koordinaten) UAV Kampagne 31.07.05 und 22.09.2015. Der Flug am 31.07.2015 ist in Blau dargestellt der Flug am 22.09.2015 in Rot. (Eigene Darstellung)

Der Flug vom 22.10.2015 im Gebiet 3 weicht aufgrund der Flughöhe, der daraus resultierenden mittleren GSD und der Bildanzahl von den übrigen Flügen ab. Eine ähnlich große Fläche wie Gebiet 1 und Gebiet 2 wurden mit nur einem Flug erfasst. Der RMSE der Passpunktfehlerstatistik ist bei allen drei Datensätzen sehr ähnlich, dies ist auch für den Reprojection error der Fall. Eine umfangreiche Genauigkeitsabschätzung und die Beurteilung der erzeugten Produkte (DGM und Orthophotomosaik) wird im folgendem Kapitel 4.1.4 durchgeführt. Die Beleuchtungsverhältnisse waren am 31.07.2015 und 22.09.2015 sehr ähnlich und aufgrund von Schatten an der orographisch rechten Seite des LGG nicht optimal. Die Beleuchtungsverhältnisse für einen Bildflug waren am 22.10.2015 aufgrund einer durchgehenden Wolkendecke ideal.

Tabelle 8: Übersicht der prozessierten UAV Daten LGG 2015

Datum	31.07.2015	22.09.2015	22.10.2015
Fluggebiet	1+2	1+2	3
Anzahl der Flüge	2	2	1
Bilder verwendet Auswertung	60	64	30
Mittlere GSD [m]	0,02	0,02	0,03
Mittlere Flughöhe [m]	81	78	112
Passpunkte verwendet	20	20	20
Anzahl der Tiepoints	305042	396605	188615
Anzahl der Punkte Dense Cloud	82969154	83557220	62670886
RMSE XY Passpunkte [m]	0,03	0,03	0,02
RMSE Z Passpunkte [m]	0,04	0,04	0,04
Reprojection error Passpunkte [pix]	0,62	0,67	0,67
Checkpoints vorhanden	ja	ja	nein

4.1.4 Qualitätsbeurteilung

4.1.4.1 DGM Validierung

Die erzeugten digitalen Geländemodelle spielen für die thematische Analyse eine wichtige Rolle. Das durchgeführte geomorphologische Change Detection in dieser Arbeit, durch die DoD-Methode ist rasterbasiert. Aus diesem Grund wurden die erzeugten Rasterhöhenmodelle zur Validierung herangezogen. Es wurde dabei ausschließlich die Höhengenaugigkeit (Z-Fehler) der Modelle beurteilt. Der Lagefehler ist nach Wheaton et al. (2010) in einer ähnlichen Größenordnung wie der vertikale Fehler, bei relativ ebenen Gelände ist dieser aufgrund des geringen Einflusses auf die DoD Berechnung (Change Detection Ansatz in dieser Arbeit) meist vernachlässigbar.

Die Genauigkeitsabschätzung der DGMs erfolgte anhand von 16 Kontrollpunkten und einem Profil bestehend aus 20 Einzelpunkten. Die Kontrollpunkte und Profilpunkte wurden zuvor in der Auswertung nicht als Passpunkte eingesetzt und mittels GNSS Messung bestimmt (siehe dazu Kapitel 4.1.1). Die UAV-DGM Höhe wurde für den jeweiligen Kontrollpunkt und Profilpunkt nach Höhle und Höhle (2009) über eine bilineare Interpolation bestimmt. Die Validierung wurde dabei jeweils für eine Rasterauflösung von 5 cm, 10 cm und 20 cm durchgeführt. Die Rasterauflösung der UAV-Modelle hat im vorliegenden Fall nur eine geringe Auswirkung auf das Validierungsergebnis (siehe dazu Tabelle 9 und Tabelle 10). Die Genauigkeitsabschätzung wurde für den 31.07.2015 und den 22.09.2015 (Gebiet 1 und 2) durchgeführt. Für das Gebiet 3 stehen keine Kontrollpunkte zur Validierung zur Verfügung.

Tabelle 9: Z-Fehler UAV DGM bestimmt anhand von 16 Kontrollpunkten

Parameter	31.07.2015 DGM 5cm	22.09.2015 DGM 5cm	31.07.2015 DGM 10cm	22.09.2015 DGM 10cm	31.07.2015 DGM 20cm	22.09.2015 DGM 20cm
Minimum [m]	-0,10	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11	-0,11
Maximum [m]	0,07	0,02	0,06	0,02	0,06	0,03
Minimaler abs. Fehler [m]	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Maximaler abs. Fehler [m]	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Mittlerer abs. Fehler [m]	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Mittlerer Fehler [m]	-0,01	-0,03	-0,02	-0,03	-0,02	-0,03
Standardabweichung der Fehler [m]	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04
RMSE [m]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
ACCz (RMSE x 1,96) [m]	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Median der abs. Fehler [m]	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Median [m]	-0,01	-0,03	-0,01	-0,03	-0,01	-0,03
NMAD [m]	0,03	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
Perzentil 68,3 (abs. Fehler [m])	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05
Perzentil 95,0 (abs. Fehler [m])	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10

Der mittlere Fehler, der mittlere Absolute Fehler und der RMSE werden laut Smith et al. (2016), bei SfM-MVS erzeugten Oberflächenmodellen in Publikationen am häufigsten als Fehlermaß angegeben. Zudem verweist die Publikation darauf, dass kein Standard zur Validierung von SfM-MVS Daten existiert und die Fehlerquellen vielfältig sein können. Die Validierung der Daten ist somit eine Herausforderung, dies wird auch in zahlreichen Publikation angesprochen. Dietrich (2014) und Woodget (2015) verwenden die Standardabweichung der Fehler als weiteres Fehlermaß. Die Publikation von Höhle und Höhle (2009) beschäftigt sich ausführlich mit der Abschätzung der Z-Fehler von digitalen Geländemodellen. Die Autoren empfehlen neben den klassischen Fehlermaßen (RMSE, Mittlerer Fehler und Standardabweichung), welche eine Normalverteilung der Fehler voraussetzen, folgende Genauigkeitsmaße: Median, normalisierte mittlere absolute Abweichung bezüglich des Medians (in den Tabellen eng. NMAD/Normalized Median Absolute Deviation), 68,3 % Perzentil der absoluten Fehler, 95 % Perzentil der absoluten Fehler. Nach ASPRS (2015) ist neben den genannten Größen ist der ACCz (vertical linear accuracy at the 95 % confidence interval) ein übliches Fehlermaß. Hierbei wird der vertikale RMSE mit 1,96 (t-Wert bei 95 % Konfidenzintervall) multipliziert. Bei diesem Parameter steckt ebenfalls die Annahme einer Normalverteilung der Fehler dahinter.

Die berechneten statistischen Fehlermaße sind der Tabelle 9 zu entnehmen. Zur Berechnung der Fehlermaße wurde ein R-Skript erstellt. Neben den berechneten Fehlermaßen wurden für die Validierung Box-Plots, Histogramme und QQ-Plots erzeugt. Sämtliche erzeugte Plots befinden sich dabei in den folgenden Abbildungen: Box-Plots (Abbildung 23), Histogramme

(Abbildung 21) und QQ-Plots (Abbildung 22). Abbildung 22 zeigt die QQ-Plots für die UAV-Geländemodelle mit einer Rasterauflösung von 5 cm, 10 cm und 20 cm für den 31.07.2015 und 22.09.2015. Es kann anhand der Darstellungen nicht eindeutig davon ausgegangen werden, dass der Z-Fehler einer Normalverteilung folgt, hierzu müssten sämtlichen Punkte in der Abbildung auf einer Geraden liegen. Die Größe der Stichprobe ist für eine gesicherte Aussage zur Verteilung der Fehler zu gering, dieser Sachverhalt wird auch bei der Betrachtung der Histogramme in der Abbildung 21 erkennbar.

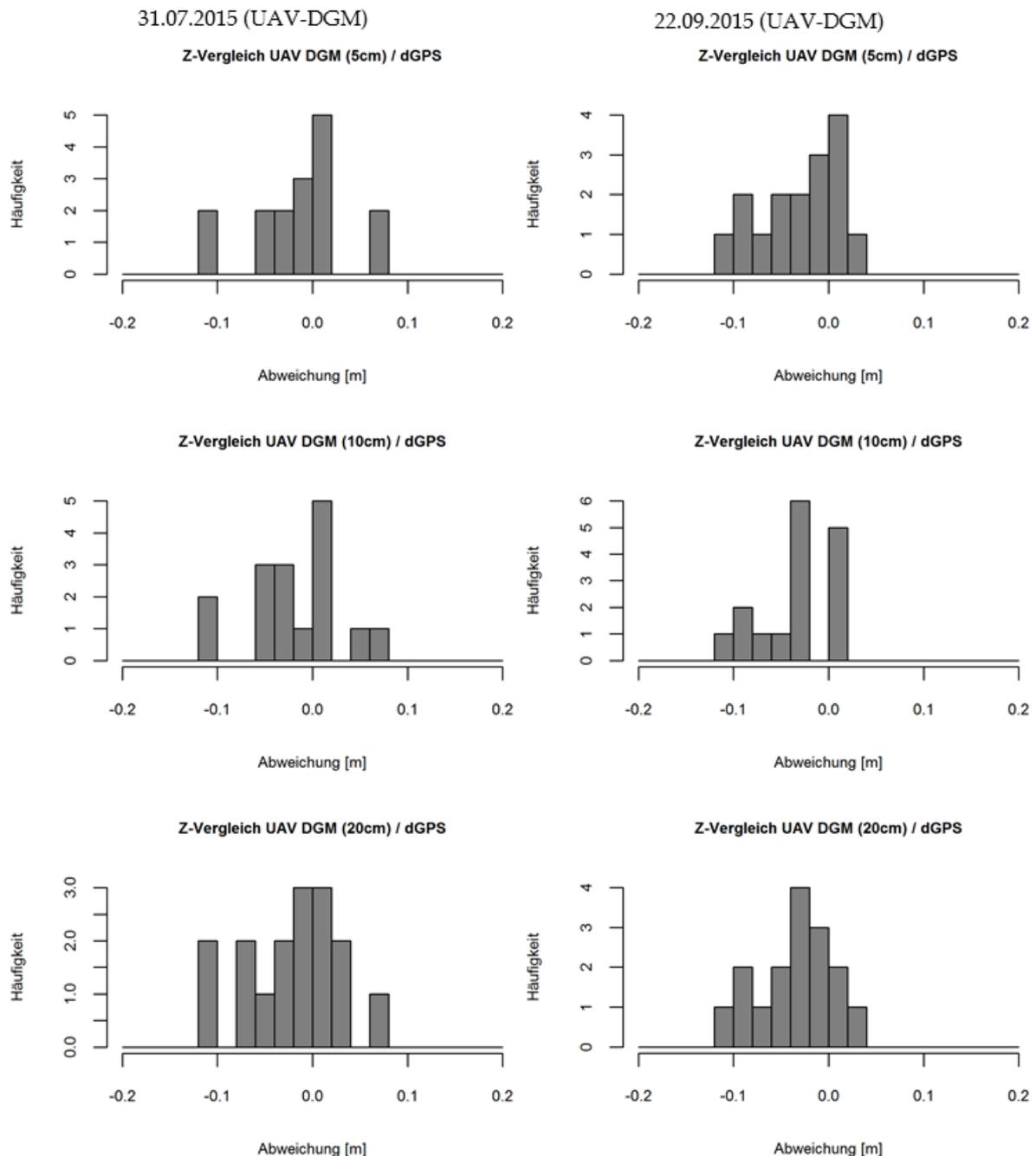
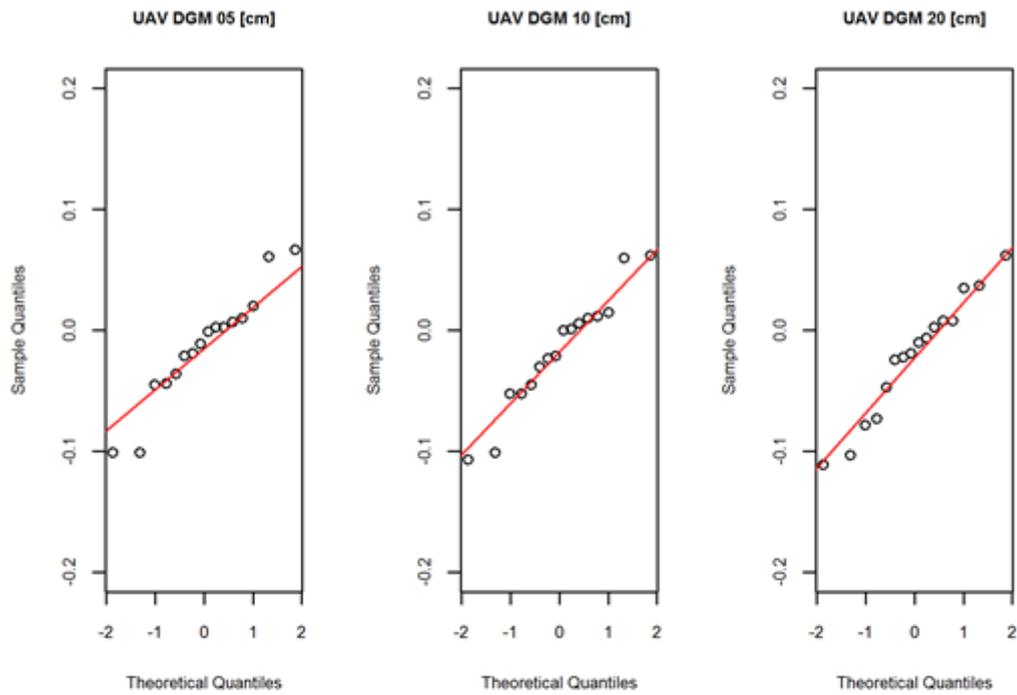


Abbildung 21: Histogramme UAV DGM Z-Fehler, links für den 31.07.2015 und rechts für den 22.09.2015. Die Fehler wurden jeweils für eine DGM Rasterauflösung von 5 cm, 10 cm und 20 cm bestimmt. (Eigene Darstellung)

QQ-Plot (31.07.2015)



QQ-Plot (22.09.2015)

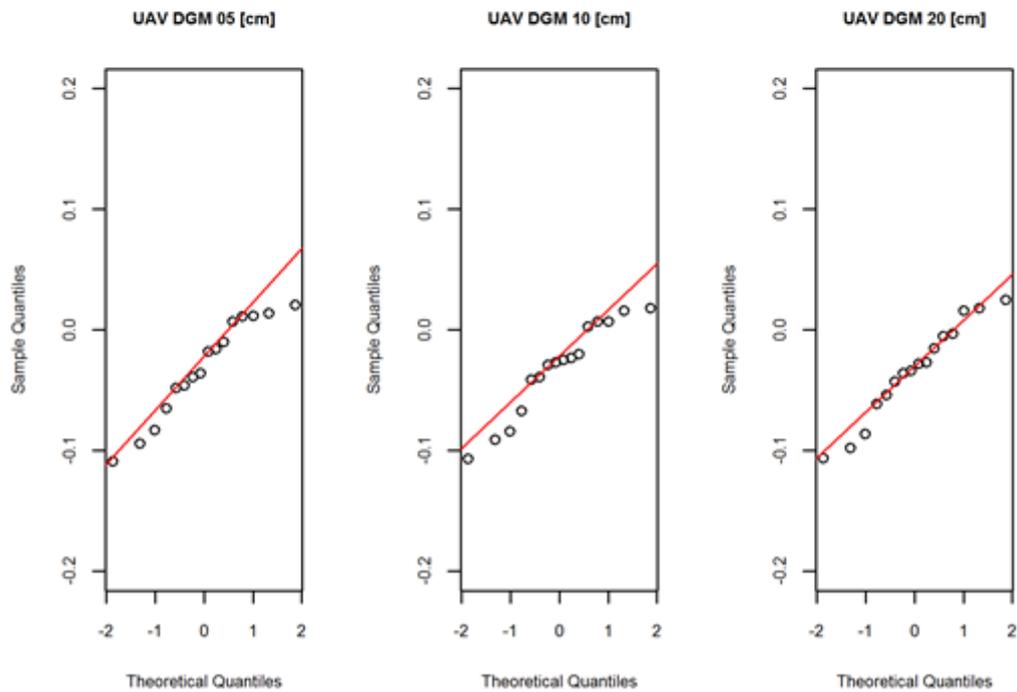


Abbildung 22: QQ-Plot der UAV DGM Z-Fehler (Rasterauflösung 5 cm, 10 cm und 20 cm. Oben für den 31.07.2015 und unten für den 22.09.2015. (Eigene Darstellung)

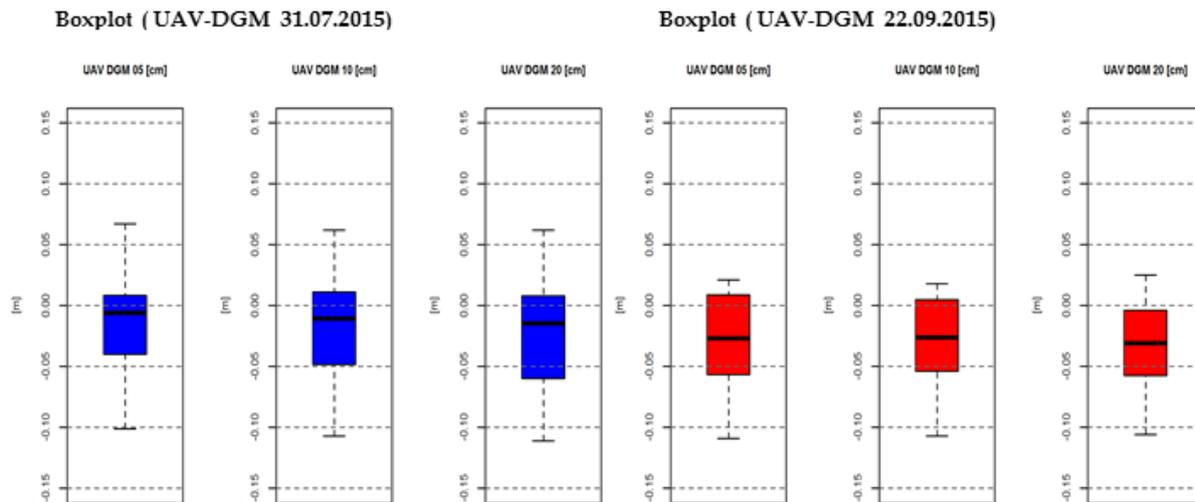


Abbildung 23: Erzeugte Box-Plots der Z-Fehler UAV DGM (5 cm, 10 cm und 20 cm). Links (blau) UAV-DGM vom 31.07.2015 und rechts (rot) UAV-DGM vom 22.09.2015. (Eigene Darstellung)

Für die 20 Einzelpunkte des Profils wurden analog zu den Kontrollpunkten Genauigkeitsmaße berechnet. Das Profil befindet sich auf einer stabilen Terrasse an der orographisch linken Seite des LGG. Die berechneten Fehlermaße für die Profilverpunkte sind der Tabelle 10 zu entnehmen.

Tabelle 10: Z-Fehler UAV DGM bestimmt anhand von 20 Profilverpunkten

Parameter	DGM UAV 5 cm		DGM UAV 10 cm		DGM UAV 20 cm	
	31.07.2015	22.09.2015	31.07.2015	22.09.2015	31.07.2015	22.09.2015
Minimum [m]	-0,12	-0,08	-0,14	-0,09	-0,18	-0,11
Maximum [m]	0,07	0,08	0,07	0,07	0,05	0,08
Minimaler abs. Fehler [m]	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
Maximaler abs. Fehler [m]	0,12	0,08	0,14	0,09	0,18	0,11
Mittlerer abs. Fehler [m]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04
Mittlerer Fehler [m]	0,00	0,02	-0,01	0,02	-0,01	0,01
Standardabweichung [m]	0,05	0,04	0,05	0,04	0,07	0,05
RMSE [m]	0,05	0,04	0,05	0,04	0,07	0,05
ACCz (RMSE x 1.96) [m]	0,09	0,09	0,10	0,08	0,13	0,09
Median der abs. Fehler [m]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03
Median [m]	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
NMAD [m]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Perzentil 68,3 (abs. Fehler [m])	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04
Perzentil 95,0 (abs. Fehler [m])	0,07	0,08	0,11	0,07	0,16	0,08

Die Lage des Profils, der Z-Fehler je Profilverpunkt für den 31.07.2015 und den 22.09.2015 bei einer Rasterauflösung von 10 cm wird zudem aus der Abbildung 24 ersichtlich. Diese Darstellung ermöglicht zudem eine Abschätzung der relativen Genauigkeit der beiden

Modelle. Liegen die roten und blauen Punkte in der Abbildung 24 nahe zusammen oder sind ident, kann von einer hohen relativen Genauigkeit ausgegangen werden. Die übrigen Profildarstellungen für eine Rasterauflösung von 5 cm und 20 cm sind im Anhang C der Arbeit zu finden. Folgende Aussagen lassen sich zur vertikalen Genauigkeit der UAV Geländemodelle tätigen: Der aus den Kontrollpunkten berechnete vertikale RMSE (RMSE_Z) beträgt unabhängig von der Auflösung 5 cm. Bei den Profilpunkten liegt dieser meist bei 4-5 cm, für das UAV DGM vom 31.07.2015 mit einer Auflösung von 20 cm ist dieser höher und beträgt 7 cm. Der aus den Kontrollpunkten bestimmte vertikale RMSE Fehler ist mit dem vertikalen RMSE Fehler der Passpunktfehlerstatistik (Tabelle 8) von 4 cm vergleichbar.

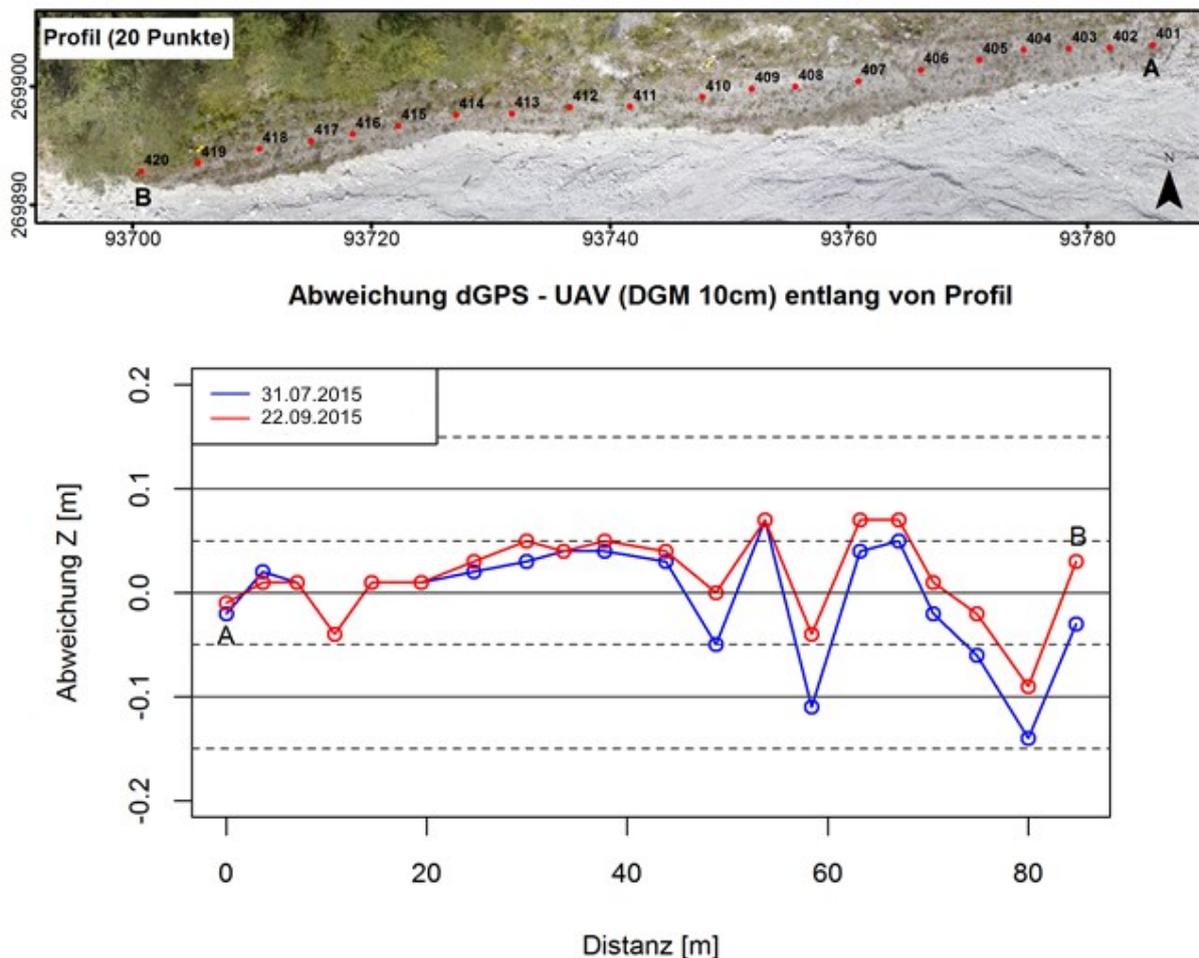


Abbildung 24: Z-Fehler entlang eines Profils für den 31.7.2015 und 22.09.2015 und die Lage der Profilpunkte. (Eigene Darstellung)

Der mittlere absolute Fehler bewegt sich bei den Kontrollpunkten und Profilpunkten zwischen 3 cm und 5 cm. Die Abweichungen befinden sich somit ungefähr innerhalb der Messgenauigkeit der GNSS Messung. Das geforderte Kriterium von dreifach genaueren Referenzdaten ist somit nicht gegeben (Höhle und Höhle 2009). Die Anzahl der

Kontrollpunkte sollte im Idealfall ebenfalls höher sein. Wendet man das 95 % Perzentil der absoluten Fehler als Fehlermaß an, so ergibt sich ein Z-Fehler von 10-11 cm (ermittelt aus den Kontrollpunkten) und von 7-16 cm (ermittelt aus den Profilpunkten). Die erzielte Genauigkeit liegt somit in dem nach Smith et al. (2016) im erwartbarem Genauigkeitsbereich (10-20 cm bei einer Sensor- Objektdistanz von 100 m). Harwin und Lucieer (2012) geben in einer durchgeführten Validierungsstudie den vertikalen RMSE Fehler eine UAV Punktwolke mit 4 bis 6 cm an, wenn die UAV Daten aus einer Höhe von 40 m erfasst werden. Dies ist mit den erzielten Ergebnissen durchaus konsistent, wenn auch die Beurteilung der Höhengenaugkeit in dieser Arbeit auf der Rastermodellebene erfolgte.

Neben der quantitativen Beurteilung der Z-Fehler wurden zur qualitativen Beurteilung aus den erzeugten UAV Oberflächenmodellen Hillshades erzeugt. Colomina und Molina (2014) verweisen darauf, dass kaum Studien zur Beurteilung der morphologischen Qualität von UAV Geländemodellen existieren. Durch die Hillshades lassen sich die Modelle besser visuell beurteilen und es kann zumindest eine qualitative Aussage zur Lagegenauigkeit der Höhenmodelle gemacht werden. Beim direkten Vergleich der erzeugten Hillshades lässt sich kein signifikanter Offset zwischen den Datensätzen erkennen.

Zu Datenvollständigkeit können anhand von erstellter Datenlückenmaske (siehe dazu beispielhaft Abbildung 25) folgende Aussagen gemacht werden: bei einer Rastermaske von 5 cm treten nur minimale Datenlücken auf, diese sind für die Modellbildung völlig unproblematisch. Die Datengrundlage zur Datenlückenmaskenerstellung bildet die UAV Punktwolke vom 22.09.2015.

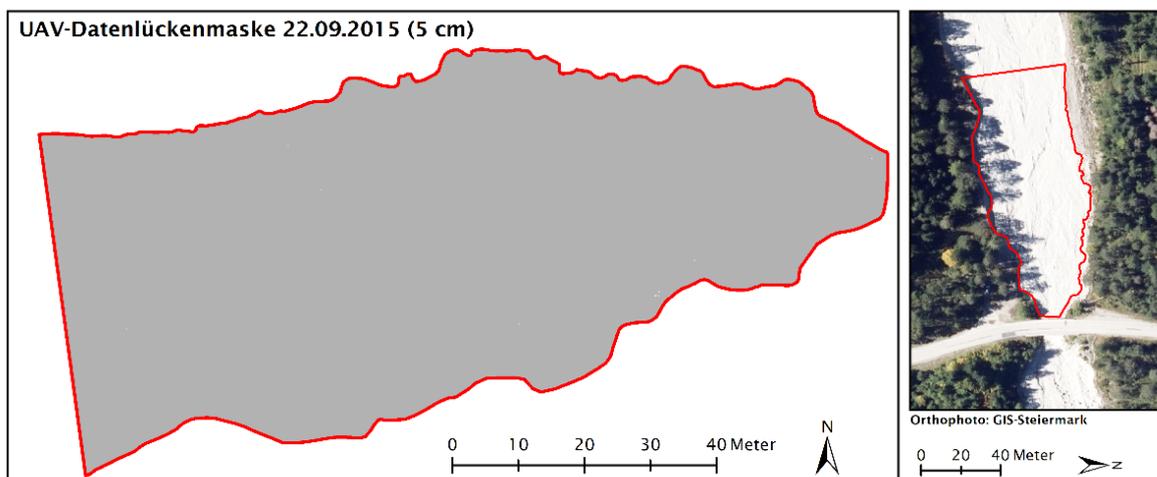


Abbildung 25: UAV-Datenlückenmaske für einen Ausschnitt im LGG basierend auf der UAV Punktwolke vom 22.09.2015 unter der Annahme einer 5 cm Rasterauflösung. (Eigene Darstellung)

Details zur Erstellung finden sich im Kapitel 4.2.2. Bei einer Rasterauflösung von 10 cm und 20 cm treten im gesamten, für die Auswertung relevanten Bereich des Untersuchungsgebietes, keine Datenlücken auf. Zu den Oberflächenmodellen lassen sich folgende weitere Aussagen tätigen: (a) Wenn Vegetation vorhanden ist, sind die Modelle häufig fehlerhaft und unruhig. In Vegetationsbereichen sind zudem aufgrund von Datenlücken gehäuft Interpolationsmuster vorzufinden, beide Aspekte sind aus der Abbildung 26 ersichtlich. Die Filterung der Punktwolken in Bodenpunkte und nicht Bodenpunkte würde ohne das Einbinden von externen Zusatzdaten (zum Auffüllen von Datenlücken) nur sehr eingeschränkt die Qualität der Modelle verbessern. Vegetation ist somit wie bei allen photogrammetrischen Methoden eine Herausforderung bzw. führt zu lückenhaften Messungen der eigentlichen Geländeoberfläche.

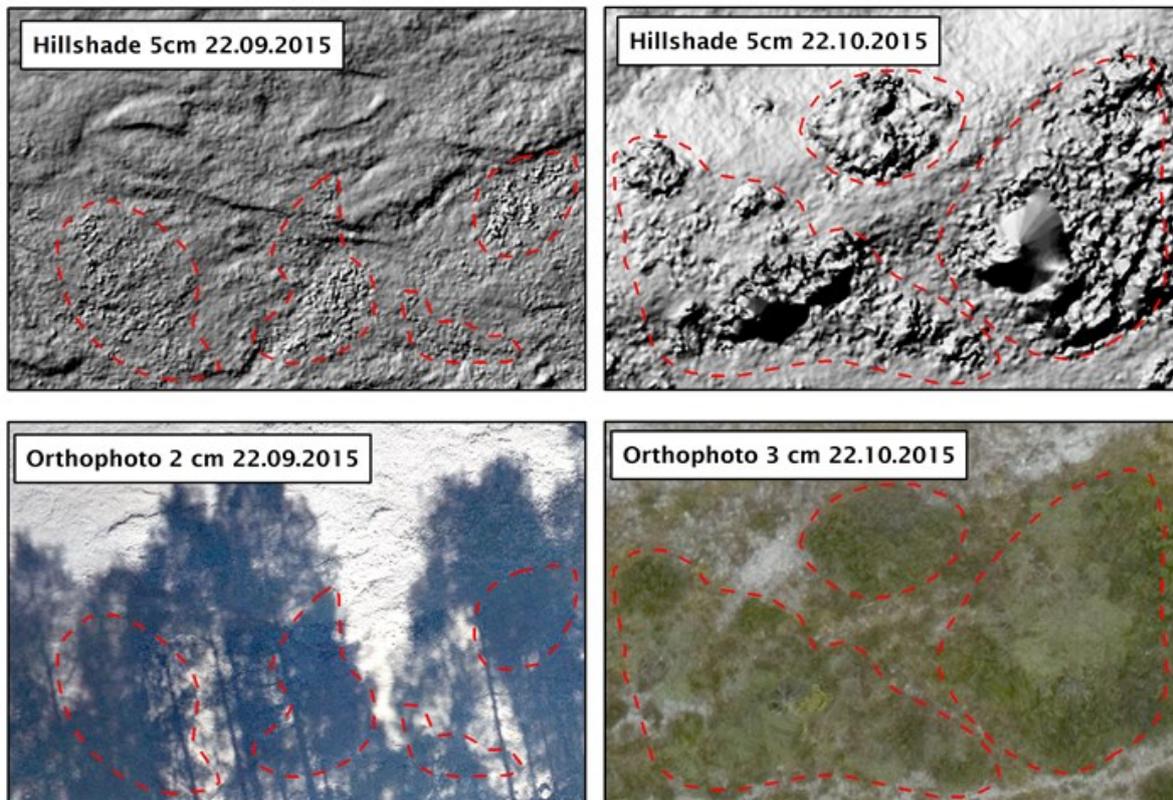


Abbildung 26: Problematik von Schatten und Vegetation. Schattenproblematik und resultierende Fehler im DGM (links) und Problematik von dichter Vegetation bei SfM-MVS erzeugten Modellen (rechts). (Eigene Darstellung)

(b) Das Gerinne selbst wird trotz der hohen Rauigkeit gut von den Modellen abgebildet. An sehr steilen Bereichen (nahezu vertikalen Strukturen z.B. größere Felsblöcke) sind jedoch ebenfalls gehäuft Fehler anzutreffen und die Punktwolke ist an solchen Stellen meist auch weniger dicht. (c) Schattenbereiche in den UAV Luftbildern wirken sich bei der Erstellung der Modelle erwartungsgemäß negativ aus. Schattenbereiche sind im DGM teilweise etwas unruhiger bzw. wirken etwas verrauscht. Schattenbereiche können in den vorliegenden Daten

als Bereiche mit einer größeren Datenunsicherheit angesehen werden, dies ist für Gebiet 1 und 2 für beide Befliegungstermine an der orographisch rechten Seite von Bedeutung. Abbildung 26 vermittelt einen Eindruck über die Schattenproblematik. Eine quantitative Aussage zu diesen Unsicherheiten kann jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht getätigt werden. Auf die Beleuchtungsverhältnisse bei der Bildaufnahme sollte in Zukunft größere Rücksicht genommen werden, dies setzt jedenfalls ein technisch einwandfreies Fluggerät voraus.

4.1.4.2 Validierung Orthophoto

Die erzeugten Orthophotos spielen für weitere Analysen in dieser Arbeit nur eine geringe Rolle. Es soll dennoch eine Aussage über die Lagegenauigkeit getätigt werden. Die Kontrollpunkte müssen zu diesem Zweck signalisiert sein, da sich natürliche Punkte im Untersuchungsgebiet kaum für eine Validierung eignen. Die Signalisierung ist dabei mit einem zusätzlichen Aufwand verbunden. Für das Gebiet 1 und 2 stehen daher am 31.07.2015 nur 5 Kontrollpunkte, für den 22.09.2015 14 Kontrollpunkte und für das Gebiet 3 keine Kontrollpunkte zur Verfügung.

Die Kontrollpunkte wurden analog zur DGM Validierung in der Auswertung nicht als Passpunkte eingesetzt und mittels GNSS Messung bestimmt. Die Lage der Kontrollpunkte wurden im Orthophoto mit Hilfe eines Punkt-Shapes manuell markiert und die XY-Koordinaten im Anschluss extrahiert. Im nächsten Schritt wurde die Differenz zwischen der Bildmessung und den Sollkoordinaten der Kontrollpunkte gebildet. Die Berechnung der Fehlermaße wurde mit der Hilfe eines R-Skripts bewerkstelligt. Die Berechneten Kenngrößen sind dabei der Tabelle 11 zu entnehmen. Der RMSE Fehler in der Lage (RMSE_{xy}) beträgt für den 31.07.2015 und 22.09.2015 jeweils 2 cm. Das 95% Konfidenzintervall der Lagegenauigkeit (ACC_{xy}: Horizontal accuracy at the 95 % confidence interval) beträgt für beide Datensätze 4 cm. Die geringe Anzahl von Kontrollpunkten ist für den 31.07.2015 als kritisch zu betrachten. Die Genauigkeit ist in etwa mit der erzielbaren Lagegenauigkeit der GNSS Messung zu vergleichen. Kontrollpunkte mit einer höheren Genauigkeit (z.B. Totalstationsmessungen) wären für die Validierung eigentlich notwendig. Bedenkt man die hohe geometrische Auflösung der Orthophotos von 2 cm beträgt der ermittelte Lagefehler in etwa 1-2 Pixel. Die manuelle Messung der Kontrollpunkte im Subpixelbereich ist zudem nicht möglich und ein weiterer kritischer Punkt in der Validierung.

Die radiometrische Qualität der erzeugten Orthomosaiken vom 31.07.2015 und 22.09.2015 ist trotz der nicht idealen Beleuchtungsverhältnisse als brauchbar einzustufen. In beiden Orthophotos sind jedoch klar die Beleuchtungsunterschiede erkennbar und die Radiometrie

ist uneinheitlich. Am 22.10.2015 (Gebiet 3) war bei der Befliegung eine geschlossene Wolkendecke vorhanden, dies wirkt sich positiv auf die Radiometrie des Orthomosaiks aus. Das Orthophoto von Gebiet 3 ist radiometrisch sehr einheitlich. Sämtliche erzeugte Bildmosaiken sind im Anhang A-1 bis A-3 der Arbeit zu finden.

Tabelle 11: Lagegenauigkeit Orthophotomosaik LGG von Gebiet 1 und 2

Parameter	Orthophoto 31.07.2015 (GSD 2cm)		Orthophoto 22.09.2015 (GSD 2cm)	
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]
N	5	5	14	14
Minimum (abs. Werte)	0,00	0,01	0,00	0,00
Maximum (abs. Werte)	0,02	0,03	0,04	0,04
Minimum	-0,01	-0,03	-0,02	-0,04
Maximum	0,02	0,01	0,04	0,01
Mittelwert (abs. Werte)	0,01	0,02	0,01	0,01
Mittelwert	0,00	-0,01	0,01	-0,01
Standardabweichung	0,01	0,01	0,01	0,01
Median (abs. Werte)	0,01	0,01	0,01	0,01
Median	0,01	-0,01	0,00	-0,01
NMAD	0,01	0,00	0,01	0,01
RMSE	0,01	0,02	0,02	0,02
68,3 Perzentil	0,01	0,01	0,01	0,01
95,0 Perzentil	0,02	0,03	0,03	0,03
RMSExy		0,02		0,02
ACCxy (RMSExy * 1,7308)		0,04		0,04

In Bereichen mit starker Vegetation kommt es aufgrund der unzureichenden Oberflächenmodellierung zu offensichtlichen geometrischen Fehlern. Das Gerinne ist frei von Vegetation, dieser Punkt wäre daher für weitere Analysen der Orthophotos als nicht problematisch anzusehen.

4.2 TLS - UAV Vergleich

Im folgenden Kapitel werden die erzeugten Punktwolken und DGMs aus den UAV Bildern mit TLS Daten (Punktwolken und DGMs) verglichen. Der Vergleich erfolgt dabei durch unterschiedliche Methoden (Lague et al. 2013): (a) Direkter Vergleich der Punktwolken durch die Cloud to Cloud Distanz (C2C-Distanz), (b) Vergleich der Punktwolke mit einem Mesh durch die Cloud to Mesh Distanz (C2M-Distanz) und (c) Vergleich Rastermodell mit Rastermodell (DoD-Ansatz). Weitere mögliche Ansätze wären der Vergleich der Punktwolke bzw. von Punktmessungen mit einem Rastermodell (Smith et al. 2016) und der Mesh basierte Vergleich (Favalli et al. 2012). Die einzelnen Vergleiche und die Ergebnisse der Vergleiche werden in den Kapiteln 4.2.3 bis 4.2.5 näher erläutert. Eine allgemeine Einführung zum Vergleich erfolgt in Kapitel 4.2.2 Die eingesetzten TLS Daten werden in Kapitel 4.2.1 näher beschrieben.

4.2.1 TLS Daten

Im LGG und weiteren Untersuchungsgebieten im Johnsbachtal werden im Rahmen des Projektes Sodyn-X jeweils im Frühjahr und Herbst eines Jahres TLS-Messungen durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit kamen prozessierte TLS Punktwolken vom 13.10.2015 zum Einsatz. Die Prozessierung von den Rohdaten bis zur georeferenzierten Punktwolke erfolgte dabei durch Dipl.-Geogr. Eric Rascher. Der Autor der Arbeit unterstützte die TLS Erfassungskampagnen im Herbst 2015, erstellte die zusätzlichen mobilen Targets, bestimmte die Target Koordinaten über eine GNSS Messung und bereitete die Target Koordinaten für die Georeferenzierung auf (siehe dazu Kapitel 4.1.1). Für die TLS Erfassung wurde der Laserscanner LMS-Z620 der Firma Riegl eingesetzt, Kenndaten zum Scanner sind in der Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Kenndaten eingesetzter Laserscanner Riegl LMS-Z620 basierend auf Riegl (2010)

Parameter	Wert
Wellenlänge Laser	1500 nm
Reichweite	2 m - 2000 m
FOV	360° (horizontal) / 80° (vertikal)
Maximale Messrate	11000 Punkte / Sekunde
Öffnungswinkel Laser	0,15 mrad
Präzision der Messung (Distanz 100m, 1 Sigma)	5 mm
Genauigkeit der Messung auf (Distanz 100m, 1 Sigma)	10 mm

Das Untersuchungsgebiet LGG (von der Brücke aus Tal einwärts) wurde von vier Standorten aus gescannt. Die mittlere Scanauflösung aller Standorte beträgt bei einer Distanz von 300 m $0,17^\circ$. Zu Beginn wurde ein Übersichtsscan bei jedem Standort erstellt, anhand dem der Scanbereich für den folgenden Detail Scan festgelegt wurde. Die Targets wurden durch einen Feinscan mit hoher Auflösung erfasst. Der Scanner wurde für die Aufnahme auf einem Stativ fixiert. Die folgenden Ausführungen zur Prozessierung der TLS Rohdaten basieren auf Mitteilungen von Dipl.-Geogr. Eric Rascher: Die Prozessierung und Erfassung der TLS Daten erfolgte mit der Software RiScanPro (Version 2.1.1). Die Registrierung der einzelnen Scans zueinander erfolgte durch zylinderförmige Targets. Die Scanner eigenen Koordinatensysteme werden in einem ersten Schritt in ein Projektkoordinatensystem transformiert. Im Anschluss wurden die Daten anhand von 17 Targets (mit bekannten Koordinaten) in ein übergeordnetes Koordinatensystem übergeführt (Georeferenzierung). Aus der Punktwolke wurden Vegetationspunkte und sonstige nicht erwünschte Punkte (z.B. fliegende Punkte) durch Filterung und eine manuelle Nachbearbeitung entfernt. Die georeferenzierte Punktwolke wurde für die Weiterverarbeitung in eine txt-Datei exportiert. Die Intensitätswerte der Punktwolke wurden dabei nicht exportiert. Der Registration Error beträgt pro Scanstandort zwischen 3 cm und 4 cm. An dieser Stelle sei angemerkt, dass keine weiteren unabhängigen Daten zur Überprüfung der Genauigkeit der TLS Daten zur Verfügung stehen.

4.2.2 Allgemeine Anmerkungen zum Vergleich

Zum Vergleich wurden drei Testflächen (A bis C) im LGG (Fluggebiet 3) ausgewählt. Testfläche A befindet sich an einer steilen Böschung, Testfläche B und C im Gerinnebett. In keiner der Testflächen ist Vegetation vorhanden. Der Vergleich anhand von Testgebieten wurde aufgrund der vorhandenen Datenlücken (Abschattungsbereiche) in den TLS Daten gewählt.

Abbildung 27 zeigt die Lage der Testgebiete A bis C und die erstellte Datenlückenmaske für die TLS Daten und UAV Daten. Befinden sich im dargestelltem Polygon Lücken, so sind in diesem Bereich keine Messwerte vorhanden. Die Maskenerstellung erfolgte mit der Hilfe eines ArcGIS Plug-In (Geomorphic Change Detection Software). Bei der Erstellung der Maske wird eine bestimmte Rasterauflösung, im vorliegenden Fall 20 cm, angenommen. Das Tool überprüft im Anschluss ob zumindest ein Messwert pro Rasterzelle vorhanden ist, wenn dies der Fall ist, wird die Rasterzelle Teil der Polygonfläche.

Aus der Abbildung 27 wird deutlich, dass die TLS Daten im Gebiet 3 zum Teil sehr lückenhaft sind. Die Datenlücken wären durch zusätzliche Scanstandorte vor allem durch Scanstandorte

an der orographisch linken Seite des Gerinnens und eventuell auch durch erhöhte Standorte zu minimieren. Die Lage der zwei TLS Standorte (die zwei weiteren Scanstandorte liegen außerhalb der Darstellung) im Gebiet 3 ist aus der Abbildung 27 ersichtlich.

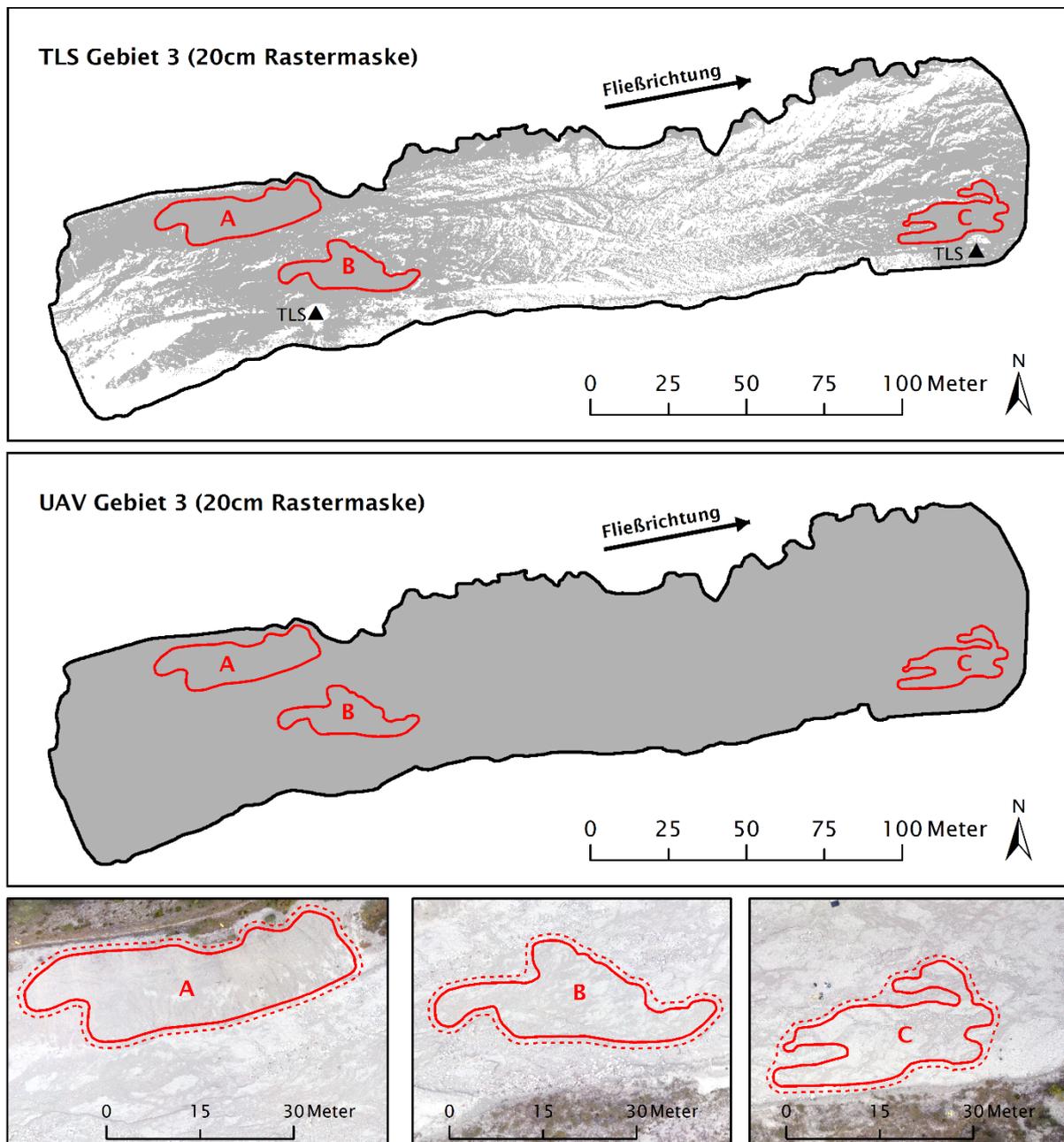


Abbildung 27: Lage der Testflächen A bis C für den TLS-UAV Vergleich im LGG (Gebiet 3): A (an der Böschung), B und C (im Gerinne). Rote durchgezogene Linie zeigt die Vergleichsfläche und die rote strichlierte Linie zeigt den Puffer um die Vergleichsfläche. Die Datenlückenmaske (20 cm) für die TLS Punktwolke (oben) und UAV Punktwolke (in der Mitte). Zudem sind aus der Abbildung die zwei TLS Scanstandorte im Gebiet 3 ersichtlich. (Eigene Darstellung)

Es kann festgehalten werden, dass die vorliegenden TLS Daten in Bezug auf die Datenvollständigkeit für das Gesamtgebiet eindeutig schlechter abschneiden als die UAV

Daten. Datenlücken müssen bei einer weiteren Modellbildung durch Interpolationsverfahren geschlossen werden. Erstellt man für das gesamte Untersuchungsgebiet aus den TLS-Daten ein Raster-DGM, so sind im dazugehörigen Hillshade klar Interpolationsmuster zu erkennen. In Bezug auf die DoD Bildung einer sich ändernden Oberfläche ist dies als kritisch zu betrachten. Durch die folgende Tabelle 13 sollen die Testgebiete weiter charakterisiert werden. Es fällt dabei auf, dass die Punktdichte in Gebiet B und C bei den TLS Daten im Vergleich zu den UAV Daten höher ist, dies liegt daran, dass die Vergleichsflächen B und C sehr nahe am TLS Scanner Standort liegen. Im Gebiet A ist hingegen die UAV Punktwolke dichter. Die Punktdichte wurde dabei anhand der Polygonfläche und der Anzahl der Punkte ermittelt.

Tabelle 13: Vergleich der Testgebiete A-C LGG (Gebiet 3)

Testgebiet	Fläche [m ²]	Punktdichte TLS [P / m ²]	Punktdichte UAV [P / m ²]
A	718,4	1168	1832
B	490,5	1862	1287
C	504,9	6641	1265

Das Gebiet 3 wurde am 13.10.2015 mit dem TLS und am 22.10.2015 mit dem UAV erfasst. Der zeitliche Offset zwischen den beiden Erfassungen beträgt somit 9 Tage, ideal wäre die Erfassung beider Datensätze am selben Tag gewesen. Aufgrund der zeitlichen Verfügbarkeit von Manpower und Material war dies jedoch leider nicht möglich. Zwischen der TLS Erfassung und der UAV Datenerfassung wurde an der meteorologischen Station Weidendom (590 m Seehöhe und circa 2,5 km vom LGG entfernt) ein Niederschlag von 1,1 mm verzeichnet. Für den Vergleich wird angenommen, dass sich die Oberflächen der Testgebiete in den 9 Tagen nicht wesentlich verändert haben. Gebiet 1 und Gebiet 2 wurden am 31.07.2015 und 22.09.2015 mit dem UAV aufgenommen und eignen sich daher aufgrund des größeren zeitlichen Offset kaum für einen methodischen Datenvergleich.

4.2.3 Vergleich Cloud to Cloud Distanz

Der direkte Vergleich der Punktwolken Methode (a) C2C Vergleich erfolgte mit der freien Software CloudCompare (<http://www.danielgm.net/cc>). Die UAV und TLS Punktwolke wurde zu diesem Zweck mit der Hilfe eines Polygons auf das jeweilige Testgebiet zugeschnitten. Um Randeffekte beim Vergleich zu vermeiden wurde das Polygon zum Zuschneiden der UAV-Punktwolke mit einem 1 m Puffer versehen und das Pufferpolygon zum Teil manuell angepasst. Dieses Puffer-Polygon ist aus der Abbildung 27 (rote strichlierte

Linie) ersichtlich. Der eigentliche Vergleich findet dann für die Fläche ohne Puffer (siehe Abbildung 27, rote durchgezogene Linie) statt. Die Punktwolken wurden für den Vergleich nicht weiter aufeinander registriert. Mit Hilfe der Software CloudCompare wurde die C2C Distanz der beiden Punktwolken bestimmt. Die folgenden Aussagen basieren auf Lague et al. (2013): es handelt sich dabei um eine sehr schnelle Methode (in Bezug auf die Rechenzeit), welche den direkten Vergleich von Punktwolken ermöglicht. Für jeden Punkt der einen Punktwolke wird die geringste Distanz zu einem Punkt in der anderen Punktwolke bestimmt. Die C2C Distanz Berechnung kann durch Anpassungen des Algorithmus (z.B. lokale Modellbildung der Referenzpunktwolke) verfeinert werden. Die Distanzwerte beinhalten sowohl Unterschiede der Punktwolken in der Lage (X, Y) als auch in der Höhe (Z). Ein Nachteil der Methode ist, dass die Rauigkeit und Dichte der Punktwolke die Distanzbestimmung beeinflussen. In CloudCompare ist zudem ausschließlich die Berechnung der absoluten Distanzen (ohne Vorzeichen) implementiert.

Eine alternative Methode zum direkten Vergleich von Punktwolken mit Vorzeichen wäre der M3C2 Algorithmus. Die richtige Parametrisierung ist bei dieser Methode nach Meinung des Autors schwierig, beeinflusst das Ergebnis wesentlich und wurde daher im Rahmen dieser Arbeit nicht gewählt. Die Distanzwerte wurden für weitere Berechnungen in die TLS-Punktwolke gespeichert. Für jeden Punkt der TLS Punktwolke ist somit ein Distanzwert zum nächsten Nachbar in der UAV Punktwolke vorhanden.

Tabelle 14: C2C Distanz Statistik für die Testflächen A bis C

Parameter	Testfläche A	Testfläche B	Testfläche C
N	703380	672326	2437948
Minimale absolute Distanz [m]	0,00	0,00	0,00
Maximale absolute Distanz [m]	0,25	0,25	0,28
Mittlere absolute Distanz [m]	0,03	0,06	0,07
Standardabweichung [m]	0,02	0,02	0,03
RMSE [m]	0,04	0,07	0,08
Median der absoluten Distanzen [m]	0,03	0,06	0,08
NMAD [m]	0,02	0,02	0,03
Perzentil 68,3 der absoluten Distanzen [m]	0,04	0,07	0,09
Perzentil 95 der absoluten Distanzen [m]	0,06	0,10	0,12
Perzentil 99 der absoluten Distanzen [m]	0,08	0,11	0,13

Mit Hilfe eines R-Skripts wurden aus den Distanzwerten statistische Kennzahlen (Tabelle 14) berechnet und Histogramme (Abbildung 28) erstellt. Die mittlere absolute Distanz beträgt je

nach Vergleichsfläche: 3 cm (A), 6 cm (B) und 7 cm (C). Das 99% Perzentil beträgt für die Testflächen: A (8 cm), B (11 cm) und C (13 cm), 99 % der Distanzen liegen somit unter dem jeweiligen Wert. Die Verteilung der Abweichungen wird aus der Abbildung 28 ersichtlich. Die y-Achse der Histogramme ist logarithmisch und die Klassenbreite im Histogramm beträgt 1 cm. Die Häufigkeit wird jeweils an der Position des Klassenzentrums geplottet. Dies ist auch für alle folgenden Histogramme in Kapitel 4.2.4 und 4.2.5 der Fall. Die maximale erreichte Abweichung in allen Testgebiete beträgt 28 cm.

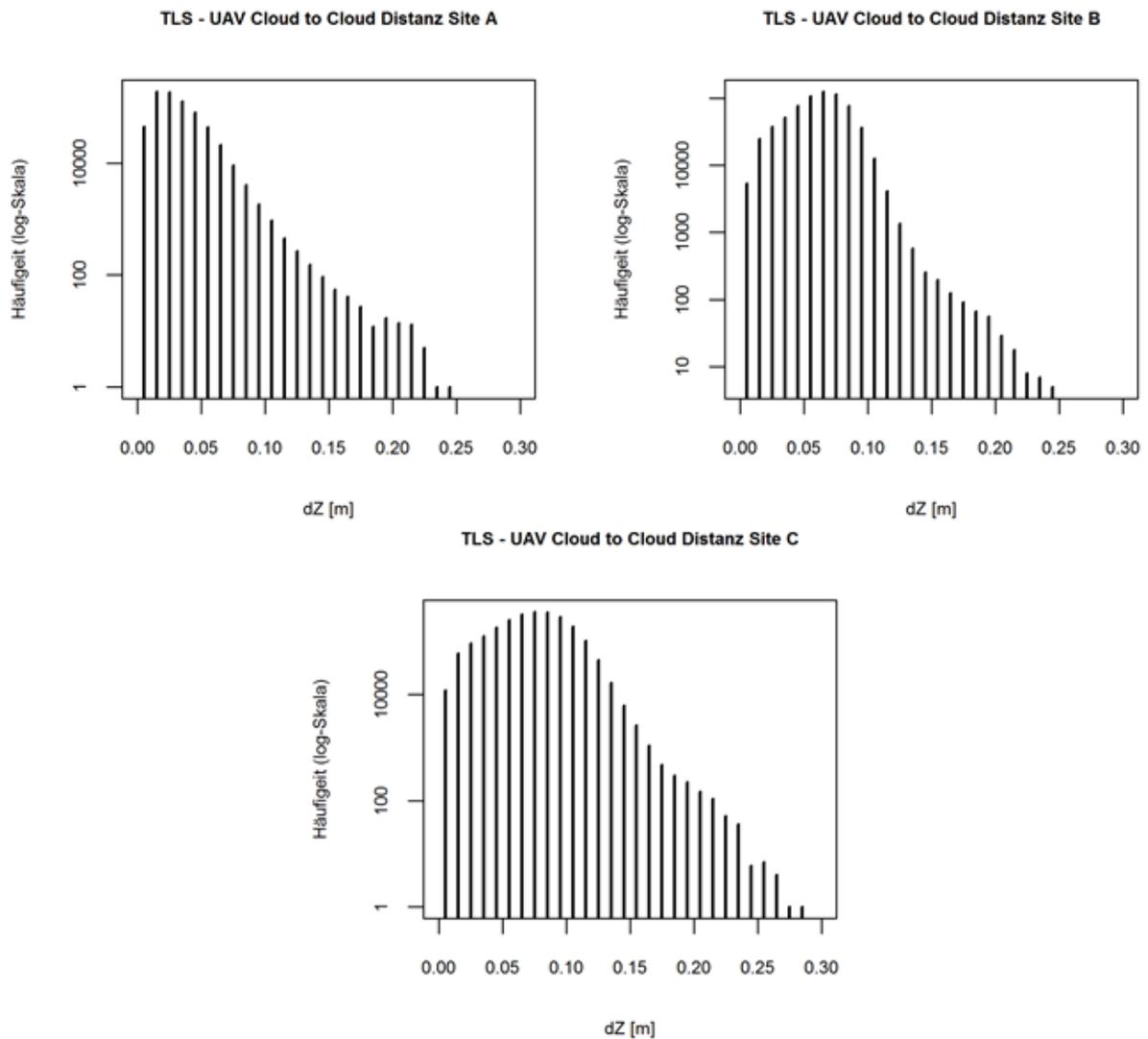


Abbildung 28: Histogramme der C2C-Distanz für die Testflächen (Site) A bis C (y-Achse ist logarithmisch skaliert). (Eigene Darstellung)

4.2.4 Vergleich Cloud to Mesh Distanz

Bei der Methode (b), der Berechnung der Cloud to Mesh Distanz, wird die Distanz zwischen einer Punktwolke und einem Mesh ermittelt. Bei der Methode ist zumindest für eine der

beiden Punktwolken eine Modellbildung (Mesh-Erstellung) notwendig, dies ist bei komplexer Topographie schwierig (Lague et al. 2013). Die Vorverarbeitung der Punktwolken erfolgte analog zu Kapitel 4.2.3 und wurde um einen Punkt, der Mesh-Erstellung ergänzt. Die Mesh-Erstellung erfolgte für die UAV Punktwolke anhand einer Delaunay 2.5 D Triangulierung, wobei die maximale Kantenlänge mit 0,2 m begrenzt wurde. Nach der Mesh-Erstellung erfolgte die Distanzberechnung, wobei die Distanzwerte analog zu Kapitel 4.2.3 in die TLS Punktwolke gespeichert wurden.

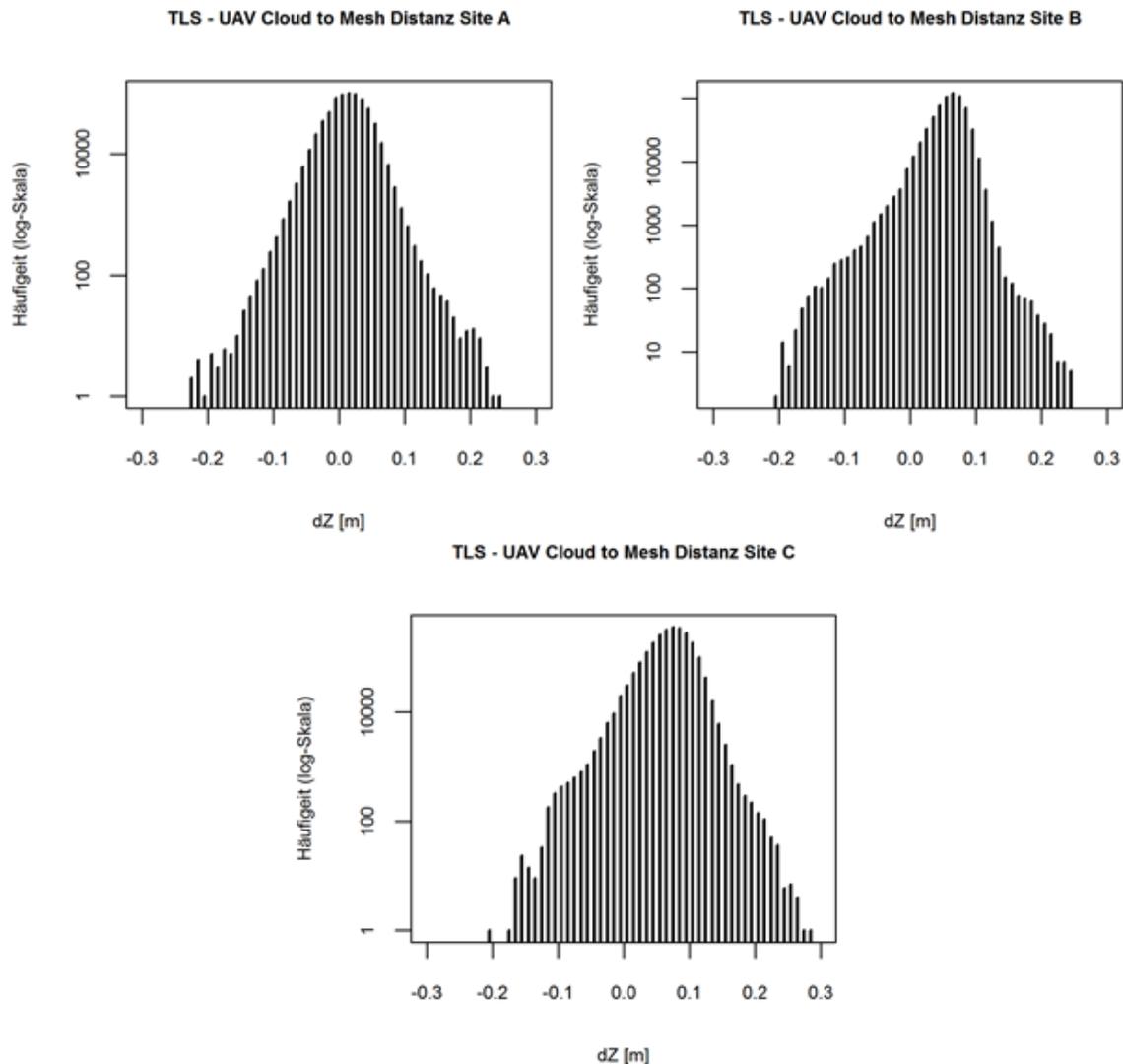


Abbildung 29: Histogramme C2M-Distanz für die Testflächen (Site) A bis C (y-Achse ist logarithmisch skaliert). (Eigene Darstellung)

Die weiteren Analysen wurden anhand von einem R-Skript durchgeführt. Bei dieser Methode werden jedoch im Unterschied zur Methode (a) dieser Arbeit Distanzwerte mit Vorzeichen ausgegeben. Die Verteilung der Abweichungen für das jeweilige Testgebiet ist aus den Histogrammen in der Abbildung 29 ersichtlich. Tabelle 15 beinhaltet die berechneten

statistischen Parameter. Zahlreiche der berechneten statistischen Parameter des C2M Vergleichs sind auf Zentimetergenauigkeit (wie in den Tabellen angegeben) mit den statistischen Parametern des C2C Vergleichs ident bzw. unterscheiden sich diese nur im mm Bereich voneinander. Auch die im cm-Bereich nicht identen Parameter sind durchaus ähnlich und unterscheiden sich in der Regel nur um 1 bis 2 cm. Aus beiden Methoden würde man somit ähnliche Schlüsse bzgl. der Abweichungen zwischen TLS Daten und UAV Daten ziehen. Die sehr ähnlichen Ergebnisse der C2C mit der C2M Methode sind wohl auch auf die hohe Punktdichte der UAV Punktwolke zurückzuführen. Das Mesh wird somit auch in einer demensprechend hohen Auflösung gebildet und ist somit der Punktwolkeninformation sehr ähnlich.

Tabelle 15: C2M Distanz Statistik für die Testflächen A bis C

Parameter	Testfläche A	Testfläche B	Testfläche C
N	703380	672326	2437948
Minimum [m]	-0,23	-0,20	-0,20
Maximum [m]	0,25	0,25	0,28
Minimale absolute Distanz [m]	0,00	0,00	0,00
Maximale absolute Distanz [m]	0,25	0,25	0,28
Mittlerer absolute Distanz [m]	0,03	0,06	0,07
Mittlerer Distanz [m]	0,01	0,06	0,07
Standardabweichung [m]	0,03	0,03	0,03
RMSE [m]	0,03	0,06	0,08
Median der absoluten Distanzen [m]	0,02	0,06	0,07
Median [m]	0,02	0,06	0,07
NMAD [m]	0,03	0,02	0,03
Perzentil 68,3 der absoluten Distanzen [m]	0,03	0,07	0,09
Perzentil 95 der absoluten Distanzen [m]	0,06	0,10	0,11
Perzentil 99 der absoluten Distanzen [m]	0,08	0,11	0,13

Dies Aussage kann auch durch einen durchgeführten Test, Berechnung der C2M Distanz zwischen UAV-Mesh und UAV Punktwolke, bestätigt werden. So waren bei diesem Test in der Testfläche A 99,989 % und bei der Testfläche B und C 99,998 % der Abweichungen in einem Bereich von $< \pm 1$ cm. Einen räumlichen Eindruck der Abweichungen zwischen der UAV Punktwolke und der TLS Punktwolke vermittelt die Abbildung 30. Aufgrund der hohen Datendichte werden in der Abbildung 30, für das jeweilige Testgebiet nur 10 % der berechneten Abweichungen dargestellt.

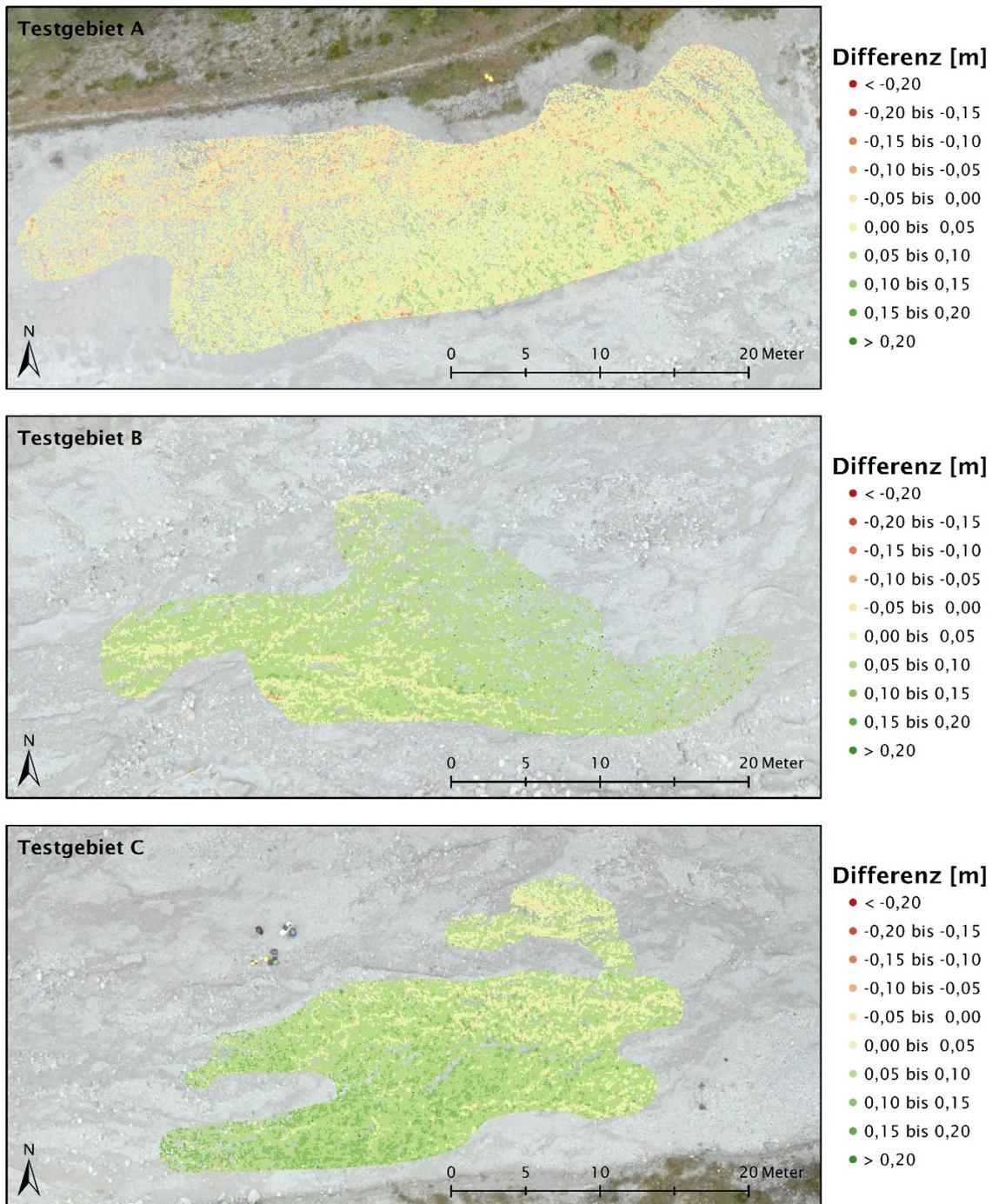


Abbildung 30: C2M Vergleich für die Testgebiete A bis C (10% der Abweichungen sind dargestellt). (Eigene Darstellung)

Das Sampling der Daten erfolgte dabei durch ein R-Skript, die Ziehung der Stichprobe ist dabei zufällig und umfasst 10% der gesamten Abweichungen. Die Darstellung erfolgte in ArcGIS 10.3. Folgende Feststellungen können anhand der Abbildung 30 gemacht werden: der überwiegende Teil der gezeigten Abweichungen ist im positiven Bereich, die TLS Daten sind somit meist höher als die UAV Daten. Dies stimmt auch gut mit den Ergebnissen in Kapitel 4.2.5 (DoD Vergleich) überein.

4.2.5 DEM of Difference Vergleich

Nach Lague et al. (2013) sind folgende Anmerkungen zu dieser Methode zu machen: es handelt sich um eine sehr schnelle Methode (in Bezug auf die Rechenzeit), sie wird in den Geowissenschaften häufig angewendet und bei der Methode werden nur Abweichungen in der Höhe ermittelt (kein wirklicher 3D-Vergleich). Der Einsatz der Methode ist in steilen Bereichen sehr eingeschränkt bis unmöglich (z.B bei vertikale Strukturen und Überhängen). Die korrekte Beschreibung einer sehr rauen und komplexen Geländeoberfläche ist mit einem Rastermodell zudem schwierig (Schürch et al. 2011). Die Variabilität der Topographie innerhalb einer DGM Rasterzelle wird auf der anderen Seite in beiden Geländemodellen gemittelt und die Modelle sind somit auch wieder vergleichbar (Smith et al. 2016). Die Analyse der Veränderung des Sedimentkörpers in dieser Arbeit basiert zudem auf dieser Methode.

Tabelle 16: DoD Statistik für die Testflächen A bis C

Parameter	Testfläche A	Testfläche B	Testfläche C
N	14712	9272	8587
Minimum [m]	-0,30	-0,22	-0,10
Maximum [m]	0,21	0,18	0,21
Minimale absolute Abweichung [m]	0,00	0,00	0,00
Maximale absolute Abweichung [m]	0,30	0,22	0,21
Mittlere absolute Abweichung [m]	0,04	0,07	0,08
Mittlere Abweichung [m]	0,02	0,07	0,08
Standardabweichung [m]	0,04	0,02	0,03
RMSE [m]	0,04	0,07	0,08
Median der absoluten Abweichungen [m]	0,03	0,07	0,08
Median der Abweichungen [m]	0,02	0,07	0,08
NMAD [m]	0,04	0,02	0,03
Perzentil 68,3 der absoluten Abweichungen [m]	0,04	0,08	0,09
Perzentil 95 der absoluten Abweichungen [m]	0,08	0,10	0,12
Perzentil 99 der absoluten Abweichungen [m]	0,12	0,12	0,14

Zum Vergleich des UAV-Rastermodells mit dem TLS-Rastermodell, Methode (c) sind jedenfalls einige Vorverarbeitungsschritte notwendig. Grundsätzlich wurden in Agisoft Photoscan bereits ein Raster-DGM aus den UAV-Daten erstellt, für die TLS Daten liegt dies noch nicht vor. Aus Gründen der Vergleichbarkeit entschloss sich der Autor dazu, beide Datensätze von der Punktwolke weg gleich zu prozessieren. Eine zusätzliche Unsicherheit durch unterschiedliche Softwarepakete soll somit vermieden werden.

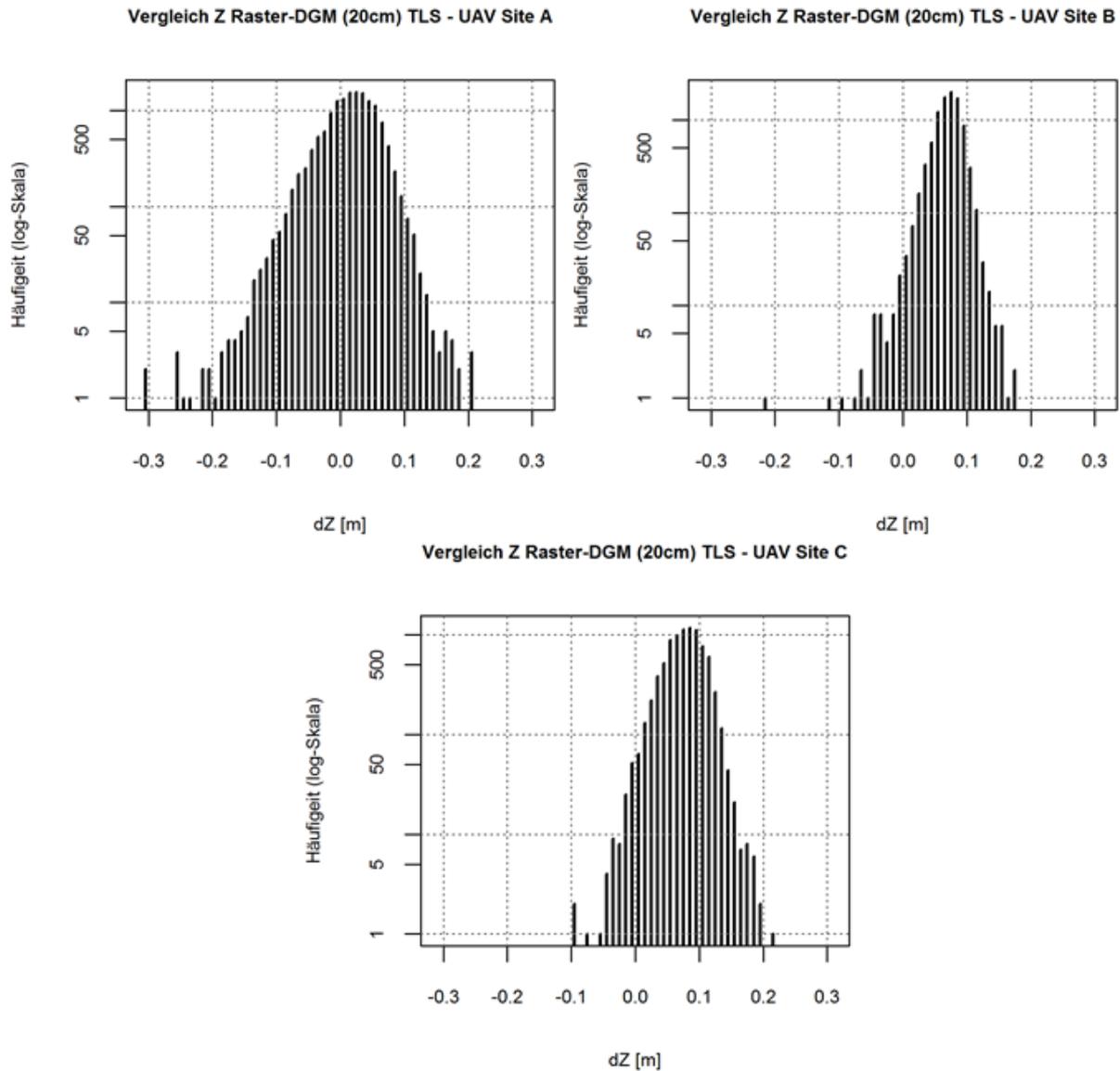


Abbildung 31: Histogramme DoD Vergleich für die Testflächen (Site) A bis C (y-Achse ist logarithmisch skaliert). (Eigene Darstellung)

Der in weiterer Folge beschriebene Arbeitsvorgang wurde daher sowohl für die UAV Punktwolken als auch die TLS Punktwolken durchgeführt. Die DGM Erstellung umfasste dabei folgende Punkte: (a) Zuschneiden der Punktwolken auf das Gebiet 3, (b) Konvertierung der zugeschnittenen Punktwolken in ein Punkt-Shape, (c) TIN (Triangulated Irregular Network) Erstellung durch eine Delaunay Triangulation und (d) Raster-DGM Erstellung aus dem TIN (Rasterzellgröße 20 cm, Natural neighbors Interpolation). Für die Punkte (c) und (d) wurden Funktionen von einem ArcGIS Plug-In (Geomorphic Change Detection Software) genutzt, für die Punkte (a) und (b) ArcGIS 10.3 und CloudCompare. Für die DoD Berechnung wurden die DGM-Raster mit der Hilfe einer Rastermaske auf die jeweiligen Testgebiete zugeschnitten. Die Rastermaske mit einer Auflösung von 20 cm wurde aus dem jeweiligen

Testgebiet-Polygon erstellt. Aus den beiden Modellen wurde anschließend die Differenz gebildet, wobei vom TLS DGM das UAV DGM abgezogen wurde. Positive Differenzen bedeuten somit, dass das TLS DGM höher ist als das UAV DGM. Liegen negative Differenzen vor, so ist das Gegenteil der Fall.

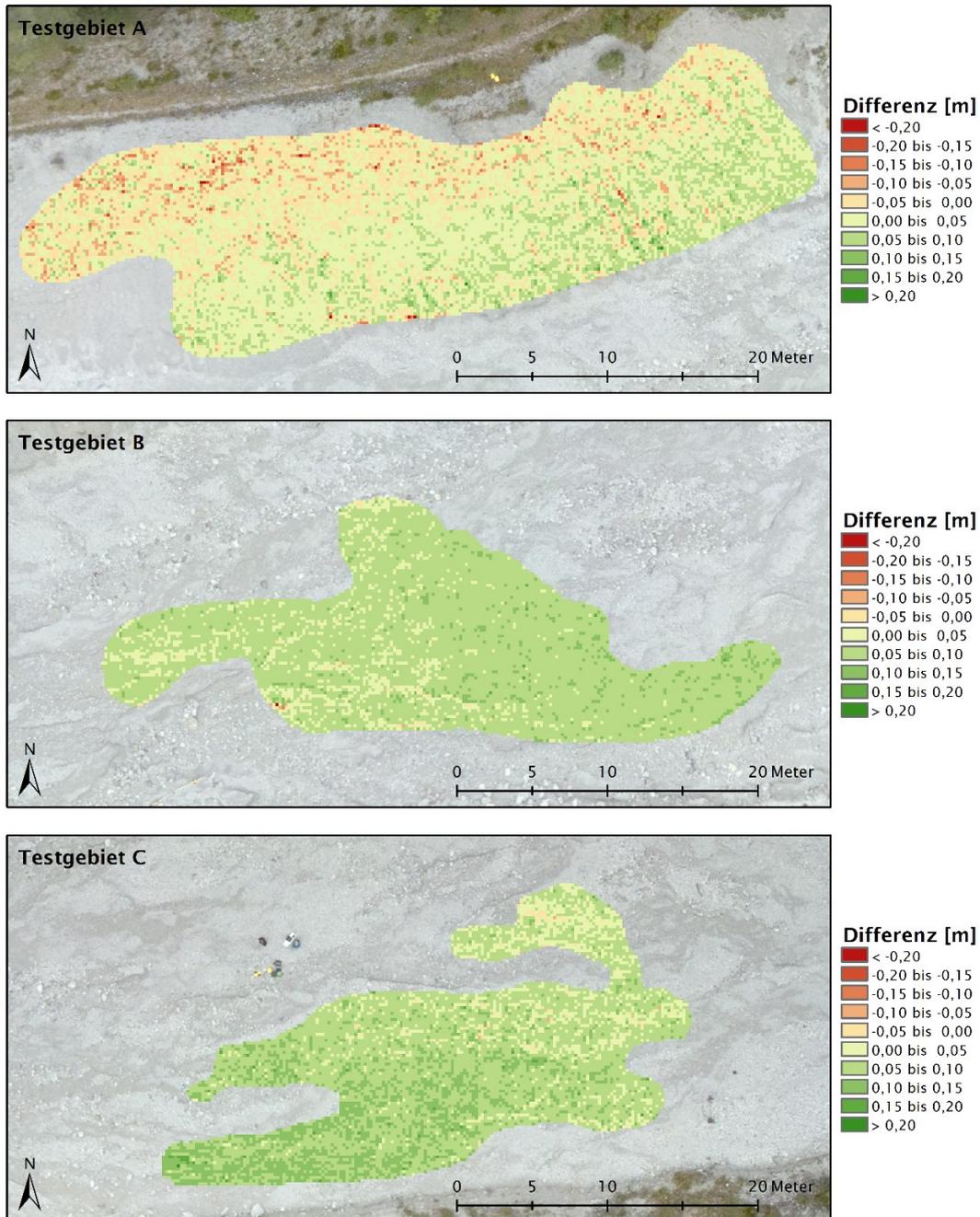


Abbildung 32: DoD Vergleich (TLS DGM - UAV DGM 20 cm Rasterauflösung) für die Testgebiete A bis C. (Eigene Darstellung)

Die Distanzwerte wurden wie in den vorherigen Kapiteln in R näher analysiert. Tabelle 16 zeigt die berechneten statistischen Kenngrößen und Abbildung 31 die erzeugten Histogramme. Die mittlere Absolute Abweichung beträgt für die Testflächen: A (4 cm), B (7

cm) und C (8 cm). Bei der Testfläche B und C fällt in den Histogrammen auf, dass die Abweichungen sich zum Großteil im positiven Bereich befinden, das TLS DGM offensichtlich höher ist als das UAV DGM. 99 % der Höhenabweichungen zwischen UAV und TLS liegen für die Testflächen unter: 12 cm (A und B) und 14 cm (C). Die maximale Abweichung ermittelt aus allen Testgebieten beträgt 30 cm. Sehr hohe Abweichungen treten nicht so häufig auf, dies wird auch durch die Histogramme bestätigt. Ein guter räumlicher Eindruck der bestimmten Abweichungen wird durch die DoD-Raster der Testgebiete in Abbildung 32 vermittelt. Auch hierbei fällt auf, dass in den Testgebieten B und C die TLS Daten in Vergleich zu den UAV Daten meist höher sind.

4.3 ALS - UAV Vergleich

Im Johnsbachtal wurde für das Projekt Sedy-X im August 2015 eine ALS Befliegung durchgeführt. Metadaten zur Befliegung, Streifendifferenzenmodelle, Punktdichtekarten oder ein Bericht zur Befliegung und Auswertung waren bis zum Zeitpunkt der Fertigstellung des empirischen Teils dieser Arbeit (31.07.2016) nicht vorhanden. Das genaue Aufnahmedatum und weitere wichtige Informationen zur Qualität der ALS Daten sind somit für eine Analyse nicht bekannt. Neben den fehlenden Metainformationen sind die Daten auch in Bezug auf die Lage nicht mit den ALS Daten aus dem Jahr 2011 (Land Steiermark) und den UAV Daten dieser Arbeit konsistent. Die ALS Daten weisen jedenfalls einen Versatz in der Lage auf. Die ALS Daten werden derzeit an die bestehenden ALS Daten vom Land Steiermark angepasst. Ein Vergleich wird daher aus den zuvor genannten Gründen zum derzeitigen Zeitpunkt als nicht sinnvoll erachtet. Eine Korrektur der Daten und die Suche nach Fehlerursachen kann in Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen. Der geplante praktische Vergleich der UAV Daten mit den ALS Daten findet daher in dieser Arbeit nicht statt, es können jedoch einige allgemeine Überlegungen zum Vergleich getätigt werden.

Generell kann man davon ausgehen, dass die Punktdichte bei den ALS Daten geringer ist als bei den UAV Daten. Die Auflösung der abgeleiteten ALS-Rastermodelle (1 m) sind um das 5-20-fache geringer als die erzielte Rasterauflösung der UAV Geländemodelle (5 cm, 10 cm und 20 cm) in dieser Arbeit. Die Genauigkeit der ALS Punktwolken wird für die bestehenden ALS Daten in der Steiermark in der Lage mit $\pm 0,15$ m und in der Höhe mit $\pm 0,40$ m angegeben (GIS Steiermark 2016 c). Die Höhengenaugigkeit der UAV Geländemodelle in dieser Arbeit ist somit, unabhängig welches Fehlermaß zur Anwendung kommt, meist etwas besser (siehe Kapitel 4.1.4). Die Lagegenauigkeit kann ebenfalls als besser angesehen werden, wobei diese Aussage durch weitere quantitative Analysen untermauert werden sollte.

Ein direkter Vergleich der Daten auf Ebene der Rastermodelle ist aufgrund der Auflösungsunterschiede vermutlich als weniger sinnvoll zu erachten. Ein Vergleich auf Ebene der Punktwolken, wie dies mit den TLS Punktwolken in dieser Arbeit erfolgte, wäre grundsätzlich möglich. Ein klarer Vorteil der ALS-Daten gegenüber den UAV-Daten ist sicherlich die Flächenleistung und die Tatsache, dass selbst bei dichter Vegetation Information über die tatsächliche Geländeoberfläche vorhanden ist.

4.4 Quantifizierung der Veränderung des Sedimentkörpers

Das folgende Kapitel beinhaltet das durchgeführte Change Detection anhand der erstellten UAV DGMs. Die gewählte Methode (DoD) ist rasterbasiert und ermöglicht die Quantifizierung der Oberflächenveränderung im LGG. In Kapitel 4.4.1 erfolgen einführende Anmerkungen zu den Daten und den äußeren Rahmenbedingungen, Kapitel 4.4.2 beschreibt die Durchführung und diskutiert die eingesetzte Methode, in Kapitel 4.4.3 wird das Ergebnis vorgestellt.

4.4.1 Einführende Anmerkungen

Für das Fluggebiet 1 und 2 steht ein DGM für den 31.07.2015 und 22.09.2015 zur Verfügung. Fluggebiet 3 wurde im Rahmen der Arbeit nur am 22.10.2015 erfasst. Grundsätzlich wäre ein Change Detection in Kombination mit den durch das Projekt Sedy-X vorhandenen multitemporalen TLS Daten im LGG möglich. Voraussetzung hierfür ist die Georeferenzierung der TLS Daten (siehe dazu Kapitel 4.2) oder zumindest eine relative Orientierung der UAV und TLS Daten zueinander. Für das Gebiet 1, 2 und 3 stehen in der Feldperiode 2015 neben den bereits erwähnten UAV Daten, TLS Daten für das Frühjahr (31.04.2015) und den Herbst (13.10.2015) zur Verfügung. Ein Datenvergleich zwischen UAV und TLS unter der Annahme einer sich nicht geänderten Oberfläche (zwischen den Erfassungszeitpunkten) erfolgte in Kapitel 4.3. Die ALS Daten könnten zudem einen zusätzlichen Datensatz, wenn auch mit einer geringeren geometrischen Auflösung für ein Change Detection bilden.

Das Change Detection wird aufgrund des methodischen Schwerpunktes der Arbeit anhand der beiden UAV Datensätze im Gebiet 1 und 2 durchgeführt. Der zeitliche Offset zwischen den Datensätzen beträgt 53 Tage. Die Höhengenaugigkeit der erstellten Rastermodelle und die Qualität der Modelle wurde bereits in Kapitel 4.1.4 näher behandelt. Ein Vergleich der UAV Daten untereinander ermöglicht zudem Kapitel 4.1.3.

Zu den lokalen Niederschlagsverhältnissen und Abflussverhältnissen im LGG Untersuchungsgebiet bzw. für das Einzugsgebiet des LGG selbst kann aufgrund von nicht vorhandenen Messungen nur schwer eine Aussage getätigt werden. Für die nähere Umgebung stehen jedoch meteorologische Stationsdaten für eine Abschätzung der Niederschlagsverhältnisse zur Verfügung. Abbildung 33 zeigt die Witterungsverhältnisse anhand der meteorologischen Station Weidendom (590 m Seehöhe und circa 2,5 km vom LGG entfernt) und die Termine der UAV und TLS Datenerfassung in der Feldsaison 2015. Zwischen

der UAV Datenerfassung am 31.07.2015 und 22.09.2015 wurde an der Station Weidendom ein Niederschlagssumme von insgesamt 88 mm verzeichnet. Aus der Abbildung 33 werden vier Niederschlagsereignisse mit einem Tagesniederschlag > 10 mm ersichtlich. Generell war der August 2015 in der Region laut ZAMG (2015 b) sehr trocken (nur 25-50% des durchschnittlichen Monatsniederschlages). Der September 2015 bewegte sich laut ZAMG (2015 c) im Bereich des langjährigen Durchschnitts.

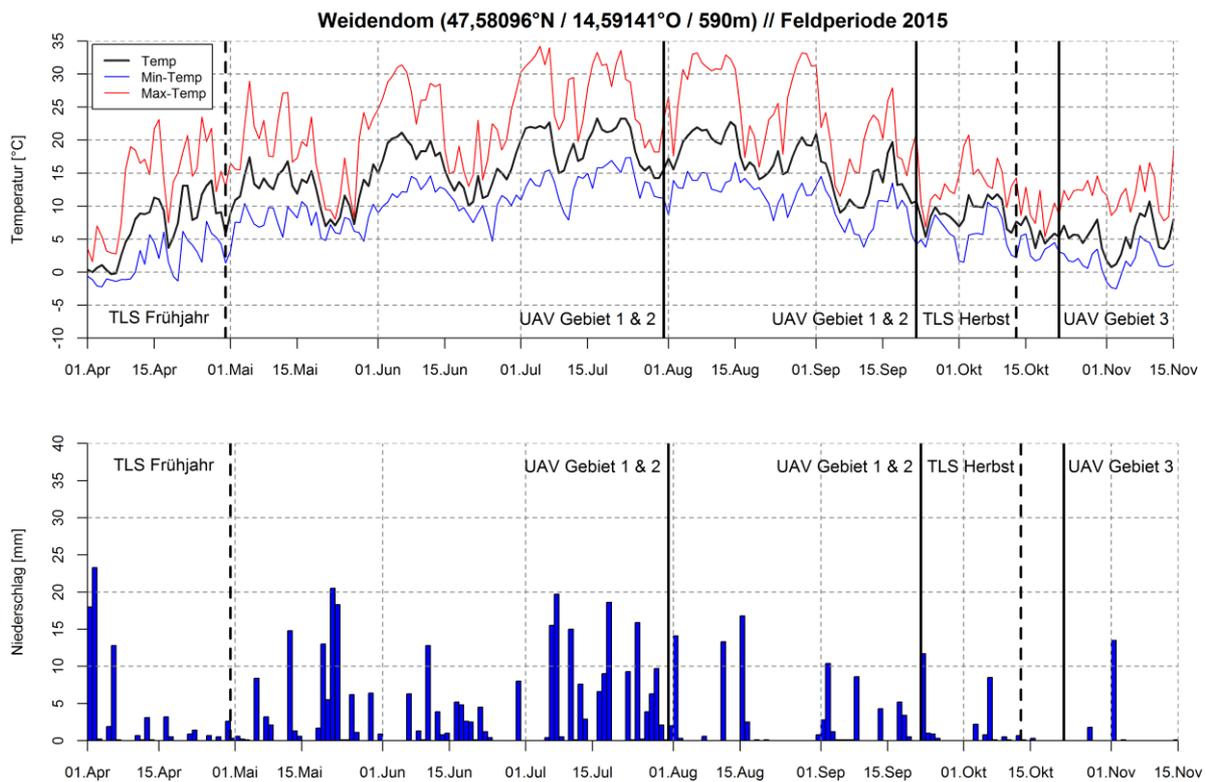


Abbildung 33: Temperatur (oben) und Niederschlag (unten) an der Station Weidendom für die Feldsaison 2015. Temp: Tagesmitteltemperatur, Min-Temp: Tagesminimum, Max-Temp: Tagesmaximum. Die strichlierte Linie zeigt den Termin der TLS Datenerfassung (Sedyn-X Projekt) die durchgezogene Linie zeigt den Termin der UAV Datenerfassung. (Eigene Darstellung auf Basis der Daten Wegener Center (2015))

4.4.2 Durchführung

Im ersten Schritt wurden die erzeugten Oberflächenmodelle auf das Gerinne und den vegetationsfreien Bereich zugeschnitten. Zum Teil wurden auch offensichtlich fehlerhafte Bereiche (z.B. Schattenbereiche bei der Befliegung) und künstliche Gegenstände (z.B. der mit einer 10 cm dicken Schaumstoffmatte unterlegte Start und Landebereich des UAVs) ausgeschnitten. Zu diesem Zweck wurden Rastermasken mit einer zum jeweiligen Datensatz passenden Rasterauflösung gewählt. Die zugeschnittenen Bereiche entsprechen somit der DGM Definition. Die DoD Berechnung erfolgte dabei nach der folgenden Formel 9, verändert

nach Williams (2012). D_z steht dabei für die Veränderung in der Höhe zwischen den beiden Messzeitpunkten t_2 und t_1 , Z_{t_2} für das später erfasste DGM, Z_{t_1} für das früher erfasste DGM. Die Berechnung und die Vorverarbeitung der Geländemodelle erfolgte in ArcGIS 10.3. Es wurden dabei DoDs aus den 5 cm und den 10 cm Geländemodellen erstellt.

$$D_z = Z_{t_2} - Z_{t_1} \quad (9)$$

Positive D_z Werte können bei der gewählten Formel als Deposition, negative Werte als Erosion von Sediment interpretiert werden (Williams 2012). In der Glaziologie ist die DoD Methode auch als geodätische Methode zur Bestimmung der Massenbilanz eines Gletschers bekannt, positive Werte werden als Akkumulation, negative Werte als Ablation interpretiert, die Dichte muss bei der Methode geschätzt werden (Benn und Evans 2010).

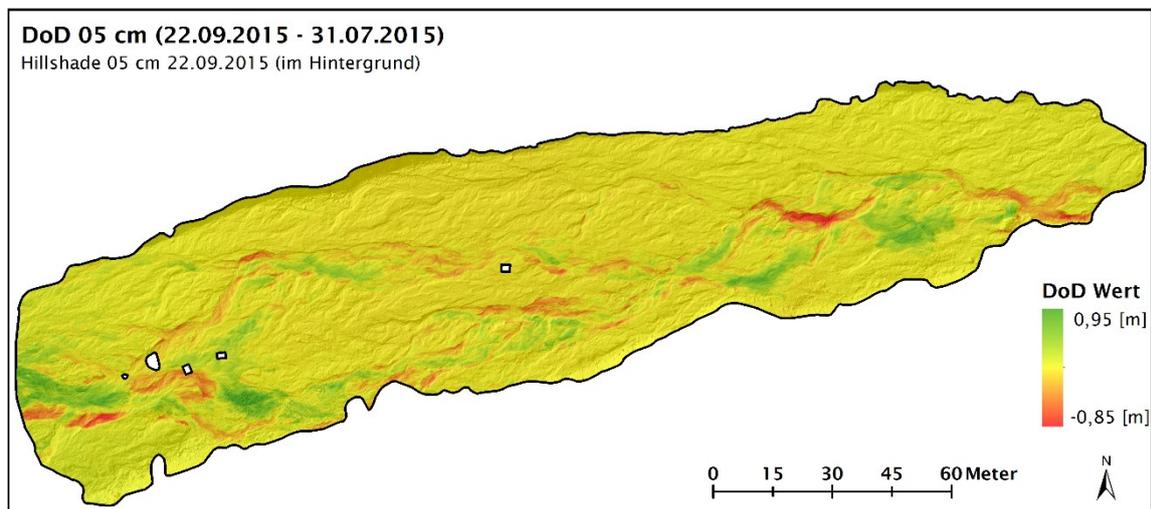


Abbildung 34: DoD 22.09.2015 – 31.07.2015 ohne minLOD, Hillshade berechnet aus DGM vom 22.09.2015 im Hintergrund der Abbildung. (Eigene Darstellung)

Abbildung 34 zeigt beispielhaft ein berechnetes DoD mit einer Rasterauflösung von 5 cm. Beide verwendeten Geländemodelle welche in die DoD Berechnung eingehen sind nicht frei von Fehlern. Das berechnete DoD mit einer Rasterauflösung von 10 cm und 5 cm befindet sich auch im Anhang D1 und D2 der Arbeit.

Aufgrund von verschiedenen Unsicherheiten (z.B. der Komplexität der Topographie, der Genauigkeit der Erfassungsmethode etc.) ist es relativ unwahrscheinlich, dass Geländemodelle eine Geländeoberfläche exakt abbilden (Williams 2012).

Nach Wheaton et al. (2010) können folgende weitere Feststellungen gemacht werden: Jede Rasterzelle im jeweiligem DGM besitzt einen gewissen Fehler welcher sich in weiterer Folge auch im DoD niederschlägt. Der Fehler bzw. die Unsicherheiten sind räumlich variabel. Der

Lagefehler ist in einer ähnlichen Größenordnung wie der vertikale Fehler. Bei ebenem Gelände ist der Lagefehler jedoch aufgrund des geringen Einflusses auf die Differenzberechnung meist vernachlässigbar. Es stellt sich somit basierend auf James et al. (2012) die Frage, welcher Anteil der Oberflächenveränderung als Messrauschen (Noise) und welcher Teil als tatsächliche Oberflächenveränderung (Signal) interpretiert werden kann.

Zum DoD basierten Change Detection finden sich in der Literatur nach Williams (2012) mehrere Ansätze: (a) Anwendung eines Minimum Level of Detection (minLOD), (b) probabilistic thresholding anhand von Konfidenzintervallen, (c) Kombination der Variabilität und Unsicherheit mehrerer Einflussparameter, (d) Beurteilung der räumlichen Kohärenz von Erosion und Deposition.

In der vorliegenden Arbeit wurde Ansatz (a) minLOD angewendet. Die Berechnung des minLOD erfolgte dabei nach Brasington et al. (2003) durch ein Fehlerfortpflanzungsgesetz, welches die Einzelfehler beider Geländemodelle berücksichtigt. Formel 10 zeigt die angewandte Berechnungsmethode für fortgepflanzte Fehler bzw. des minLOD. E_{DoD} steht dabei für den fortgepflanzten Fehler, $E_{Z_{DGM1}}$ und $E_{Z_{DGM2}}$ jeweils für die Einzelfehler der Geländemodelle.

$$E_{DoD} = \sqrt{(E_{Z_{DGM1}}^2 + E_{Z_{DGM2}}^2)} \quad (10)$$

Eine Fehlerabschätzung der Z-Fehler der UAV-Geländemodelle erfolgte bereits in Kapitel 4.1.4 dieser Arbeit, wobei eine Vielzahl von Genauigkeitsmaßen berechnet wurden. Brasington et al. (2003), Milan et al. (2011) und Neugirg et al. (2016) verwendet die Standardabweichung der Fehler, und Tonkin et al. (2016) und Tamminga et al. (2015) den RMSE zur Abschätzung der Einzelfehler. Die Problematik von Fehlermaßen wird zudem bei Höhle und Höhle (2009) umfassend behandelt. Tabelle 17 zeigt berechnete minLOD Werte auf Basis unterschiedlicher statistischer Fehlermaße (Standardabweichung, RMSE, ACCz und 95 % Perzentil) für das UAV-DGM mit einer Rasterauflösung von 5 cm und 10 cm. Die Fehlermaße wurden anhand der GNSS Kontrollpunkte bestimmt. Würde man zur minLOD Berechnung die Werte aus der Profilvalidierung heranziehen, so würde aufgrund von geringeren Einzelfehlern auch das minLOD etwas geringer sein. Das Profil gibt jedoch nur Auskunft über die Unsicherheit in einem kleinen Bereich des gesamten Gebietes, die Kontrollpunkte sind besser über das Untersuchungsgebiet verteilt.

Tabelle 17: Bestimmte minLOD Werte bestimmt anhand von Formel 10 und unterschiedlichen Fehlermaßen

Parameter	31.07.2015 DGM 5cm	22.09.2015 DGM 5cm	31.07.2015 DGM 10cm	22.09.2015 DGM 10cm	minLOD DGM 5cm	minLOD DGM 10cm
Standardabweichung [m]	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,06
RMSE [m]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,07
ACCz (RMSE x 1,96) [m]	0,09	0,10	0,10	0,10	0,13	0,14
Perzentil 95,0 (abs. Fehler [m])	0,10	0,10	0,10	0,10	0,14	0,14

Grundlage für die folgenden Aussagen bildet Brasington et al. (2003). Verfolgt man Change Detection Ansatz (b) ein probabilistic thresholding anhand von Konfidenzintervallen, so würde das minLOD für das 95% Konfidenzintervall (t-Wert 1,96) unter der Annahme einer Normalverteilung 12 cm betragen. Die Formel 11 wird dabei zur Berechnung des minLOD verwendet. E_{DoD} steht dabei für den fortgepflanzten Fehler bzw. für das minLOD, $E_{Z_{DGM1}}$ und $E_{Z_{DGM2}}$ jeweils für die Einzelfehler der Geländemodelle, t_{crit} für den t-Wert des gewählten Konfidenzintervalls. Die Einzelfehler der Modelle werden durch die Standardabweichung der Fehler bestimmt bzw. angenähert.

$$E_{DoD} = t_{crit} \times \sqrt{(E_{Z_{DGM1}}^2 + E_{Z_{DGM2}}^2)} \quad (11)$$

In der vorliegenden Arbeit wurde das 95 % Perzentil als Fehlermaß verwendet, welches keine bestimmte Verteilung der Daten voraussetzt. Aus dem gewählten Fehlermaß resultiert ein minLOD von ± 14 cm. Dieses Fehlermaß wurde auch aufgrund der geringen Anzahl der Kontrollpunkte gewählt. Betrachtet man zudem die Ergebnisse aus Kapitel 4.2 (TLS-UAV Vergleich) und geht davon aus, dass die TLS Methode genauer ist und somit als Referenzdatensatz angesehen werden kann beträgt das 95% Perzentil je nach Vergleichs Methode (C2C - Kapitel 4.2.3 / C2M - Kapitel 4.2.4 und DoD Kapitel 4.2.5) für das Testgebiet B und C zwischen 10 cm und 12 cm, das resultierende minLOD wäre somit dem angewendetem sehr ähnlich. Die Testfläche A (95 % Perzentil zwischen 6 cm und 8 cm für die genannten Vergleichs Methoden) würde zu einem geringeren minLOD Wert führen. Hierbei ist jedenfalls anzumerken, dass die Vergleichsmethode auf jeweils unterschiedlichen Datenebenen durchgeführt wurde und somit nicht direkt vergleichbar mit der Validierung anhand der Kontrollpunkte ist. Im DoD-Raster wurden in weiterer Folge Bereiche \pm des minLOD ausmaskiert. Der Fehler wird da dabei als räumlich nicht variable (uniform) angesehen, dies ist nach Wheaton et al. (2010) eine starke Vereinfachung der Realität. Abbildung 36 zeigt die DoDs mit dem angewendeten minLOD. Die DoDs mit dem angewendeten minLOD sind zudem auch im Anhang E1 und E2 der Arbeit zu finden. Die

Ausmaskierung der Daten erfolgte über Rastermasken welche mit dem Raster Calculator in ArcGIS erstellt wurden. In der Abbildung 35 ist die Verteilung der dZ Werte bzw. der DoD Werte, wobei der graue Bereich im Histogramm die durch das minLOD ausmaskierten Werte bilden, dargestellt. Die y-Achse(Häufigkeit) ist dabei logarithmisch skaliert. Das gewählte minLOD kann als eher konservativ betrachtet werden. Kleine Änderungen (ausmaskierte Bereiche) werden jedenfalls als Rauschen angesehen. Für die weiteren Analysen wurden die DoD Werte mit dem angewandten minLOD und ohne dem angewandten min LOD in eine csv-Dateien exportiert.

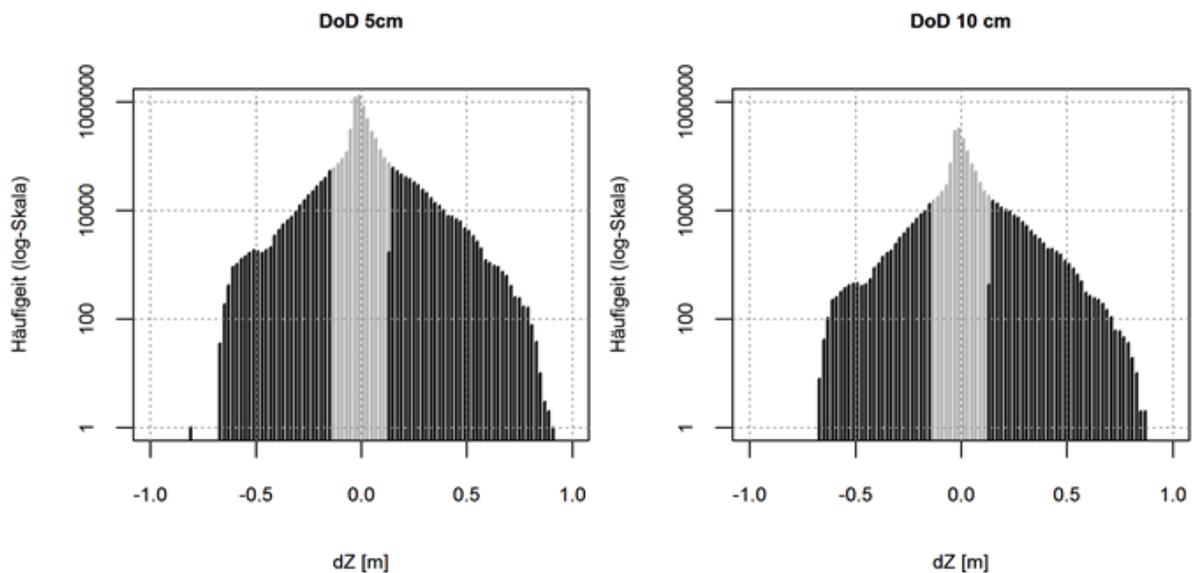


Abbildung 35: Verteilung der dz Werte bzw. der DoD Werte, mit 5 cm Rasterauflösung (links) und 10 cm Rasterauflösung (rechts). Die Y-Achse (Häufigkeit) ist jeweils logarithmisch skaliert. Der graue Bereich in den Histogrammen zeigt die durch das minLOD (14 cm) ausmaskierten Bereiche. (Eigene Darstellung)

Zur Durchführung des Change Detection kann angemerkt werden, dass sämtliche bis jetzt durchgeführten Schritte und folgende Schritte (weitere Berechnungen und Erstellung von Diagrammen) auch durch das bereits mehrfach erwähnte freie und sehr umfangreiche ArcGIS Plug-In (Geomorphic Change Detection Software) umgesetzt werden könnte.

Der Autor der Arbeit entschied sich jedoch aus Gründen der vollständigen Nachvollziehbarkeit des gewählten Ansatzes zur Umsetzung mit ArcGIS und der Skriptsprache R. Das GCD-Tool wurde mit den 10 cm UAV Geländemodellen im Rahmen dieser Arbeit getestet und führte zu nahezu identen Ergebnissen.

4.4.3 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die erzielten Ergebnisse vorgestellt. Einen räumlichen Eindruck der Veränderung (DoD mit minLOD) ermöglicht dabei die Abbildung 36, das jeweils jüngere „Hillshade“ liegt im Hintergrund der Darstellung. Das erkennbare Muster von Erosion und Deposition erscheint plausibel. Zwischen dem DoD mit einer Rasterauflösung von 10 cm (Abbildung 36 oben) und dem DoD mit einer 5 cm Rasterauflösung (Abbildung 36 unten) lässt sich kein wesentlicher Unterschied erkennen.

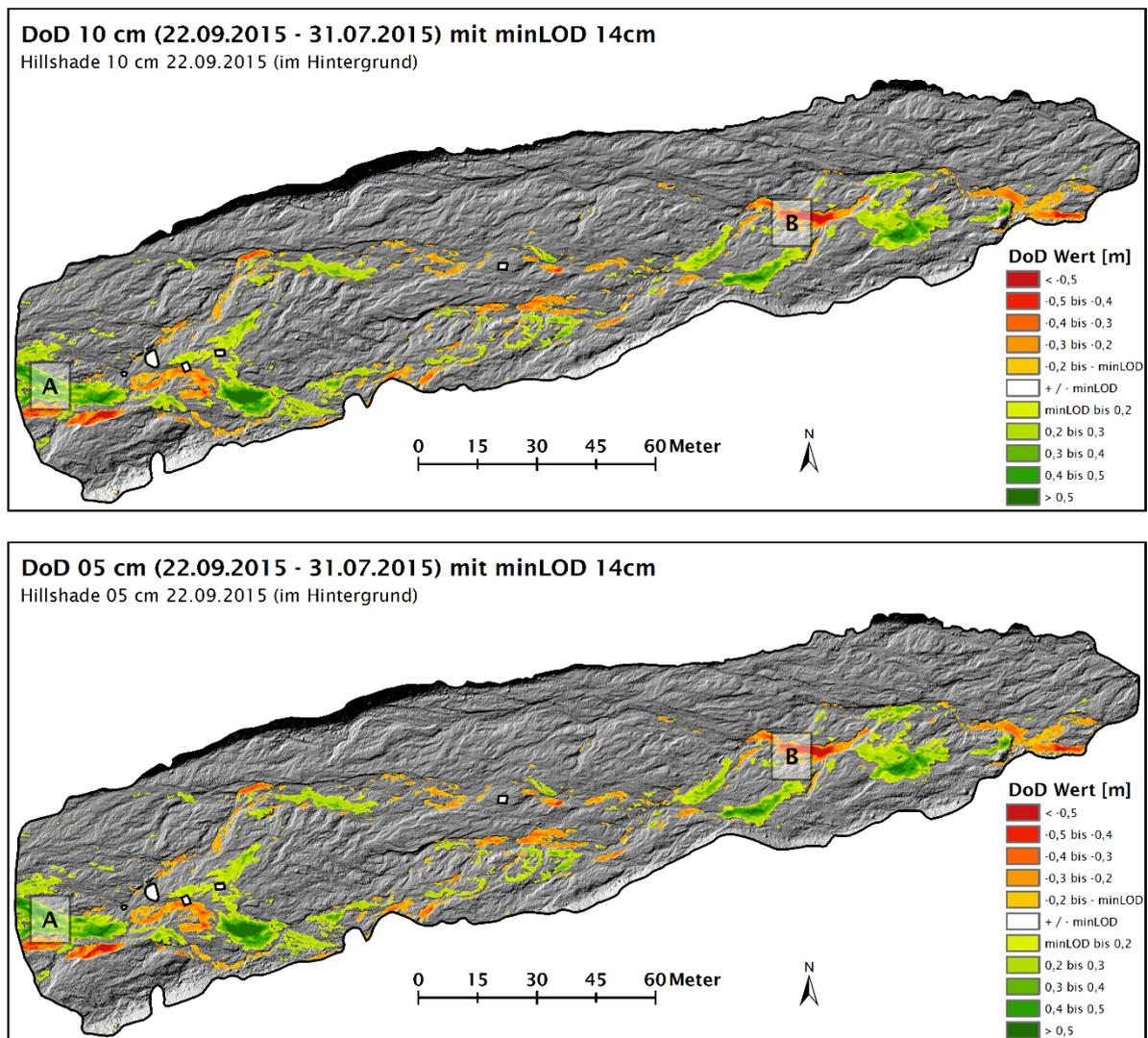


Abbildung 36: Durchgeführtes Change Detection (DoD mit minLOD 14 cm) anhand von UAV Geländemodellen. DoD Rasterauflösung 10 cm (oben) und 5 cm (unten). Das Hillshade vom 22.09.2015 mit der zum DoD passenden Rasterauflösung bildet den Hintergrund der Darstellung. (Eigene Darstellung)

Abbildung 37 ermöglicht eine Detailansicht von zwei ausgewählten Bereichen (A und B) im Gerinne des LGG. Die Lage dieser Flächen innerhalb des Untersuchungsgebietes wird aus der Abbildung 36 ersichtlich. Es lassen sich in der Detailansicht ebenfalls keine wesentlichen

Unterschiede zwischen dem DoD basierend auf den 5 cm Modellen und 10 cm Modellen erkennen. Tabelle 18 fasst die wesentlichen Größen (Flächen, Volumen etc.) der Veränderung des Sedimentkörpers übersichtlich zusammen.

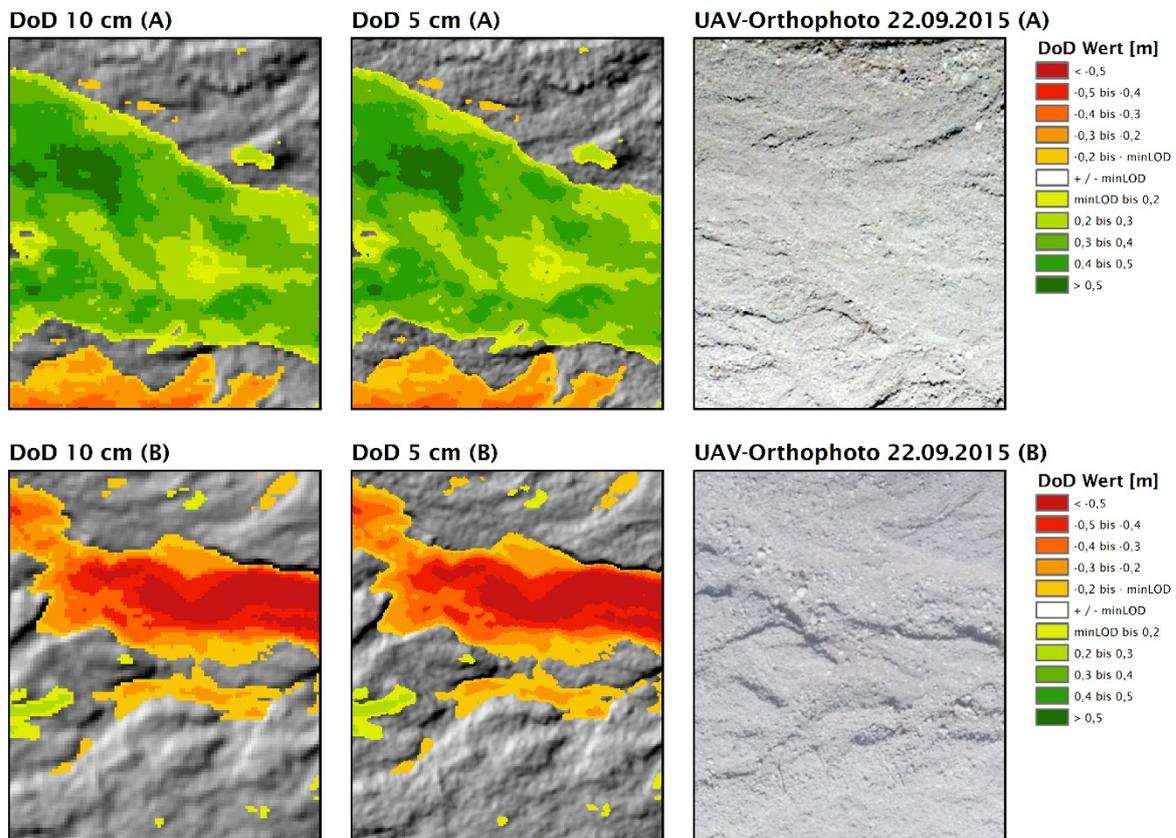


Abbildung 37: Vergleich DoD-Raster (10 cm und 5 cm Rasterauflösung) für zwei Detailausschnitte A und B. Die Lage der Detailausschnitte wird aus der Abbildung 36 ersichtlich. (Eigene Darstellung)

Aufgrund des gewählten minLOD von 14 cm, wurden in beiden DoDs (Rasterauflösung 5 cm und 10 cm) rund 88% der Fläche ausmaskiert. Auf nur 12% der Fläche des Untersuchungsgebietes ist somit eine signifikante Veränderung feststellbar. Das Minimum und das Maximum der DoD Werte ist dabei der Tabelle 18 zu entnehmen. Das 5 cm DoD besitzt dabei generell größere maximale dZ-Werte und geringere minimale dZ-Werte. Flächenmäßig betrachtet überwiegt im Gebiet klar die Deposition (1125 m² / 1123 m²) von Sediment. Die Flächen mit Erosion (688 m² / 685 m²) sind demnach kleiner. Die Gesamtfläche mit Erosion oder Deposition von Sediment, aktiver Bereich in der Epoche beträgt 1813 m² bzw. 1808 m². Die Verteilung der Fläche nach dZ-Werten (entspricht dem DoD Werten) wird aus der Abbildung 38 oben ersichtlich, wobei die Klassenbreite der dZ-Werte jeweils 2 cm beträgt. Die Fläche wurde jeweils an der Stelle des Klassenzentrums geplottet. Dies gilt in weiterer Folge auch für die Plots der Volumina. Die Verteilung der dz-Werte bzw. DoD Werte mit und ohne minLOD wird für eine Rasterauflösung von 5 und 10 cm aus der Abbildung 35 im

vorherigen Kapitel ersichtlich. Betrachtet man die Veränderung des Volumens, so ist die Deposition (295 m³ / 294 m³) von Sediment größer als die Erosion (163 m³ / 163 m³) von Sediment. Dies führt zu einer positiven Gesamtbilanz (132 m³ / 132 m³) im Untersuchungsgebiet.

Tabelle 18: Veränderung Sedimentkörper LGG (Gebiet 1 und 2), Volumen und Flächen ganzzahlig gerundet

Parameter	DoD 05 cm	DoD 10 cm
Zeitdifferenz Erfassung 1 - Erfassung 2 [d]	53	53
minLOD [m]	0,14	0,14
Gesamtfläche [m ²]	14673	14673
Fläche Veränderung feststellbar [%]	12,4	12,3
Fläche aus Gesamtfläche ausmaskiert [%]	87,6	87,7
Minimum der DoD / dZ Werte [m]	-0,82	-0,67
Maximum der DoD / dZ Werte [m]	0,92	0,87
Fläche mit Erosion [m ²]	688	685
Fläche mit Deposition [m ²]	1125	1123
Fläche mit Erosion oder Deposition [m ²]	1813	1808
Erosion [m ³]	-163	-163
Deposition [m ³]	295	294
Bilanz [m ³]	132	132
Gesamtvolumen (Erosion+Deposition) [m ³]	458	457

Das absolut umgesetzte Volumen (Erosion und Deposition) beträgt: 295 m³ bzw. 294 m³. Die Verteilung des Volumens nach dZ-Klassen kann aus der Abbildung 38 unten entnommen werden. Allgemein fällt bei den erzielten Ergebnissen auf, dass das DoD mit der Rasterauflösung von 5 cm und 10 cm zu sehr ähnlichen Ergebnissen führt. Eine Rasterauflösung von 10 cm wäre im vorliegenden Fall für die Analyse ausreichend bzw. führt das 5 cm DoD zu keinem merklichen Informationsgewinn. Wie dies mit einem anderem minLOD aussehen würde lässt sich ohne weitere Analysen nicht feststellen. Wheaton et al. (2010) verweist zudem auf den äußerst großen Einfluss des minLOD auf das finale Change Detection Ergebnis. Milan et al. (2011) verweist ebenfalls auf die Problematik von einem uniformen minLOD, im flachen Gelände wird der Fehler somit meist deutlich überschätzt und die Erosion oder Deposition somit unterschätzt. Ein umfangreicher Test mit verschiedenen minLOD Werten wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Eine weitergehende Analyse der Unsicherheiten der in dieser Arbeit erzeugten Daten, eine Analyse mit räumlich variablen Fehlern und eine umfangreiche Fehlermodellierung mit

diversen Einflussparametern (z.B. Hangneigung, Punktdichte) wie in den Arbeiten von Wheaton et al. (2010), Milan et al. (2011) und Bangen et al. (2016) wäre sicherlich interessant, ist jedoch nicht primäres Ziel dieser Arbeit.

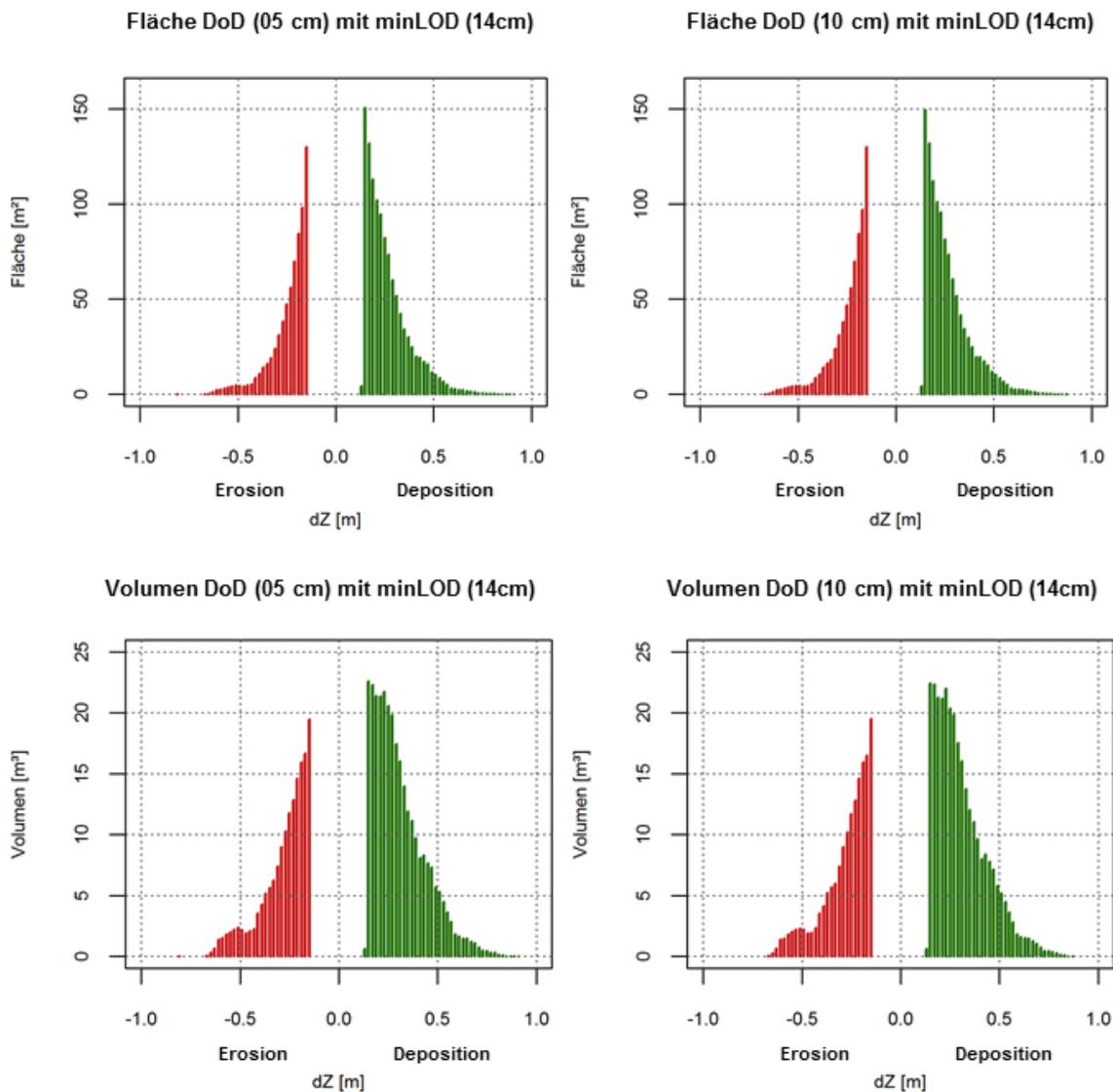


Abbildung 38: Verteilung Fläche und Volumen nach dZ bzw. DoD Werten (Klassenbreite 2 cm). DoD Rasterauflösung 5 cm (links) und 10 cm (rechts). Erosion negative dZ bzw. DoD Werte (rot), Deposition positive dZ bzw. DoD Werte (grün). (Eigene Darstellung)

Es konnte anhand der Analyse jedenfalls gezeigt werden, dass eine signifikante Veränderung des Sedimentkörpers stattgefunden hat. Es findet Erosion und Deposition innerhalb des Gerinnes statt, es kommt hauptsächlich zur Umlagerungen von Sediment. Aufgrund der Tatsache, dass durch das gewählte minLOD auf nur 12% der Gesamtfläche eine Veränderung festgestellt werden konnte sind die Zahlen jedoch mit äußerster Vorsicht zu behandeln. Gerade der Prozess von Deposition von Sediment ist durch sehr kleine Änderungsraten

gekennzeichnet und wird somit unterschätzt (Brasington et al. 2003). Generell kann angenommen werden das im vorliegenden Fall die Erosion und Deposition unterschätzt wird. Das „rohe“ minLOD würde zu einer Überschätzung der Erosion und Deposition führen. Die erzielte Genauigkeit der Einzelmodelle ist nach Smith et al. 2016 jedoch durchaus im typischen Genauigkeitsbereich von SfM-MVS erzeugten Geländemodellen. Eine umfangreichere Abschätzung der Unsicherheiten wäre für weitergehende Analysen wie bereits angesprochen wünschenswert, würde vermutlich auch die Fläche an der eine signifikante Veränderung feststellbar erhöhen und eine bessere Quantifizierung von Erosion und Deposition ermöglichen.

In der vorliegenden Arbeit wurde nur ein relativ kleines Gebiet betrachtet. Die eingesetzten Methoden (SfM-MVS in Kombination mit einem UAV und die DoD Methode) sind jedoch grundsätzlich auch auf größere Flächen übertragbar. Der Einsatz der Methoden für weitere Untersuchungsgebiete mit ähnlichen Eigenschaften zudem möglich. Eine Erhöhung des Messintervalls ist aufgrund der erzielten Genauigkeit der UAV-Geländemodelle in dieser Arbeit und der erwartbaren Genauigkeiten aus der einschlägigen Literatur als nicht sinnvoll zu erachten. Die Zeitreihe könnte mit einem größeren Beobachtungsintervall z.B. einmal jährlich sinnvoll fortgesetzt werden.

5 Schlussfolgerungen

Die Ziele der Arbeit aus Kapitel 1.2 wurden trotz der beträchtlichen technischen Schwierigkeiten mit dem verwendeten UAV bei der Datenerfassung zum Großteil erreicht. In weiterer Folge wird versucht die Ergebnisse der Arbeit anhand der vier Forschungsfragen zu beurteilen.

Worin liegen die Stärken und Schwächen von UAV-Daten in der Erfassung der Sedimentdynamik?

Eine umfassende Diskussion der Vorteile und Nachteile von UAV Daten erfolgte in Kapitel 3.2.4 An dieser Stelle sollen daher nur die wesentlichen Stärken und Schwächen hinter dem praktischen Hintergrund der Arbeit diskutiert werden. Tabelle 19 fasst die Stärken und Schwächen von UAV Daten, welche in dieser Arbeit bestätigt werden konnten, übersichtlich zusammen.

Tabelle 19: Bestätigte Stärken und Schwächen von UAV-Daten in der Erfassung der Sedimentdynamik

Stärken	Schwächen
Hohe geometrische Auflösung	Rechtliche Einschränkungen
Hohe Punktdichte	Technische Einschränkungen
Regelmäßigkeit der Punktwolke	Anfälligkeit gegenüber Umwelteinflüssen z.B. Wind
Günstige Aufnahmeperspektive für die Erfassung eines flachen Gerinnes	Notwendigkeit von Passpunkten für die Auswertung
Grundsätzlich flexibel im Einsatz	Bei dichter Vegetation Einsatz problematisch
„Kostengünstig“ in der Anschaffung	Sicherer Betrieb bei komplexer Topographie erfordert viel Training
	Beleuchtungsverhältnisse (z.B. Schatten) wirken sich auf die Modellerstellung aus

Die folgenden Stärken von UAV-Daten wurden dabei durch den praktischen Teil betätigt: Erfassung von Daten mit hoher geometrischer Auflösung, hoher Punktdichte und Regelmäßigkeit der abgeleiteten Punktwolke, günstige Aufnahmeperspektive für ein flaches Gerinne, flexibel und auch bei durchgehender Bewölkung einsetzbar. Das Argument der flexiblen Einsetzbarkeit von UAVs ist durch logistische Einschränkungen (Verfügbarkeit von Personal und Material), Umwelteinflüsse (z.B. starker Wind) und rechtliche Aspekte zu relativieren. Um die Flexibilität eines UAV wirklich nutzen zu können sollte das Fluggerät jedenfalls einwandfrei funktionieren und die Ausstattung dem Einsatzgebiet entsprechen.

Die schnelle Erfassung wird in der Literatur häufig als Vorteil angeführt. Die eigentliche Flugzeit (Zeit der Datenerfassung) ist natürlich kurz, die Vorbereitungen zum Flug und die Planung im Voraus sollte jedoch zeitlich nicht unterschätzt werden. Für das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit ist eine TLS Datenerfassung, selbst wenn man die Anzahl der Scanstandorte erhöhen würde, in gleicher Zeit möglich. Der Personalaufwand ist bei beiden Methoden ident, das Zeitargument im vorliegenden Fall zu relativieren.

Als Schwäche wird häufig die Notwendigkeit von Passpunkten für die Auswertung betrachtet. Diese Aussage kann insofern bestätigt werden, dass damit ein erheblicher zeitlicher Aufwand verbunden ist und eine regelmäßige Verteilung der Passpunkte bei komplexerem Gelände schwierig ist. Die Verteilung der Passpunkte beeinflusst die Georeferenzierung jedoch wesentlich (Woodget 2015). Zusätzlich wird zur Einmessung ein GNSS-Gerät oder eine Totalstation benötigt.

Bezüglich der Kosten kann folgendes festgehalten werden, die Anschaffungskosten eines TLS Scanner sind in der Regel weit höher als die Kosten für ein UAV. Zum Bedienen eines UAV gerade bei komplexer Topographie ist jedoch viel mehr Übung und Training notwendig als zum Bedienen eines TLS-Scanners.

Ein sehr großer Nachteil der UAV Bilddaten liegt sicher darin, dass die Topographie bei dichter Vegetation kaum erfasst werden kann, wobei dies eine Schwäche von photogrammetrischen Verfahren an sich ist. Die Beleuchtungsverhältnisse bei der Bildaufnahme z.B. Schatten können sich zudem auf die Modellerstellung negativ auswirken.

Wie ist die Qualität der erzeugten Oberflächenmodelle im Allgemeinen und im Vergleich zu ALS- und TLS-Oberflächenmodellen in Hinblick auf die Analyse der Sedimentdynamik im Testgebiet einzustufen?

Die Qualität der erzeugten Oberflächemodelle ist für Bereiche frei von Vegetation und in Bereichen ohne Schatten während der Bildaufnahme trotz der hohen Rauigkeit der Geländeoberfläche als allgemein gut einzustufen. Vertikale Strukturen und sehr steile Bereiche sind im Model mit größeren Unsicherheiten verbunden. Das Gerinne ist zum überwiegenden Teil frei von Vegetation und relativ flach, die Modelle sind unter Berücksichtigung der Schattenproblematik somit jedenfalls für weitere Analysen geeignet. Die dabei erzielte Auflösung der Modelle und Dichte der Punktwolken ist beeindruckend.

Es konnte in Kapitel 4.1.4 gezeigt werden, dass die Höhengenaugigkeit im erwartbaren Genauigkeitsbereich von SfM-MVS-Photogrammetrie Geländemodellen mit einer vergleichbaren Sensor-Objekt Distanz liegt. Es wurde dabei je nach betrachteter

Rasterauflösung (5 cm, 10 cm und 20 cm) und Methode (Kontrollpunkte oder Profilpunkte) ein RMSE von 4-7 cm und ein Perzentil 95 von 7-16 cm erreicht. Die ermittelte Lagegenauigkeit RMSE (XY) der Orthophotos beträgt 2 cm. Ein visueller Vergleich der Hillshades (aus dem UAV DGM abgeleitet) vom 31.07.2015 und 22.09.2015 bestätigt die gute Lagegenauigkeit bzw. die relative Genauigkeit in Bezug auf die Lage zueinander.

Wie die ALS Geländemodelle im Vergleich zu den UAV Daten einzustufen sind konnte aus den bereits genannten Gründen für das Testgebiet nicht näher festgestellt werden. Einige wenige allgemeine Überlegungen hierzu werden im Kapitel 4.3 angeführt und sollen an dieser Stelle nicht wiederholt werden.

Zum Vergleich mit den TLS Daten kann folgendes gesagt werden, grundsätzlich wird in der Literatur (Smith et al. 2016, Neugirg et al. 2016) davon ausgegangen, dass die TLS-Methode genauer ist. In der vorliegenden Arbeit wurden die TLS Daten nicht mit unabhängigen Referenzdaten überprüft. Woodget (2015) zeigt für fluviale Untersuchungsgebiete, dass die TLS Geländemodelle bei einer Validierung nur geringfügig besser abschneiden. Bezüglich der Datenvollständigkeit schneiden aufgrund der Aufnahmeperspektive aus der Luft die UAV Daten im vorliegenden Fall deutlich besser ab. Die flache Topographie und Aufnahmekonfiguration der TLS Daten (wenige Standorte, keine wirklich erhöhten Positionen etc.) führen zu doch erheblichen Schattenbereichen im Gerinne. Schattenbereiche sind dabei in Bezug auf eine Veränderungsanalyse als jedenfalls kritisch zu betrachten. Die UAV Punktwolke ist zudem regelmäßiger. Es fand in der Arbeit sowohl ein TLS-UAV Vergleich auf der Ebene der Punktwolke (C2C-Vergleich, C2M-Vergleich) als auch auf Ebene der Rastermodelle (DoD-Vergleich) statt. Die ermittelte mittlere absolute Abweichung auf der Punktwolkenebene beträgt je nach Testgebiet und Methode 3-7 cm, das Perzentil 95 6-12 cm. Die DoD Vergleichs-Methode (20 cm Rastermodell) führt zu einer mittleren absoluten Abweichung zwischen 4-8 cm und einem Perzentil 95 von 8-12 cm.

Für die Analyse der Veränderung des Sedimentkörpers und zur Quantifizierung von Erosion und Deposition sind die UAV Modelle durchaus geeignet. Das kurze Beobachtungsintervall ist jedoch aufgrund der ermittelten Genauigkeit der einzelnen Modelle als kritisch zu betrachten bzw. führt zu starken Einschränkungen der Analysemöglichkeiten.

Hat im Untersuchungsgebiet zwischen den Aufnahmezeitpunkten eine signifikante Veränderung des Sedimentkörpers stattgefunden?

Anhand des durchgeführten Change Detection im Kapitle 4.4 konnte eine signifikante Veränderung des Sedimentkörpers zwischen den Beobachtungsterminen festgestellt werden. Die Veränderung wurde dabei auch quantifiziert. Die Deposition von Sediment überwiegt dabei die Erosion von Sediment, dies führt zu einer positiven Gesamtbilanz ($132 \text{ m}^3 / 132 \text{ m}^3$) für den betrachteten Ausschnitt im LGG. Es wurde dabei auch gezeigt, dass die Verwendung von Rastermodellen mit 5 cm und 10 cm zu identen Ergebnissen führt.

An dieser Stelle ist kritisch anzumerken, dass aufgrund der Einzelfehler der Modelle und dem daraus ermittelten minLOD von 14 cm sich nur auf circa 12 % der Gesamtfläche eine Veränderung feststellen lässt. Überlegungen zum minLOD und zu Unsicherheiten wurden dabei bereits im Kapitel 4.4 angestellt, in weiterer Folge wird das Ergebnis in Kontext zu bestehenden Arbeiten gesetzt. In Adams et al. (2016) wird aus UAV und ALS Daten ein Sedimentbudget nach einem Murgangereignis berechnet, das minLOD beträgt in der Studie $\pm 20 \text{ cm}$. Der RMSE der UAV Geländemodelle beträgt zwischen 5-15 cm. Neugirg et al. (2016), der wie in dieser Arbeit UAV Geländemodelle für beide Beobachtungszeitpunkte einsetzt, ermittelte ein minLOD von $\pm 18 \text{ cm}$. Tamminga et al. (2015) verwendet ebenfalls UAV Geländemodelle zur Quantifizierung der Veränderung in einer fluvialen Umgebung und berechnet ein minLOD von $\pm 10 \text{ cm}$ für Überwasserbereiche und ein minLOD von $\pm 14 \text{ cm}$ für Unterwasserbereiche. Aus den erzielten Ergebnissen könnte man den Schluss ziehen, dass die SfM-MVS Methode in Kombination mit einem UAV an sich besser zur Detektion von größeren Änderungen eingesetzt werden sollte. Es wurden zwar in der vorliegenden Arbeit große Änderungen festgestellt aber, die Detektion von kleinen Änderungen ist aufgrund des berechneten minLOD bzw. aufgrund der Unsicherheiten in den Daten nicht möglich.

Lässt sich aus den Erkenntnissen der Arbeit, die Planung der Datenerfassung, die Datenerfassung selbst, die Auswertung und Nachbearbeitung von UAV Aufnahmen für zukünftig ähnliche Fragestellungen optimieren?

Im Zuge dieser Arbeit wurden einige Erkenntnisse gewonnen, welche den Arbeitsablauf und die Qualität der abgeleiteten Produkte verbessern könnten. Auf der technischen Ebene wäre das Aufrüsten des Fluggerätes mit einem Doppelfrequenz-GNSS Empfänger gerade für Einsatzgebiete mit großer GPS-Abschattung wünschenswert. Die Navigation würde sich dadurch verbessern und das Zeitfenster, indem ein Flug statt finden kann merklich

vergrößern. Den aufgetretenen Problemen im Flug und den Problemen bei der Kameraauslösung sollte man jedenfalls weiter nachgehen

Bei der Bildaufnahme sollte man in Zukunft jedenfalls mehr Rücksicht auf die Beleuchtungsverhältnisse nehmen, Beleuchtungsunterschiede sollten soweit wie als nur möglich vermieden werden. Der negative Einfluss von Schattenflächen in den UAV Bildern auf das finale Geländemodell konnte in der Arbeit gezeigt werden. Eine geschlossene Wolkendecke ist bei der Bildaufnahme, aufgrund der difusen Ausleuchtung ideal. Voraussetzung für diesen Punkt ist jedoch ein einwandfrei funktionierendes Fluggerät mit einer an das Einsatzgebiet angepassten Ausstattung.

Die eingesetzten Passpunktsignale haben sich in der Arbeit bewährt, wobei bzgl. der Größe auch das Format DIN A3 als ausreichend eingestuft werden kann. Für ein langfristiges Monitoring (mehrere Jahre) ist die eingesetzte Vermarkung jedenfalls zu optimieren und man sollte über permanente Passpunkte im Gelände nachdenken.

Generell wurden mit der Software Agisoft Photoscan gute Ergebnisse erzielt, die Punktdichte ist beeindruckend und die Oberfläche der Software ist zudem benutzerfreundlich. Es muss jedoch auch klar festgestellt werden, dass die Software unzureichend dokumentiert ist und eine Parametrisierung somit nicht völlig nachvollziehbar ist. Der Blackbox-Charakter der Software verhindert ein tieferes Verständnis der Abläufe, der Einsatz ist daher aus wissenschaftlicher Sicht zu hinterfragen.

Zur Datenvalidierung kann angemerkt werden, dass eine größere Anzahl von Validierungspunkten jedenfalls notwendig wäre. Die Verwendung der Skriptsprache R hat sich bei der Berechnung von Fehlermaßen als sehr hilfreich herausgestellt. Die Publikation von Höhle und Höhle (2009) ist zu diesem Thema ausdrücklich zu empfehlen. Die Datenvalidierung von SfM-MVS Produkten und Bestimmung der Unsicherheiten kann generell als zukünftige Herausforderung angesehen werden. Die Einführung eines einheitlichen Standards zur Datenvalidierung wäre zudem wünschenswert und würde die Vergleichbarkeit von Studien ermöglichen.

6 Quellenverzeichnis

- Aber, J.S.; Marzolf, I.; Ries, J.B. (2010): Small-format, aerial photography, principles, techniques and geoscience applications. Elsevier, Amsterdam, 268 S.
- Adams, M.S.; Fromm, R.; Lechner, V. (2016): High resolution debris flow volume mapping with Unmanned Aerial Systems (UAS) and photogrammetric techniques. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, S. 749-755.
- Agisoft (2015 a): Tutorial Orthophoto and DEM Generation with Agisoft Photoscan Pro 1.1., Agisoft LLC, St. Petersburg, 14 S.
- Agisoft (2015 b): Agisoft User Manual in der Version 1.2. Agisoft LLC, St Petersburg, 102 S.
- Albertz, J. (2009): Einführung in die Fernerkundung - Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 4 Auflage, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 254 S.
- Amperer, O. (1935): Geologischer Führer für die Gesäuseberge. Mit einer geolog. Karte i.M. 1:25000, Kartenerläuterungen und Beschreibung von 16 Wanderungen. Geologische Bundesanstalt, Wien, 194 S.
- Anders, N.; Seijmonsbergen, A.; Masselink, R.; Saskia, K. (2016): Ground point filtering of UAV-based photogrammetric point clouds. In: Geophysical Research Abstracts, Volume 18, EGU2016-17966.
- ASPRS (2015): ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Volume 81, 3, S. A1-A26.
- Austro Control (2015): Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen für unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1. Austro Control, GZ: AOT2017-1/83-13, 14.07.2015/ Rev. 1, 14 S.
- Austro Control (2016): Auflistung der erteilten Betriebsbewilligungen für uLFZ der Klasse 1. Auflistung der Austro Control Version vom 02.09.2016, 30 S.
- Avian, M. (2015): Application of Terrestrial Laserscanning in the assessment of geomorphological processes in the Hohe Tauern Range, Austria. Dissertation, Karl-Franzens-Universität, Institut für Geographie und Raumforschung, Graz, 180 S.
- Bangen, S.; Hensleigh, J.; McHugh, P.; Wheaton, J. (2016): Error modeling of DEMs from topographic surveys of rivers using fuzzy inference systems. In: Water Resources Research, Volume 52, 2, S. 1176-1193.
- Bauer, M. (1997): Vermessung und Ortung mit Satelliten. 4 völlig überarbeitete Ausgabe, Wichmann, Heidelberg, 423 S.
- Ben, D.I; Evans, D.J.A (2010): Glaciers & Glaciation. 2 Auflage, Talyor & Francis, London, 802 S.
- Bescheid (2015): Bescheid Austro Control Ordnungszahl 1440/2014 (twinHEX v3.0). Austro Control, Wien.
- Bill, R. (2010): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. 5 völlig neu bearbeitete Auflage, Wichmann, 804 S.
- Brasington, J.; Langham, J.; Rumsby, B. (2003): Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. In: Geomorphology, Volume 53, 3-4, S. 299-316.
- Brenner, C., Vosselma, G., Sithole, G., (2006): Aerial Laser-Scanning – International Summer School, Digital Recording and 3D Modelling. Aghlos Nikolaos, Kreta, Griechenland, 244 S.
- Bühler, Y.; Adams, M.S.; Bösch, R.; Stoffel, A. (2016): Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UASs): potential and limitations. In: The Cryosphere, Volume 10, 3, S. 1075-1088.

- Cramer, M.; Sabow, F.; Förg, P. (2016): Direkte Georeferenzierung in UAS-Anwendungen - Eine Beispielanwendung der Landesvermessung Baden-Württemberg. In: Kersten, T.P. (Hg.): Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 25, 619 S.
- Colomina, I.; Molina, P. (2014): Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 92, S. 79-97.
- Dietrich, J. (2014): Applications of Structure-from-Motion Photogrammetry to Fluvial Geomorphology. Dissertation, University of Oregon, Department of Geography, Oregon, 124 S.
- Eisenbeiß, H. (2009): UAV Photogrammetry, Dissertation, Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Zürich, 235 S.
- Eisenbeiß, H.; Sauerbier, M. (2011): Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications. In: The Photogrammetric Record, Volume 26, 136, S. 400-421.
- Favalli, M.; Fornaciai, A.; Isola, I. (2012) Multiview 3D reconstruction in geosciences. In: Computers & Geosciences 176, Volume 44, S. 169-176.
- Fischlschweiger, M. (2004): Untersuchung der Auswirkungen der Einstellung des Schotterabbaues im Unterlauf des Langriesgrabens. Diplomarbeit (BHS), Höheren Bundeslehranstalt für Forstwirtschaft Bruck, Bruck an der Mur, 182 S.
- Flener, C.; Vaaja, M.; Jaakkola, A.; Krooks, A.; Kaartinen, H.; Kukko, A.; Kasvi, E.; Hyypä, H.; Hyypä, J.; Alho, P. (2013): Seamless Mapping of River Channels at High Resolution Using Mobile LiDAR and UAV-Photography. In: Remote Sensing, Volume 5, 12, S. 6382-6407.
- Fonstad, M.A.; Dietrich, J.T.; Courville, B.C.; Jensen, J.L.; Carbonneau, P.E. (2013): Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. In: Earth Surface Processes and Landforms, Volume 38, 4, S. 421-430.
- FWF (2015): Beschreibung des SEDYN-X Projektes auf der Website des Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF). http://pf.fwf.ac.at/project_pdfs/pdf_abstracts/p24759d.pdf Zugriff: Juli 2015.
- Gallay, M. (2013): Direct Acquisition of Data: Airborne laser scanning, Chapter 2.1.4. In: Cook, S.J.; Clarke, L.E.; Nield, J.M. (Hg.): Geomorphological Techniques, Online Edition, British Society for Geomorphology, London, ISSN: 2047-0371, 17 S.
- GBA (Hg.) (2014 a): GEOFAST Geologische Karte, Blatt 99 Rottenmann, Maßstab 1:50000. Geologische Bundesanstalt, Wien.
- GBA (Hg.) (2014 b): GEOFAST Geologische Karte, Blatt 100 Hieflau, Maßstab 1:50000. Geologische Bundesanstalt, Wien.
- GIS Steiermark (2016 a): Digitaler Atlas Steiermark, Kartencenter: Klimatologie und Meteorologie. [http://gis2.stmk.gv.at/atlas/\(S\(ywwtguldndi2yrwbqbi044tx\)\)/init.aspx?karte=klimaatlas&ks=das&cms=da&massstab=800000](http://gis2.stmk.gv.at/atlas/(S(ywwtguldndi2yrwbqbi044tx))/init.aspx?karte=klimaatlas&ks=das&cms=da&massstab=800000) Zugriff Mai 2016.
- GIS Steiermark (2016 b): Digitaler Atlas Steiermark, Kartencenter: Gewässer und Wasserinformation. [http://gis2.stmk.gv.at/atlas/\(S\(vlfpo2twp2rhkzpiyekb1usy\)\)/init.aspx?karte=gew&ks=das&cms=da&massstab=800000](http://gis2.stmk.gv.at/atlas/(S(vlfpo2twp2rhkzpiyekb1usy))/init.aspx?karte=gew&ks=das&cms=da&massstab=800000) Zugriff Mai 2016.
- GIS Steiermark (2016 c): Metainformation ALS Geländemodell 1m Bundesland Steiermark. <http://gis.stmk.gv.at/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid=%7B7ad93576-fd1f-4b32-a8a0-22ccbfb5b465%7D> Zugriff Juli 2016.
- Haarbrink, R.B. (2011): UAS for Geoinformation: Current status and perspectives. In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, S. 207-212.

- Hackney, C.; Clayton, A.I. (2015): Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and their application in geomorphic mapping, Chapter 2.1.7. In: Cook, S.J.; Clarke, L.E.; Nield, J.M. (Hg.): Geomorphological Techniques, Online Edition, British Society for Geomorphology, London, ISSN: 2047-0371, 12 S.
- Harwin, S.; Lucieer, A. (2012): Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. In: Remote Sensing, Volume 4, 6, S. 1573-1599.
- Hardin, P.J.; Jensen, R.R. (2011): Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles in Environmental Remote Sensing: Challenges and Opportunities. In: GIScience & Remote Sensing, Volume 48, 1, S. 99-111.
- Haseke, H. (2005 a): Quellprojekt Nationalpark Gesäuse, Band 1: Quellkartierung 2003-2005. In: Bericht im Auftrag der Nationalpark Gesäuse GmbH, Salzburg, 90 S.
- Haseke, H. (2005 b): Quellprojekt Nationalpark Gesäuse, Band 2: Quelldokumentation und Quellmonitoring 2004-2005. In: Bericht im Auftrag der Nationalpark Gesäuse GmbH, Salzburg, 64 S.
- Heritage, G.L.; Large, A.R.G. (2009): Laser Scanning for the Environmental Sciences. Wiley Blackwell, 271 S.
- Hervouet, A.; Dunford, R.; Piégay, H.; Belletti, B.; Trémélo, M.L. (2013): Analysis of Post-Flood Recruitment Patterns in Braided-Channel Rivers at Multiple Scales Based on an Image Series Collected by Unmanned Aerial Vehicles, Ultra-light Aerial Vehicles, and Satellites. In: GIScience & Remote Sensing, Volume 48, 1, S. 50-73.
- Holzinger, A.; Haseke, H.; Stocker, E. (Red.) (2012): Managementplan Witterschutt und Geschiebe. In: Nationalpark Gesäuse GmbH, Weng im Gesäuse, 51 S.
- Höhle, J.; Höhle, M. (2009): Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 64, 4, S. 398-406.
- Hugenholtz, C.; Whitehead, K.; Brown, O.W.; Barchyn, T.E.; Moorman, B.J.; LeClair, A.; Riddell, K.; Hamilton, T. (2013): Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically derived digital terrain model. In: Geomorphology, Volume 194, S.16-24.
- James, L.A.; Hodgson, M.E.; Ghoshal, S.; Latiolais, M.M. (2012): Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis. In: Geomorphology, Volume 137, S. 181-198.
- Jaud, M.; Passot, S.; Le Bivic, R.; Delacourt, C.; Grandjean, P.; Le Dantec, N. (2016): Assessing the Accuracy of High Resolution Digital Surface Models Computed by PhotoScan and MicMac. In: Remote Sensing, Volume 8, 6, 18 S.
- Javernick, L.; Brasington, J.; Caruso, B. (2014): Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. In: Geomorphology, Volume 213, 166-182 S.
- Javernick, L.; Hicks, D.M.; Measures, R.; Caruso, B.; Brasington, J. (2016): Numerical Modelling of braided rivers with Structure-from-Motion derived terrain models. In: River Research and Applications, Volume 32, 5, S.1071-1081.
- Jungmeier, M.; Pfleger, B.; Scherzinger, W.; Getzner M. (2008): Evaluierung 5 Jahre Nationalpark Gesäuse. In: E.C.O. Institut für Ökologie, im Auftrag der Nationalpark Gesäuse GmbH, Klagenfurt, 145 S.
- Kammerer, H. (2006): Biotopkartierung Gesäuse, Teilbericht Kartierungsbericht Langgries. In: Bericht Büro Stipa, im Auftrag der Nationalpark Gesäuse GmbH, Graz, 21 S.
- Kohlstock, P. (2011): Topographie – Methoden und Modelle der Landesaufnahme. De Gruyter, Berlin, 217 S.

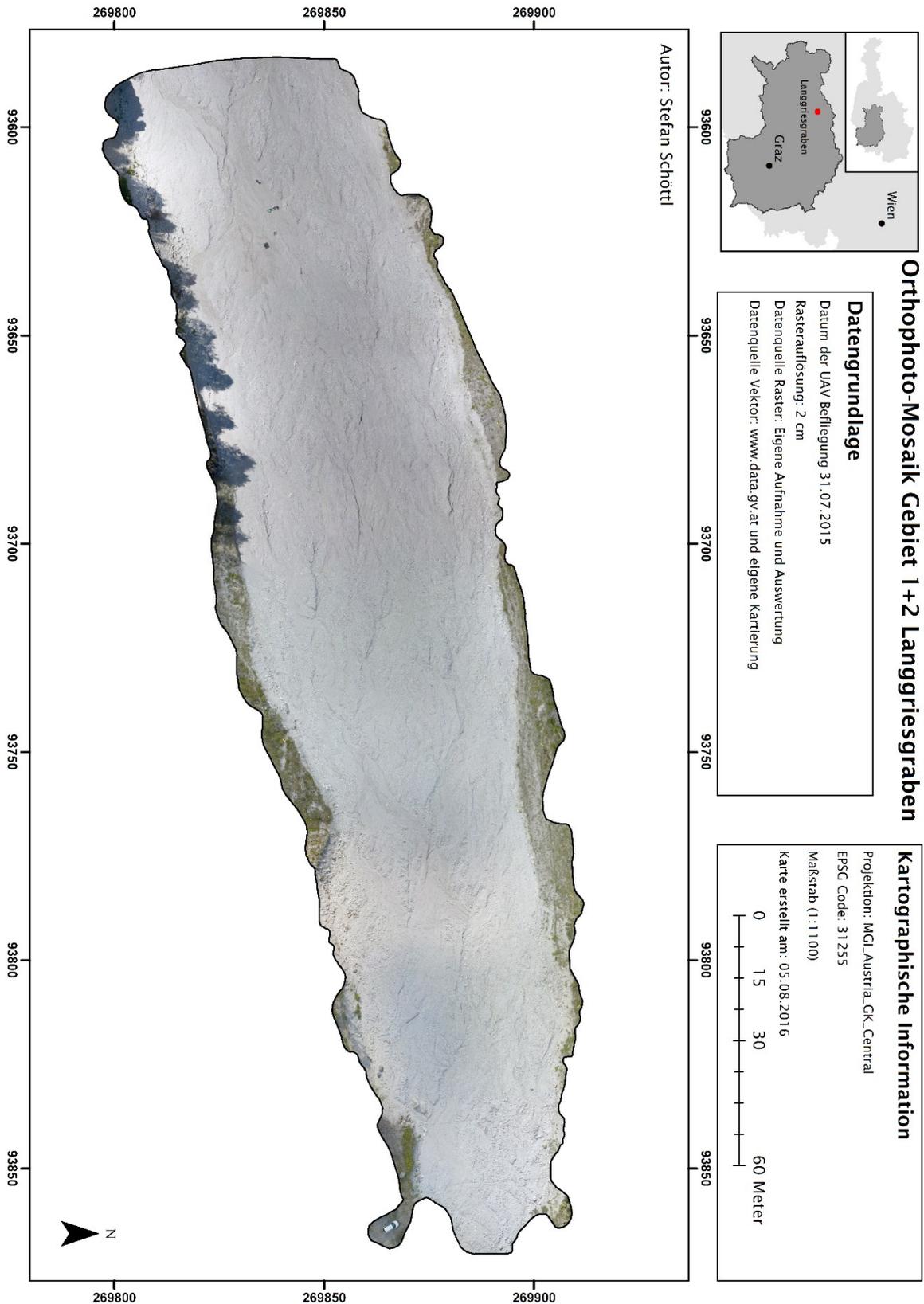
- Kraus, K. (2004): Photogrammetrie, Band 1 Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, 7 Auflage, Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 516 S.
- Kraus, K. (2007): Photogrammetry Geometry from Images and Laser Scans, 2 Auflage, Walter de Gruyter, Berlin, 2007, 459 S.
- Lague, D.; Broduc, N.; Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laserscanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 82, S. 10-26.
- Laurentsichitsch, M. (2016): Messung der Mächtigkeit von Sedimentkörpern im Johnsbachtal mittels geophysikalischer Methoden. Masterarbeit, Karl-Franzen-Universität, Institut für Geographie und Raumforschung, Graz, 83 S.
- Lejot, J.; Delacourt, C.; Piégay, H.; Fournier, T.; Trémélo, M-L.; Allemand, P. (2007): Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. In Earth Surface Processes and Landforms, Volume 32, 11, S. 1705-17025.
- Lowe, D.G. (1999) Object recognition from locale scale-invariant features. In: International Conference on Computer Vision, 1999, Corfu, S. 1150-1157.
- Lucieer, A.; de Jong, S.M.; Turner, D. (2014 a): Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. In: Progress in Physical Geography, Volume 38, 1, S. 97-116.
- Lucieer, A.; Turner, D.; King, D.H.; Robinson, S.A. (2014 b): Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to capture micro-topography of Antarctic moss beds. In: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 27 Part A, S. 53-62.
- LUIS (2016): Landes-Umwelt-Informationssystem, Klimaregion Gesäuse mit Teilbecken Johnsbach. <http://www.umwelt.steiermark.at/cms/beitrag/10023703/25206/> Zugriff: Mai 2016.
- Mancini, F.; Dubbini, M.; Gattelli, M.; Stecchi, F.; Gabbianelli, G. (2013): Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. In: Remote Sensing, Volume 5, 12, S. 6880-6898.
- Micheletti, N.; Chandler, J.H.; Lane, S. (2015 a): Structure from Motion (SfM) Photogrammetry, Chapter 2.2.2. In: Cook, S.J.; Clarke, L.E.; Nield, J.M. (Hg.): Geomorphological Techniques, Online Edition, British Society for Geomorphology, London, ISSN: 2047-0371, 12 S.
- Micheletti, N.; Chandler, J.H.; Lane, S.N (2015 b): Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. In: Earth Surface Processes and Landforms, Volume 40, 4, S. 473-486.
- Milan, D.J.; Heritage, G.L.; Large, A.R.G.; Fuller, I.C. (2011): Filtering spatial error from DEMs: Implications for morphological change estimation. In: Geomorphology, Volume 125, 1, S. 160-171.
- Miřijovský, J.; Michalková, M.S.; Petyniak, O.; Máčka, Z.; Trizna, M. (2015 a): Spatiotemporal evolution of a unique preserved meandering system in Central Europe – The Morava River near Litovel. In: Catena, Volume 127, S. 300-311.
- Miřijovský, J.; Langhammer, J. (2015 b): Multitemporal Monitoring of the Morphodynamics of a Mid-Mountain Stream Using UAS Photogrammetry. In: Remote Sensing, Volume 7, 7, S. 8586-8609.
- Morche, D., Schmidt, K., Heckmannnt, T., Haas, F. (2007): Hydrology and geomorphic effects of a high-magnitude flood in an alpine river. In: Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography 89, S. 5-19.
- Neugirg, F.; Stark, M.; Kaiser, A.; Vlacilova, M.; Seta, M.D.; Vergari, F.; Schmidt, J.; Becht, M.; Haas, F. (2016): Erosion processes in calanchi in the Upper Orcia Valley, Southern Tuscany, Italy based on multitemporal high-resolution terrestrial LiDAR and UAV surveys. In: Geomorphology, Volume 269, S. 8-22.

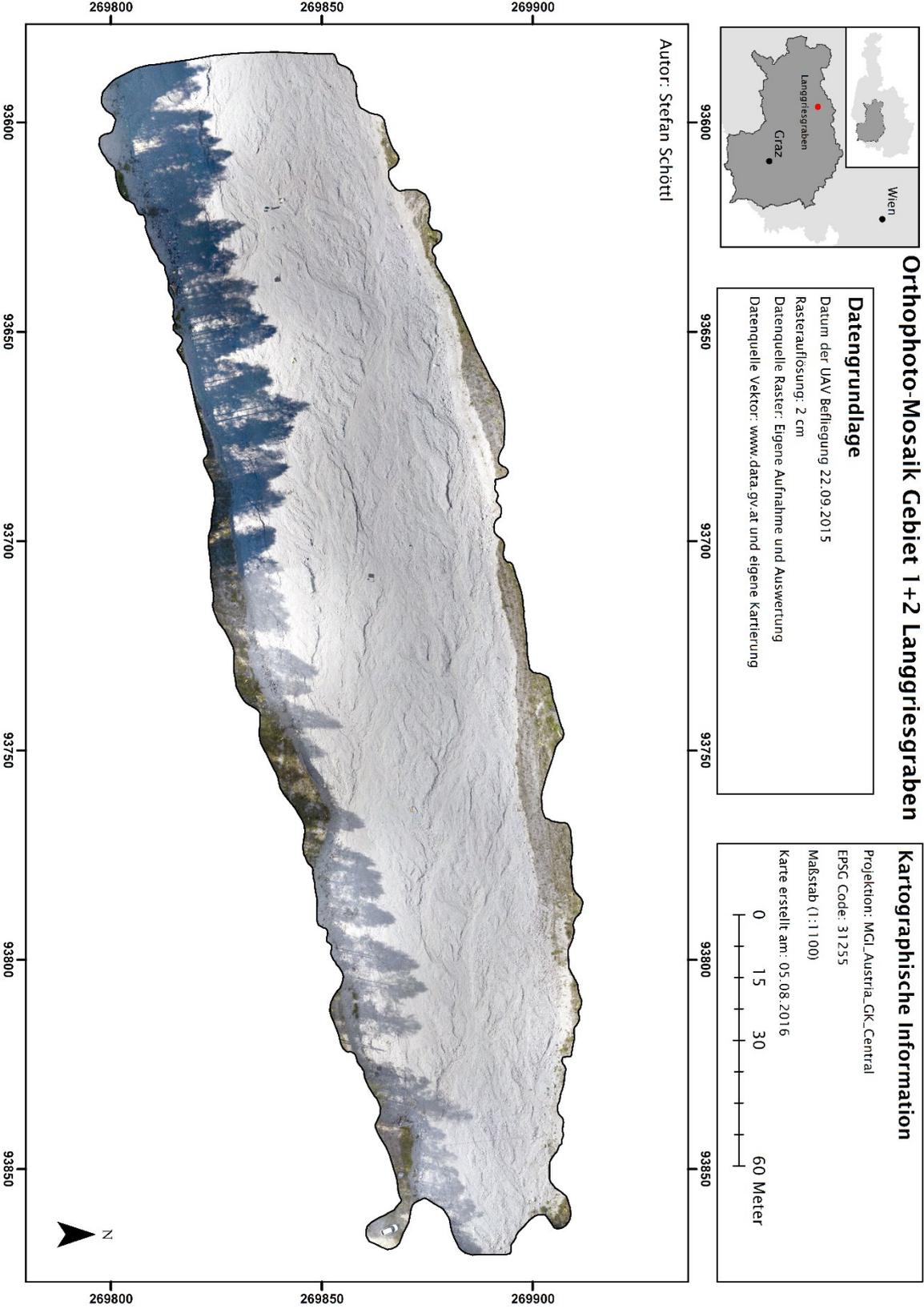
- Niethammer, U.; James, M.R.; Rothmund, S.; Travelletti, J.; Joswig, M. (2012): UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. In: *Engineering Geology*, Volume 28, S. 2-11.
- Pajares, G. (2015): Overview and Current Status of Remote Sensing Applications Based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVS). In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Volume 81, 4, S. 281-330.
- Pfeifer, N.; Briese, C. (2007): Laser Scanning- Principles and Applications. In: *Third International Scientific Conference, Novosibirsk*, S. 93-112.
- Prettenthaler, F.; Podesser, A.; Pilger, H. (Hg.) (2010): *Klimaatlas Steiermark, Periode 1971-2000 Eine anwenderorientierte Klimatographie. Band 4*, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, 358 S.
- Rascher, E.; Sass, O. (2016): Monitoring slope to channel coupling in an alpine catchment (Johnsbachtal, Austria) using multi-temporal terrestrial laser scanning. In: *Zeitschrift für Geomorphologie*, DOI: 10.1127/zfg_suppl/2016/0358.
- Remich, B. (2001): *Geomorphologische Grundlagenerhebung und Bewertung im Projektgebiet Nationalpark Gesäuse*. Diplomarbeit, Karl-Franzen-Universität, Institut für Geographie und Raumforschung, Graz, 83 S.
- Riegl (2010): *Data Sheet LMSZ620. RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Horn*, 4 S.
- RIS (2016): *Rechtsinformationssystem Bundeskanzleramt, Luftfahrtgesetz § 24. f.* <https://www.ris.bka.gv.at/> Zugriff: Juli 2016.
- Salvini, R.; Esposito, G.; Mastrorocco, G.; Seddaiu, M. (2016): Using a Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) to analyze the stability of a natural rock slope. In: *Geophysical Research Abstracts*, Volume 18, EGU2016-4409.
- Schürch, P.; Densmore, A.L.; Rosser, N.J.; Lim, M.; McArdell, B.W. (2011): Detection of surface change in complex topography using terrestrial laser scanning: application to the Illgraben debris-flow channel. In: *Earth Surface Processes and Landforms*, Volume 36, 14, S. 1847-1859.
- Smith, M.W.; Carrivick, J.L.; Hooke, J. (2014): Reconstructing flash flood magnitudes using Structure-from-Motion: A rapid assessment tool. In: *Journal of Hydrology*, Volume 519 Part B, S. 1914-1927.
- Smith, M.W. (2015): Direct acquisition of elevation data: Terrestrial Laser Scanning, Chapter 2.1.5. In: *Cook, S.J.; Clarke, L.E.; Nield, J.M. (Hg.): Geomorphological Techniques, Online Edition, British Society for Geomorphology, London, ISSN: 2047-0371*, 14 S.
- Smith, M.W.; Carrivick, J.L.; Quincey, D.J. (2016): Structure from motion photogrammetry in physical geography. In: *Progress in Physical Geography*, Volume 40, 2, S. 247-275.
- Strasser, U.; Marke, T.; Sass, O.; Birk, S. (2013): Johns creek valley: a mountainous catchment for long-term interdisciplinary human-environment system research in Upper Styria (Austria). In: *Environmental Earth Science* 69, S. 695-705.
- Tamminga, A.; Hugenholtz, C.; Eaton, B.C.; Lapointe, M. (2014): Hyperspatial remote sensing of channel reach morphology and hydraulic fish habitat using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A first assessment in the context of river research and management. In: *River Research and Applications*, Volume 31, 3, S. 379-391.
- Tamminga, A.; Eaton, B.C.; Hugenholtz, C. (2015): UAS-based remote sensing of fluvial change following an extreme flood event. In: *Earth Surface Processes and Landforms*, Volume 40, 11, S. 1464-1476.
- Technische Dokumente (2015): *Technische Dokumente twinHEX v.3.0. Twins.nrn, Ampass*.
- Thorston, J.; Poiker, T.K.; Moore, J.P. (2003): *Integrated Geospatial Technologies - A Guide to GPS, GIS and Data Logging*, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 280 S.

- Tonkin, T.N.; Midgley, N.G.; Cook, S.J.; Graham, D.J. (2016): Ice-cored moraine degradation mapped and quantified using an unmanned aerial vehicle: A case study from a polythermal glacier in Svalbard. In: *Geomorphology*, Volume 258, S. 1-10.
- Toth, C.; Jozkow, G. (2016): Remote sensing platforms and sensors: A survey. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 115, S. 22-36.
- Van Blyenburgh, P. (1999): UAVs: An Overview. In: *Air & Space Europe*, Volume1, 5-6, S. 43-47.
- Van Blyenburgh, P. (2013): 2013-2014 RPAS, Remotely Piloted Aircraft Systems, The Global Perspective 2013/2014. Technischer Bericht, 11 Ausgabe, UVS International, Frankreich, 232 S.
- Wakonigg, H. (1978): *Witterung und Klima in der Steiermark*. Verl. für d. Techn. Univ. Graz, Graz, 473 S.
- Wegener Center (2015): Daten der meteorologischen Station Weidendom für das Jahr 2015. Datenportal Johnsbachtal/Nationalpark Gesäuse.
- Westoby, M.J.; Brasington, J.; Glasser, N.F.; Hambrey, M.J.; Reynolds, J.M. (2012): 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. In: *Geomorphology*, Volume 179, S. 300-314.
- Wheaton, J.M.; Brasington, J.; Darby, S.E.; Sear, D.A. (2010): Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. In: *Earth Surface Processes and Landforms*, Volume 35, 2, S. 136-156.
- Whitehead, K.; Hugenholtz, C.H.; Myshak, S.; Brown, O.; LeClair, A.; Tamminga, A.; Barchyn, T.E.; Moorman, B.; Eaton, B. (2014): Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 2: scientific and commercial applications. In: *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, Volume 2, 3, S. 86-102.
- Williams, R.D. (2012): DEMs of Difference, Chapter 2.3.2. In: Cook, S.J.; Clarke, L.E.; Nield, J.M. (Hg.): *Geomorphological Techniques*, Online Edition, British Society for Geomorphology, London, ISSN: 2047-0371, 17 S.
- Williams, R.D.; Brasington, J.; Vericat, D.; Hicks, D.M. (2013): Hyperscale terrain modelling of braided rivers: fusing mobile terrestrial laser scanning and optical bathymetric mapping. In: *Earth Surface Processes and Landforms*, Volume 39, 2, S. 167-183.
- Wilson, P. J. (2012): Digital Terrain Modelling. In: *Geomorphology*, Volume 137, S.107-121.
- Woodget, A.S.; Carbonneau, P.E.; Visser, F.; Maddock, I.P. (2015): Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. In: *Earth Surface Processes and Landforms*, Volume 40, 1, S. 47-64.
- Woodget (2015): Quantifying physical river habitat parameters using hyperspatial resolution UAS imagery and SfM-photogrammetry. Dissertation, University Worecaster, Worecaster, 414 S.
- ZAMG (2016 a): Klimadaten von Österreich 1971-2000. http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm Zugriff: Mai 2016.
- ZAMG (2015 b): Witterungsübersicht 08/2015. ZAMG, 5 S.
- ZAMG (2015 c): Witterungsübersicht 09/2015. ZAMG, 5 S.

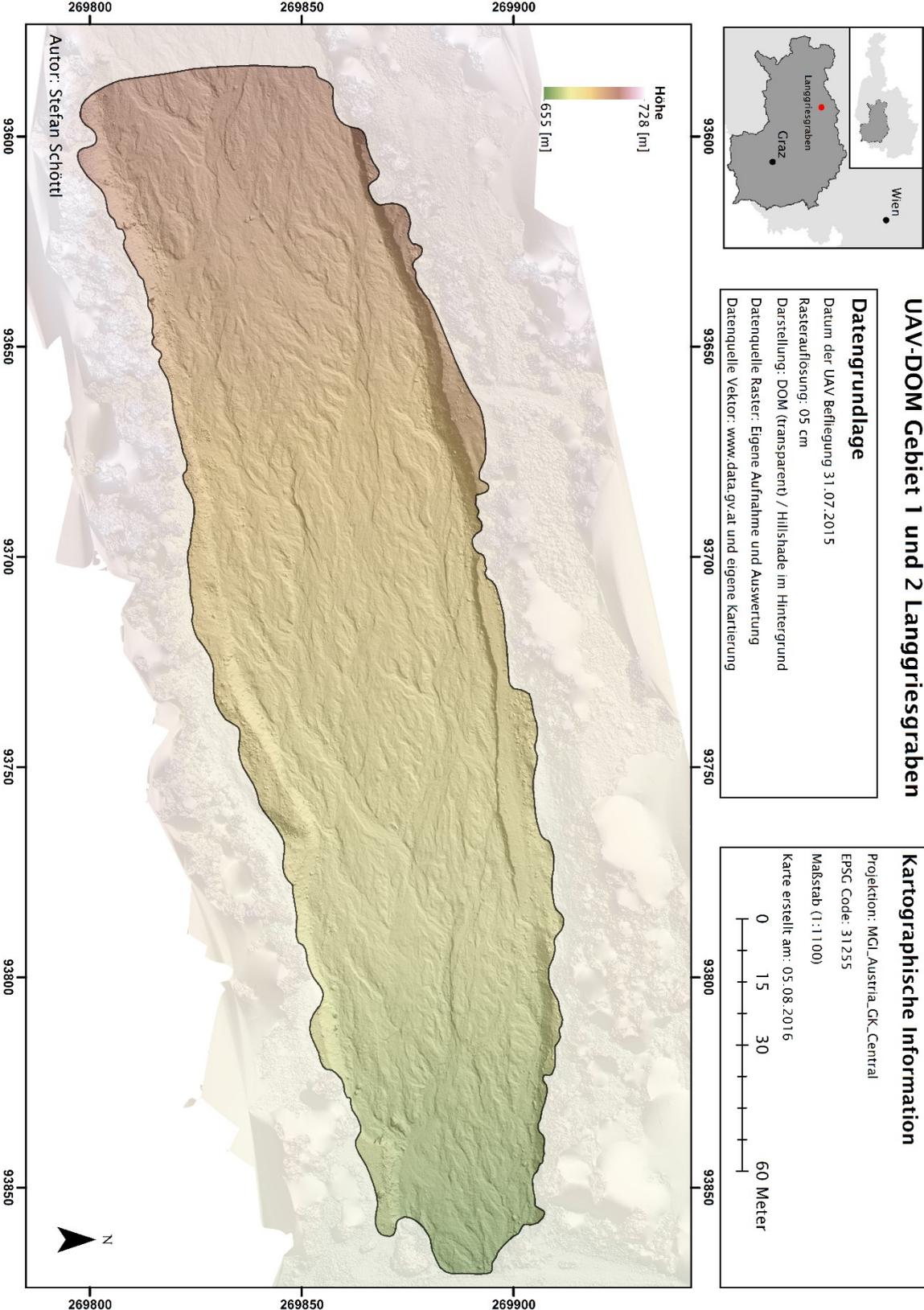
7 Anhang

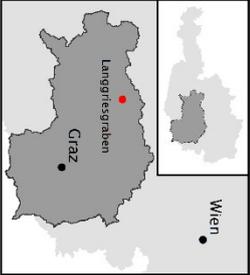
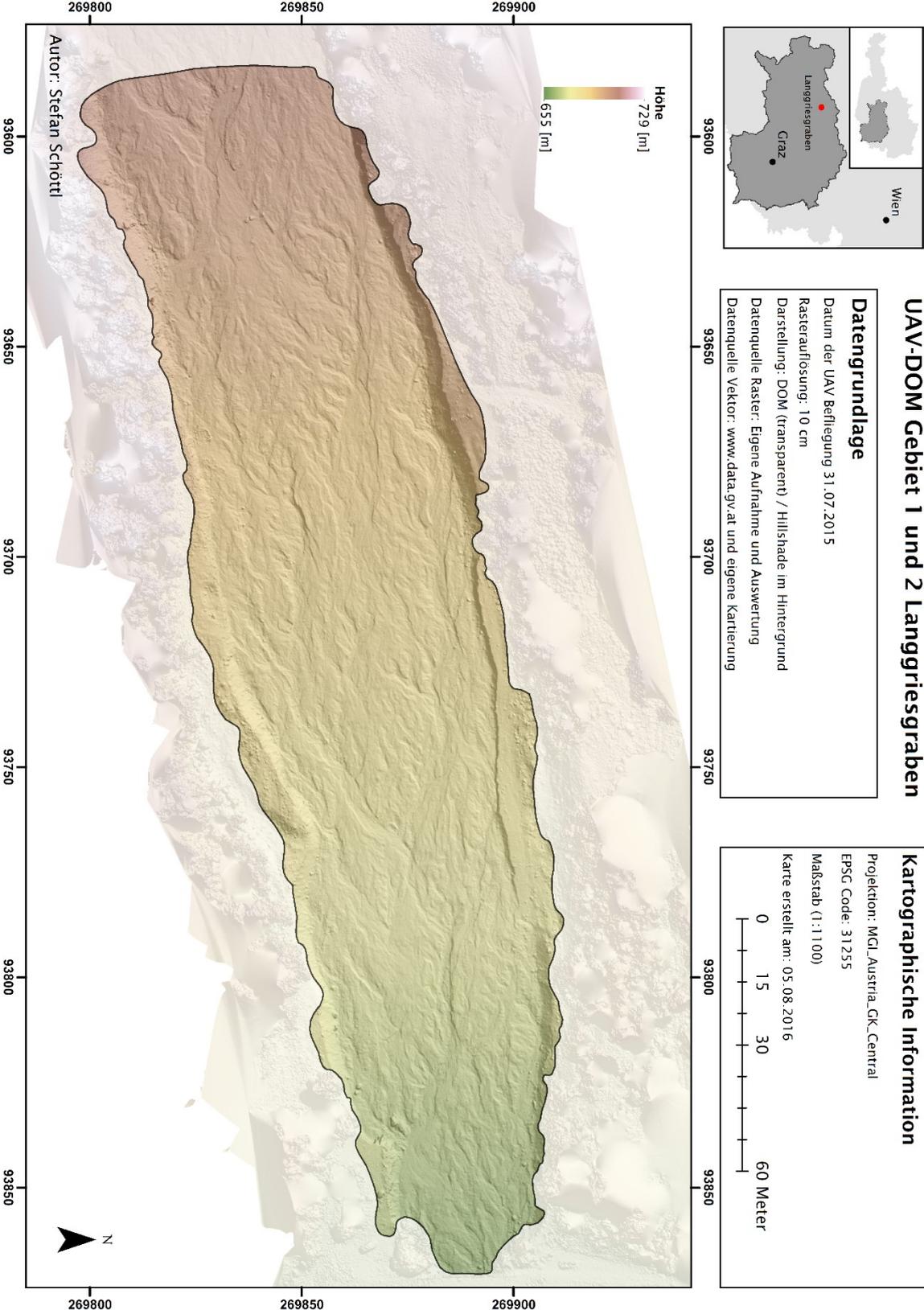
Anhang A-1 Orthophoto











UAV-DOM Gebiet 1 und 2 Langgriesgraben

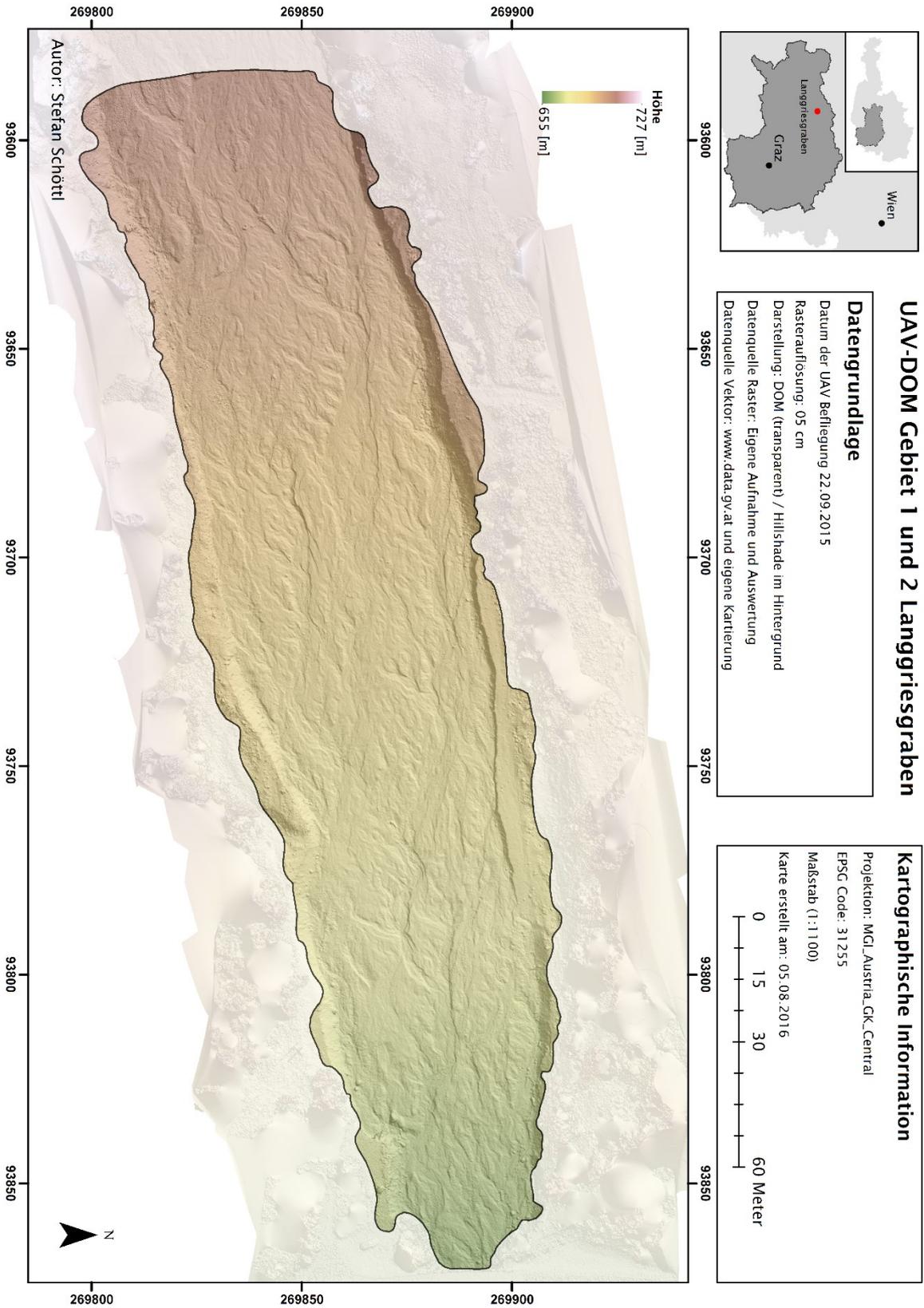
Datengrundlage

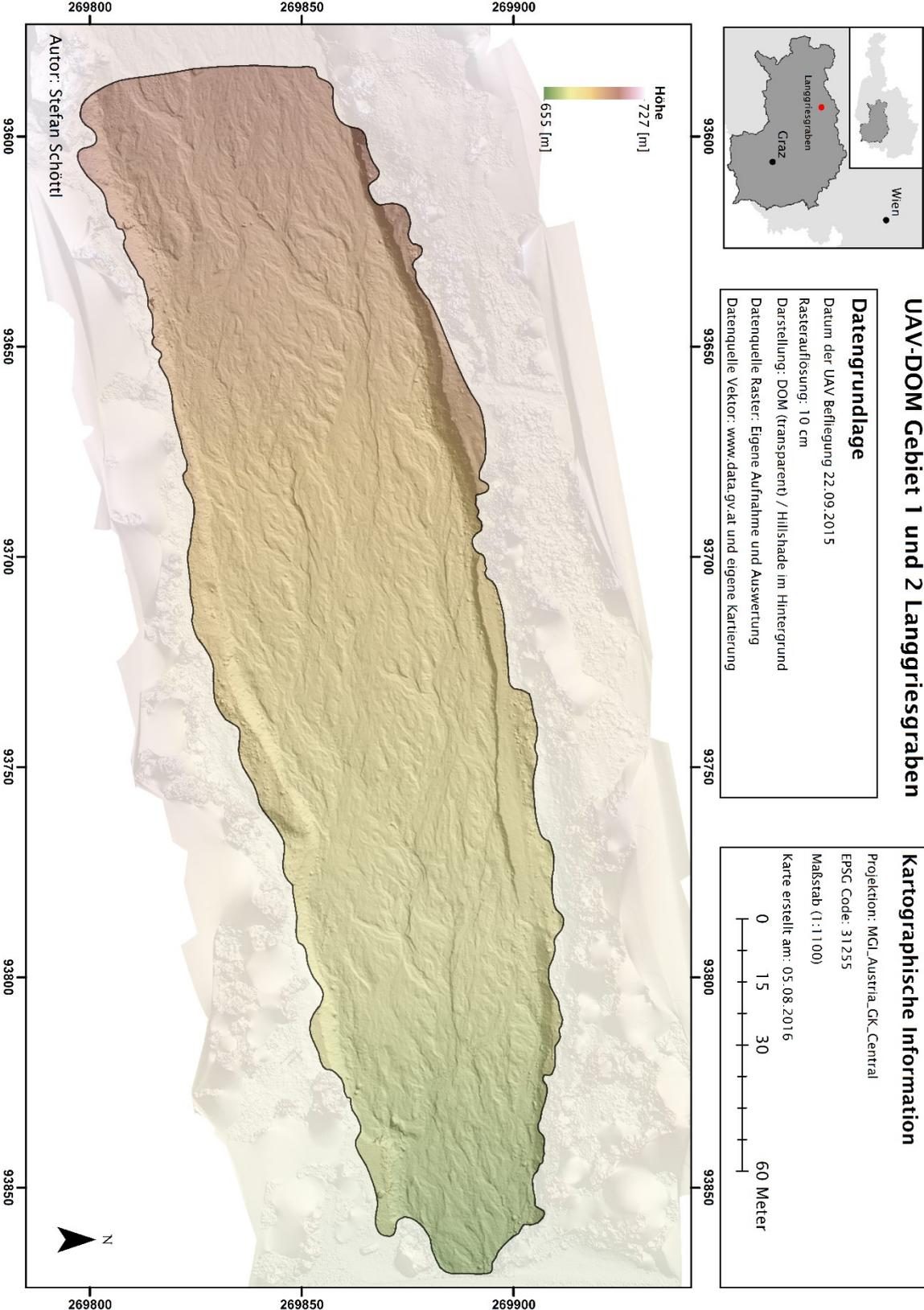
Datum der UAV Befliegung 31.07.2015
 Rasterauflösung: 10 cm
 Darstellung: DOM (transparent) / Hillshade im Hintergrund
 Datenquelle Raster: Eigene Aufnahme und Auswertung
 Datenquelle Vektor: www.data.gv.at und eigene Kartierung

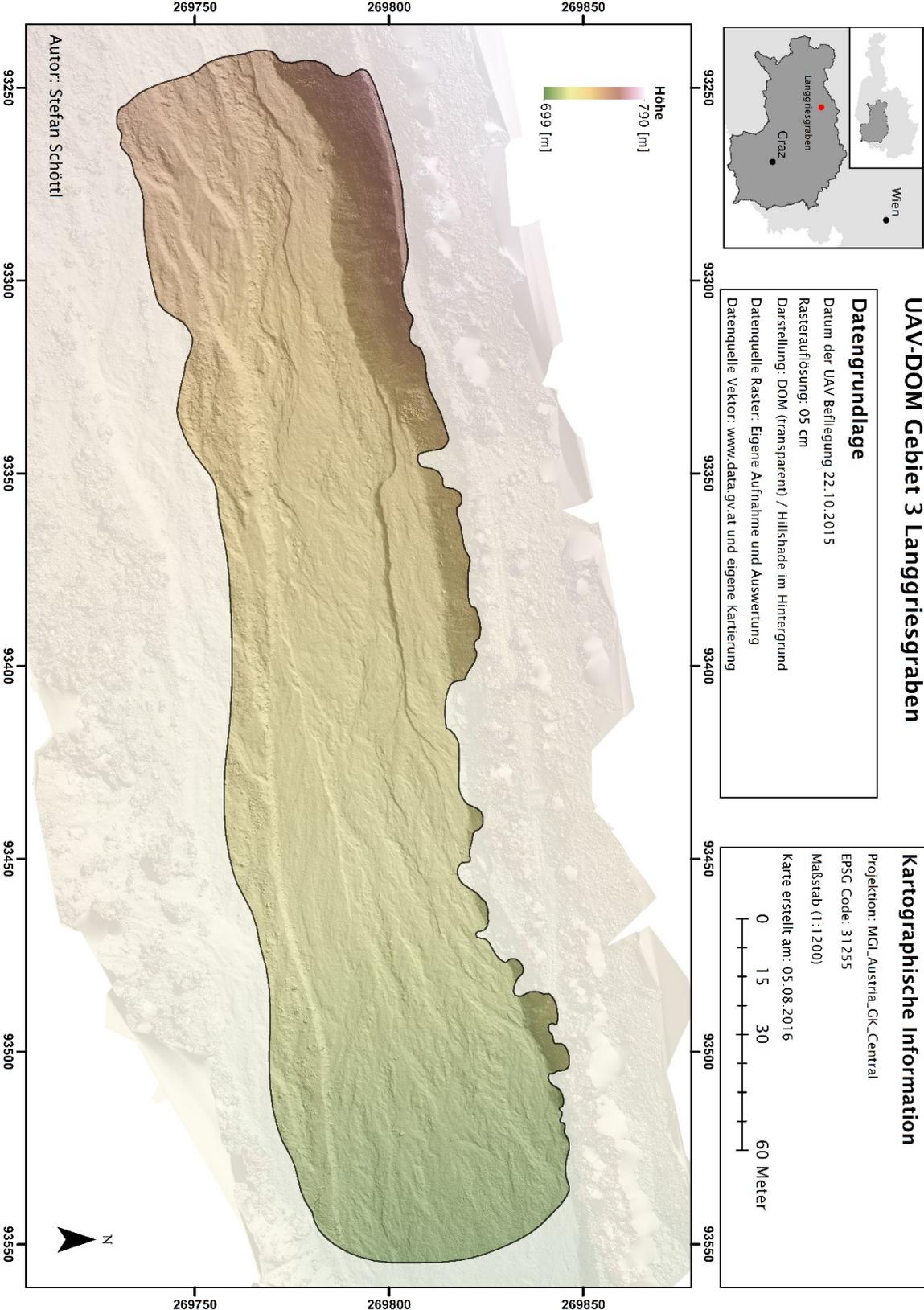
Kartographische Information

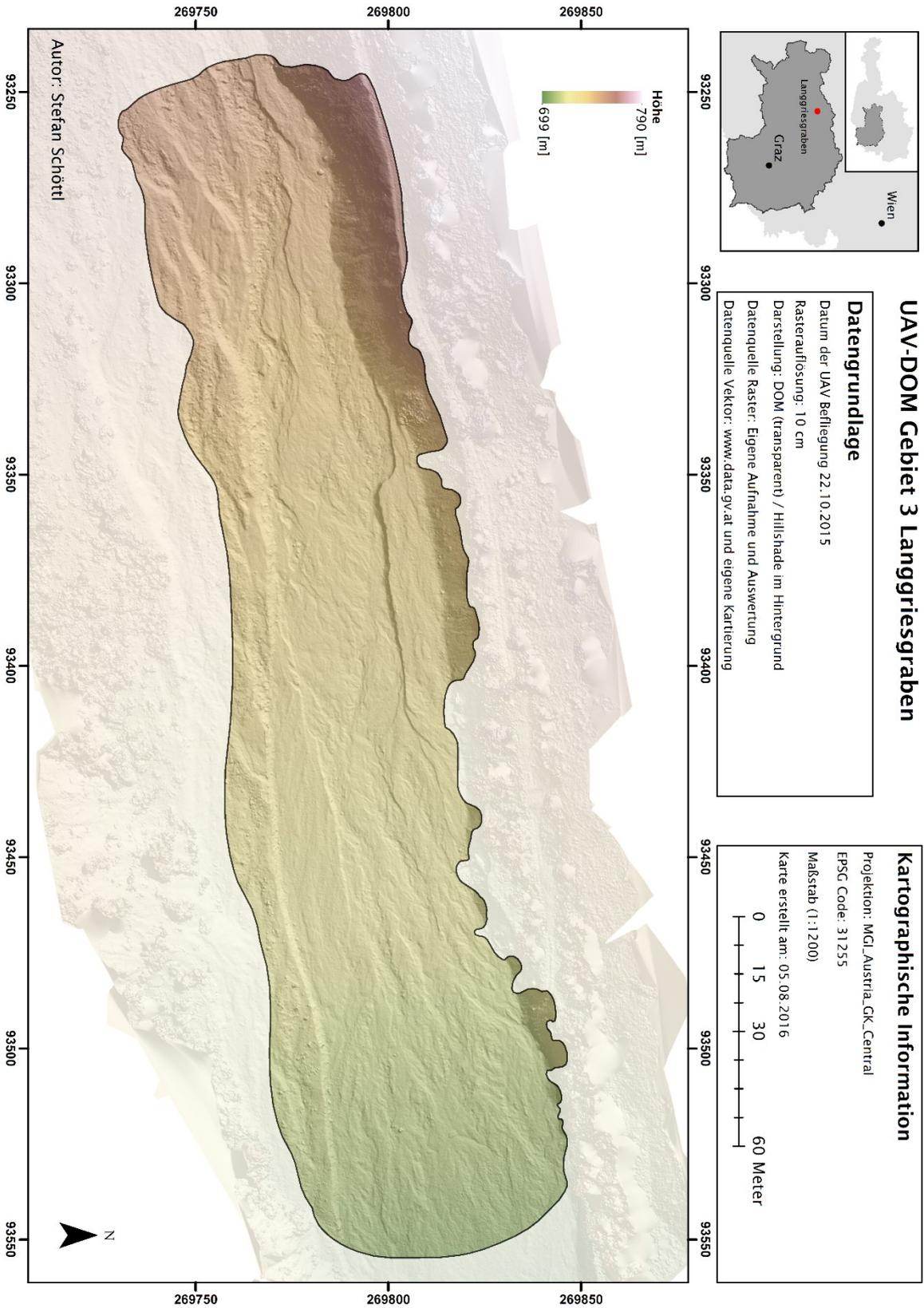
Projektion: MGI_Austria_GK_Central
 EPSG Code: 31255
 Maßstab (1:100)
 Karte erstellt am: 05.08.2016



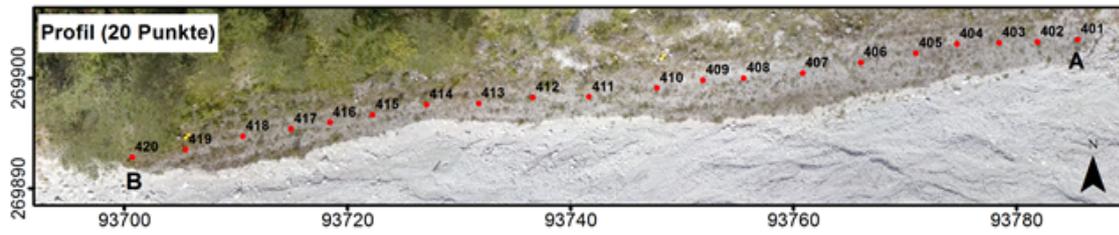




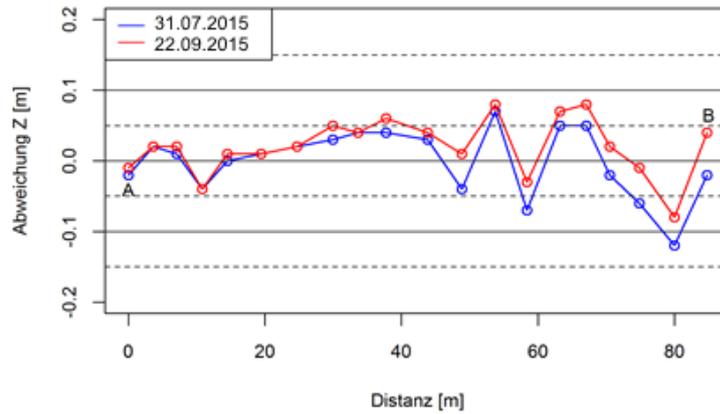




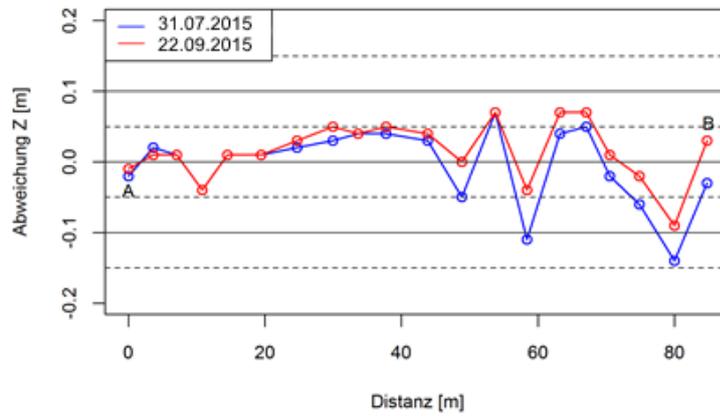
Anhang C Profil



Abweichung dGPS - UAV (DGM 5cm) entlang von Profil



Abweichung dGPS - UAV (DGM 10cm) entlang von Profil



Abweichung dGPS - UAV (DGM 20cm) entlang von Profil

