



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Kleinskalige digitale Erosionsmessung im Oberen
Kaunertal“

verfasst von / submitted by

Josef Kern, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Master of Science (MSc)

Wien, 2022 / Vienna 2022

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066 855

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Geographie

Betreut von / Supervisor:

Dipl.-Geogr. Dr. Sabine Kraushaar

Abstract

Although soil erosion poses a major threat to mountain ecosystems in remote, high-alpine landscapes, studying it is a complex, error-prone task that has been neglected in the past. The photogrammetric technique Structure from Motion-MultiViewStereo (SfM-MVS) offers an efficient and cost-effective way of observing remote and difficult-to-access areas. In addition to the accuracy of the method when measuring small-scale soil erosion, its practicability in the glacier foreland, possibilities for improving the workflow, and a possible connection between the height of the average vegetation cover and the quality of the 3D-point clouds were examined. For this purpose, a total of 7 sites along the succession gradient, with a size of 6 x 3 m, were recorded in June and October 2019 in the Upper Kaunertal with a UAV system as well as with a reflex camera and 3D-point clouds of the sites were calculated with the SfM-software Agisoft Metashape. With a minimum RMSE of 0.0137 m for all examined sites, the quality of the 3D-point clouds is insufficient to measure small-scale soil erosion processes. With the additional use of terrestrial imagery, the RMSE could be reduced at 8 out of 11 sites, with the reduction in RMSE ranging from 0.0009 m to 0.0193 m. Although a trend can be seen, it could not be proven that there is a correlation between the average vegetation cover of the sites and the quality of the calculated 3D-point clouds. While the quality of the 3D-point clouds could be improved by increasing the number of GCPs, when supplementing the UAV data set with terrestrial imagery, it must be ensured that the terrestrial photos are taken at approximately the same time as the UAV photos.

Kurzfassung

Obwohl Bodenerosion in abgelegenen, hochalpinen Landschaften eine große Bedrohung für Bergökosysteme darstellt, ist deren Erforschung eine komplexe, fehleranfällige Aufgabe, die in der Vergangenheit vernachlässigt wurde. Die Photogrammetrische Technik Structure from Motion-MultiViewStereo (SfM-MVS) bietet eine effiziente und kostengünstige Möglichkeit zur Beobachtung abgelegener sowie schwer zugänglicher Gebiete. Neben der Genauigkeit der Methode bei der Messung von kleinskaliger Bodenerosion, wurden deren Praxistauglichkeit im Gletschervorfeld, Verbesserungsmöglichkeiten des Workflows und ein möglicher Zusammenhang zwischen der Höhe der durchschnittlichen Vegetationsbedeckung und Qualität der 3D-Punktwolken untersucht. Dazu wurden im Oberen Kaunertal insgesamt 7 Sites entlang des Sukzessionsgradienten, mit einer Größe von 6 x 3 m, jeweils im Juni und Oktober 2019, mit einem UAV-System sowie mit einer Spiegelreflexkamera aufgenommen und 3D-Punktwolken der Sites mit der SfM-Software Agisoft Metashape berechnet. Mit einem minimalen RMSE aller untersuchten Sites von 0,0137 m reicht die Qualität der 3D-Punktwolken nicht aus, um kleinskalige Erosionsprozesse messen zu können. Durch zusätzlich Verwendung von terrestrischen Bilddaten konnte der RMSE bei 8 von 11 Sites reduziert werden, wobei die Reduzierung des RMSE von 0,0009 m bis 0,0193 m reicht. Obwohl ein Trend zu erkennen ist, konnte nicht nachgewiesen werden, dass zwischen der durchschnittlichen Vegetationsbedeckung der Sites und der Qualität der berechneten 3D-Punktwolken ein Zusammenhang besteht. Während die Qualität der 3D-Punktwolken möglicherweise durch eine Erhöhung der Anzahl an GCPs verbessert werden könnte, muss bei der Ergänzung des UAV-Datensatzes mit terrestrischen Bilddaten sichergestellt werden, dass die terrestrischen Fotos zum annähernd gleichen Zeitpunkt wie die UAV-Fotos aufgenommen werden.

Danksagung

Bedanken möchte ich mich vor allem bei Dipl.-Geogr. Dr. Sabine Kraushaar, welche mich bei meiner Masterarbeit unterstützte, mich während des gesamten Prozesses der Erstellung meiner Masterarbeit betreute und geduldig mit mir war. Des Weiteren möchte ich mich bei Mag. Stefan Haselberger für seine Ideen und seinen fachlichen Input, vor allem aber für eine gute Zeit im Untersuchungsgebiet bedanken. Neben Sabine und Stefan gilt mein Dank Mag. David Liedl, für die Unterstützung bei der Feldarbeit, das gemeinsame Brainstormen sowie für das Suchen und Finden von software-spezifischen bzw. technischen Lösungen für Probleme, die während der Feldarbeit und der Datenauswertung aufgetreten sind. Ferner bedanke ich mich bei allen Verantwortlichen von PHUSICOS sowie bei dessen Auftraggeber Horizon 2020, dem Rahmenprogramm der Europäischen Union für Forschung und Innovation, denn ohne das Forschungsprojekt PHUSICOS wäre meine Masterarbeit in dieser Form nicht möglich gewesen. Bedanken möchte ich mich außerdem bei Robert Kanta, BSc, für seine Hilfe bei Problemen mit dem Tachymeter. Überdies bedanke ich mich beim gesamten Team von ENGAGE, der Arbeitsgruppe für Geomorphologische Systeme und Risikoforschung an der Universität Wien unter der Leitung von Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Freundin Martina Perzl, MSc, für ihre motivierenden Worte in schwierigen Zeiten und für ihre Unterstützung, bei meiner Korrektorin und Schwester Mag. Katharina Kern-Geirhofer für ihre Unterstützung und ihre Zeit sowie bei meiner Schwester Magdalena Kern, die mich einst dazu inspirierte, ein Studium zu beginnen, bedanken. Abschließend bedanke ich mich bei meinen Eltern Helga und Josef Kern für alles.

Vorwort

Als am 16. März 2020 wegen der Corona-Pandemie der erste Lockdown angekündigt wurde, befand sich die im Zuge der vorliegenden Masterarbeit durchgeführte Datenanalyse gerade im Anfangsstadium. Um die leistungsintensiven Berechnungen durchführen zu können, benutzte der Autor einen Rechner am Institut für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien. Da die Gebäude der Universität von einem auf den anderen Tag nur mehr von Angestellten aufgesucht werden durften, und einige Versuche, eine Remote-Verbindung zum vom Autor bis dahin benutzten Rechner herzustellen, scheiterten, gestaltete sich die weitere Datenanalyse vorerst als äußerst schwierig. In weiterer Folge sollten die ersten Lockdowns aber nur eine geringe Verzögerung darstellen, denn der Abschluss dieser Masterarbeit wurde vor allem durch neue berufliche Herausforderungen sowie durch weitere persönliche Verwirklichungen des Autors verzögert.

Umso glücklicher ist der Autor nun darüber, seine Masterarbeit und somit auch sein Masterstudium der Geographie an der Universität Wien abschließen zu können und auf eine in mannigfaltiger Hinsicht prägende sowie bereichernde Zeit zurückzublicken.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	iv
Abkürzungsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Relevanz	1
1.2 Forschungsprojekt PHUSICOS	3
1.3 State of the Art.....	4
1.4 Forschungsfragen und Hypothesen.....	6
1.5 Struktur der Arbeit	8
2 Untersuchungsgebiet: Oberes Kaunertal	9
2.1 Geographie.....	10
2.2 Geologie	11
2.3 Geomorphologie	12
2.4 Klima und Vegetation	14
3 Methodik	16
3.1 Funktionsweise von SfM-Photogrammetrie	16
3.1.1 Feature Detection	17
3.1.2 Keypoint Correspondence	17
3.1.3 Keypoint Filtering	18
3.1.4 Structure from Motion	18
3.1.5 Scaling and georeferencing	19

3.1.6 Multi-View Stereo.....	20
3.2 Anwendungsbereiche von SfM.....	21
3.3 Bodenerosionsmessung mit SfM.....	22
3.3.1 Vergleich von 3D-Punktwolken.....	22
3.3.2 Vegetationsfilter	23
3.4 Erosionsplots im Untersuchungsgebiet	24
3.5 Datenerhebung.....	26
3.5.1 Tachymetrie	26
3.5.2 Fernerkundung und terrestrische Datenerfassung	27
3.6 Datenanalyse.....	29
3.6.1 Berechnung der 3D-Punktwolken.....	29
3.6.2 Statistische Analyse der Modellgenauigkeit	31
4 Ergebnisse	33
5 Diskussion	39
5.1 Allgemeine Diskussion	39
5.2 Diskussion der Datenerhebung	40
5.3 Diskussion der Datenanalyse	44
5.4 Diskussion der Ergebnisse	45
6 Zusammenfassung und Ausblick	50
7 Literatur.....	51
Anhang.....	64

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Phusicos Logo (PHUSICOS 2022)	4
Abb. 2: Untersuchungsgebiet Oberes Kaunertal	9
Abb. 3: SfM-MVS Workflow nach CARRIVIC et al. 2016	16
Abb. 4: Kameraausrichtungen und Kameraposition der Sparse Point Cloud für die Site L4A im Oktober 2019	19
Abb. 5: Ddense Point Cloud der Site S5 im Oktober 2019	20
Abb. 6: 1.: Site L3A, 2.: Site S1, 3.: Begrenzungs-Holzpflöck und Mobiler GCP, 4.: Bedrock-GCP	25
Abb. 7: Tachymetrie im Untersuchungsgebiet (LIEDL 2019)	26
Abb. 8: Jeweils im Juni und Oktober 2019 beflogene Sites	28
Abb. 9: RMSE der Check Points für UAV+ terrestrische Fotos sowie UAV-Fotos, Juni 2019	36
Abb. 10: RMSE der Check Points für UAV+ terrestrische Fotos sowie UAV-Fotos, Oktober 2019	36
Abb. 11: RMSE der Check Points und durchschn. Vegetationsbedeckung aller untersuchten Sites	37
Abb. 12: RMSE der Check Points und durchschnittliche Vegetationsbedeckung der Sites inkl. UAV-Bilddaten und terrestrischer Bilddaten	38
Abb. 13: Oben: Gut erkennbare GCP-Nummer, unten: nicht erkennbare GCP- Nummer	41

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: RMSE der Kontrollpunkte für die Site S1 im Oktober 2019	33
Tab. 2: RMSE der Check Points für die Site S1 im Oktober 2019	34
Tab. 3: RMSE der Kontrollpunkte für die untersuchten Sites im Juni und Oktober 2019.....	34
Tab. 4: RMSE der Check Points für die untersuchten Sites im Juni und Oktober 2019.....	35

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AGB	Aboveground Biomass
ALS	Airborne Laserscanning
ATR	Automatic Target Recognition
BA	Bundle Adjustment
C2C	Direct Cloud-to-Cloud
C2M	Cloud-to-Mesh Distance, Cloud-to-Model Distance
CPU	Central Processing Unit
DEM	Digital Elevation Model
dGPS	Differential Global Positioning System
DJI	Da-Jiang Innovations Science and Technology Co.
DoD	Digital Elevation Models of Difference
DSM	Digital Surface Model
GCD	Geomorphic Change Detection
GCP	Ground Control Point
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
LIA	Little Ice Age
M3C2	Model-to-Model Distance
MVS	Multi-View Stereo

NBS	Nature-based Solution
PC	Personal Computer
RAM	Random Access Memory
RANSAC	Random Sample Consensus
RMSE	Root Mean Square Error
RPV	Remotely Piloted Vehicle
SfM	Structure from Motion
SIFT	Scale Invariant Feature Transform
TIWAG	Tiroler Wasserkraft AG
TLS	Terrestrial Laser Scanning
UAS	Unoccupied Aerial Systems
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Relevanz

Der globale Klimawandel wirkt sich stark auf alpine Regionen aus (vgl. BAEWERT und MORCHE 2014). Klimamodellierungen zufolge kommt es in den nächsten Jahrzehnten zu massiven Veränderungen der glazial geprägten Gebiete in den Alpen. Demnach wird sich die aktive Alpengletscherfläche bis 2050 auf 40 - 50 % und bis 2100 auf 15 - 20 % der Fläche von 1980 reduzieren, wobei in Österreich ein noch höherer Rückgang wahrscheinlich ist. (vgl. MATULLA 2009) Bereits seit dem Ende der Kleinen Eiszeit (LIA) sind die Alpengletscher durch eine negative Nettobilanz charakterisiert (vgl. BAEWERT und MORCHE 2014). Auch in den letzten Jahrzehnten zeugten beachtliche Massenverluste sowie Flächenverluste der Alpengletscher von der rezenten Klimaerwärmung (vgl. ABERMANN et al. 2009, SCHMIDT et al. 2009). Diese gegenwärtigen Klimaveränderungen in alpinen Hochgebirgen und die damit einhergehenden, rasanten Gletscherschmelzen, führen zu intensivierten geomorphologischen Prozessdynamiken an eisfrei gewordenen Hängen (vgl. OHLER et al. 2021, VEHLING 2016). Während sich proglaziale Flächen auf Kosten der Gletscher immer weiter ausdehnen (vgl. PAUL und BOLCH 2019) und heute allein in Österreich eine Fläche von mehr als 590 km² einnehmen (vgl. CARRIVICK et al. 2019), werden große Mengen an subglazialen Lockersedimenten freigelegt, welche häufig aufgrund der fehlenden Vegetationsschicht besonders erosionsanfällig sind. (vgl. BAEWERT und MORCHE 2014, OHLER et al. 2021). Daneben führen auch eine steigende Schneegrenze sowie intensivierte Niederschläge in den Wintermonaten zu erhöhten Erosionsraten (vgl. ALEWELL et al. 2015).

Bodenerosion gehört heutzutage zu den bedeutendsten Umweltproblemen (vgl. MEUSBURGER und ALEWELL 2014) und stellt weltweit eine große Bedrohung für Bergökosysteme dar (vgl. ALEWELL et al. 2014). Dies ist darauf zurückzuführen, dass Bodenerosion in alpinen Landschaften sehr schwierig zu stoppen ist, wenn der Prozess bereits begonnen hat (vgl. MEUSBURGER und ALEWELL 2014). Trotz dieser Bedrohung konzentrierte sich die Bodenerosionsforschung bis vor wenigen

Jahren hauptsächlich auf landwirtschaftlich genutzte Ackerflächen. Dadurch wurde die Erforschung von Bodenerosion in abgelegenen, alpinen Landschaften, welche durch steile Hänge und extreme klimatische Bedingungen gekennzeichnet sind, vernachlässigt. (vgl. KONZ et al. 2010, Konz et al. 2012, MEUSBURGER und ALEWELL 2014) Da es nur für wenige Untersuchungsgebiete flächendeckende, quantitative Daten hinsichtlich der Prozessintensitäten gibt, besteht Forschungsbedarf in den betroffenen Gebieten (vgl. VEHLING 2016). Die vorliegende Masterarbeit soll einen Beitrag leisten, Erosionsprozesse in ruralen Gebirgsregionen, insbesondere in proglazial geprägten Gebieten, zu erforschen und somit schließlich besser zu verstehen.

Geomorphologische Aktivitäten im Gletschervorfeld können durch eine Erhöhung der Vegetationsbedeckung verringert werden (vgl. EICHEL et al. 2016), denn eine intakte Vegetationsbedeckung verhindert Bodenverlust (vgl. ALEWELL et al. 2015, MEUSBURGER und ALEWELL 2014) und kann somit der fortschreitenden Erosion im Hochgebirge entgegenwirken. Dabei werden die zu Beginn dominierenden abiotischen Prozesse durch biotische Prozesse überholt (vgl. MILLER und LANE 2018). Die Schutzfunktion der Vegetation ist besonders im Winter ausgeprägt, wo Schneegleiten durch die Oberflächenrauigkeit einer Vegetationsschicht im Gegensatz zu unbewachsenen Hängen reduziert wird. (vgl. MEUSBURGER et al. 2014).

Um quantitative Aussagen über die Schutzfunktion von Vegetation gegen Bodenerosion treffen zu können, sind genaue Erosionsmessungen notwendig. Obwohl quantitative Erosionsforschung im alpinen Gelände eine komplexe und fehleranfällige Aufgabe ist (vgl. ALEWELL et al. 2015) und die Erfassung qualitativ hochwertiger Geländedaten in abgelegenen, hochalpinen Umgebungen eine große Herausforderung darstellt (vgl. WESTOBY et al. 2012), ist die Genauigkeit einer dementsprechenden Methode die Voraussetzung, um exakt feststellen zu können, wieviel Erosion auf bewachsenen sowie auf unbewachsenen Flächen passiert. Deshalb ist es wichtig, verschiedene Methoden der Erosionsmessung in gebirgigen Regionen zu testen und weiterzuentwickeln. Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit digitaler Erosionsmessung im kleinskaligen Bereich. Unter kleinskalig ist in diesem Kontext zu verstehen, dass Erosionsprozesse auf der Skala eines Plots untersucht werden. Dies entspricht einer Fläche $< 100 \text{ m}^2$, wobei in diesem Bereich hauptsächlich Rillenerosion sowie

Zwischenrillenerosion bzw. Regentropfenerosion untersucht wird. (vgl. STROOSNIJDER 2005) Dazu wurde an der photogrammetrischen Technik Structure from Motion (SfM) geforscht. Mithilfe dieser Arbeit sollen dabei unter anderem die Praxistauglichkeit sowie die Genauigkeit und die Grenzen der Methode bei der Anwendung im Gletschervorfeld aufgezeigt werden. Die im Zuge dieser Masterarbeit generierten Ergebnisse können im Forschungsprojekt Phusicos bzw. in der auf dem Forschungsprojekt aufbauenden Forschung Verwendung finden.

1.2 Forschungsprojekt PHUSICOS

PHUSICOS oder auf Griechisch φυσικός, bedeutet „nach der Natur“ und ist der Name des Forschungsprojektes, in welches die vorliegende Masterarbeit eingebettet ist. Das Ziel von PHUSICOS ist es aufzuzeigen, wie das Risiko von Extremwetterereignissen in ruralen Berglandschaften durch Lösungen, welche von der Natur inspiriert sind, reduziert werden kann. Dabei sollen diese „Nature-based Solutions“ (NBSs) stabil, nachhaltig und möglichst kostengünstig sein. Die Auswirkungen von Naturgefahrenereignissen sollen somit abgeschwächt bzw. verhindert, menschliche bzw. finanzielle Kosten durch ein besseres und flexibleres Katastrophenrisikomanagement reduziert, und die ökologische, soziale und wirtschaftliche Resilienz der ansässigen Gemeinden in Bezug auf hydrometeorologische Gefahren, wie Überschwemmungen und Erdbeben sowie Erosion und Dürre, erhöht werden. (vgl. PHUSICOS 2021)

Insgesamt betreibt PHUSICOS gegenwärtig fünf Fallstudien an verschiedenen hydrographischen Einzugsgebieten in Europa, darunter befindet sich das Kaunertal in Tirol (vgl. UNIVERSITÄT WIEN 2021), welches auch als Untersuchungsgebiet für die vorliegende Masterarbeit fungiert. Das Ziel der Studie im Kaunertal ist die Entwicklung einer höhenangepassten Saatgutmischung, mit deren Hilfe die Hänge stabilisiert werden sollen und dadurch der Erosion sowie Massenbewegungen auf steilen Hängen im Hochgebirge entgegengewirkt wird (vgl. HASELBERGER et al. 2018, PHUSICOS 2021). Das Saatgut wird mit heimischen Mikroorganismen behandelt, um das Wurzelsystem stärker zu entwickeln und um einen dichteren Wuchs zu fördern. Somit wird die erosionsmindernde Funktion der Vegetationsdecke erhöht. Das fertige Produkt wird anschließend mittels Hydrosaat auf den Hängen im proglazialen Bereich ausgebracht. (vgl. HASELBERGER et al. 2018) Der

Auftraggeber des Forschungsprojektes ist „Horizon 2020“, das Rahmenprogramm der Europäischen Union für Forschung und Innovation (vgl. PHUSICOS 2021). Ausführliche Informationen zum Forschungsprojekt PHUSICOS können unter: <https://phusicos.eu> aufgerufen werden.



Abb. 1: Phusicos Logo (PHUSICOS 2022)

1.3 State of the Art

Der Begriff der Erosion muss laut AHNERT (2015) von jenem der Bodenerosion unterschieden werden, da Bodenerosion, die vom Menschen verursachte bzw. beschleunigte Abtragung von Boden- und Regolithmaterial bezeichnet und besonders in landwirtschaftlich genutzten Gebieten von Bedeutung ist. Unter Erosion versteht man die linienhafte Abtragung entlang von annähernd linienförmigen Abtragungsbahnen wie zum Beispiel Flüssen, Talgletschern oder Küsten. Der Begriff der Denudation, welcher alle Prozesse der flächenhaften Abtragung umfasst, ist nicht immer von dem der Erosion zu trennen, denn Bodenerosion kann entweder flächenhaft oder linienhaft sein. (vgl. AHNERT 2015, SUDHAUS 2010) Physikalische Bodenerosion (E) ist als Ablösung und Transport von Bodenmaterial definiert (vgl. ALEWELL et al. 2015). Laut KONZ (2012) bezieht sich der Begriff Bodenerosion auf Schichterrosion (Flächenspülung), Rillenerosion, und Grabenerosion sowie auf Rutschungen.

In gebirgigen Regionen stellt die Gravitation einen entscheidenden Faktor in Bezug auf Erosionsprozesse dar. Daneben haben mechanische Reibung bzw. Abrieb, welche durch die Schneebedeckung im Winter entstehen, einen erheblichen Einfluss auf die Erosionsraten im Hochgebirge. Wasserinduzierte Bodenerosion wird in gebirgigen Regionen neben dem Klima, der Topographie und der Erodierbarkeit des Bodens auch stark von der Landnutzung beeinflusst. Des Weiteren wird Bodenerosion während der Vegetationsperiode häufig durch tierische Aktivität beeinflusst. (vgl. KONZ et al. 2010, KONZ et al. 2012) Während es auf Hängen im Gletschervorfeld, die mit Sediment bedeckt sind, zu

Murgängen, Flächenspülungen bzw. Zwischenrillenerosion und Rillenerosion kommt und dabei in weiter Folge Erosionsrinnen, Rotationsrutschungen und Translationsrutschungen entstehen können (vgl. MILLER und LANE 2018), passiert Bodenerosion im alpinen Grünland hauptsächlich durch Translationsrutschungen und durch Schichterrosion sowie durch Viehtritt (vgl. ALEWELL et al. 2015, MEUSBURGER und ALEWELL 2014). Schätzungen zufolge betragen die Bodenerosionsraten an stark betroffenen Standorten in den Alpen zwischen 1.4 - 3 mm/a⁻¹ (vgl. ALEWELL et al. 2015).

Bodenerosionsforschung wird sowohl im Labor als auch direkt im Feld durchgeführt. Während Messungen unter Laborbedingungen eine bessere Kontrolle, die Verwendung automatisierter Geräte und die Möglichkeit, wiederholte Messungen durchzuführen ermöglichen, kann bei der Feldforschung im richtigen Maßstab, mit realistischen Boden- und Pflanzencharakteristika und zeitlichen Änderungen von Umweltvariablen gearbeitet werden. (vgl. STROOSNIJDER 2005) Hauptsächlich beschränken sich Erosionsmessungen in gebirgigen Regionen auf die Vegetationsperiode. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Messung von Bodenerosion durch Schneebedeckung erschwert wird. (vgl. KONZ et al. 2010, KONZ et al. 2012) Bei der direkten Erosionsmessung können entweder die Gewichtsveränderung, die Änderung der Oberflächenhöhe, die Änderung eines Kanalquerschnittes oder gesammeltes Sediment gemessen werden (vgl. STROOSNIJDER 2005).

Bodenerosion kann unter anderem mithilfe von Sedimentfallen und Sedimentbechern gemessen werden (vgl. KONZ et al. 2010, KONZ et al. 2012), wobei Plot-Messungen mit Sedimentfallen die gängigste Methode darstellen (vgl. MEUSBURGER und ALEWELL 2014). Auch die Messung des Zerfalls der radioaktiven Nuklide ¹³⁷Cs bzw. ²³⁹⁺²⁴⁰Pu kann als Tracer bei Bodenerosionsstudien eingesetzt werden (vgl. ALEWELL et al. 2014, KONZ et al. 2010, MEUSBURGER et al. 2014). Außerdem können die stabilen Isotope ¹³C, ¹⁵N und ¹⁸O als Tracer in der Erosionsforschung Verwendung finden (vgl. MEUSBURGER und ALEWELL 2014). Auf experimenteller Ebene werden Niederschlagssimulatoren eingesetzt, um durch Niederschlag verursachte Bodenerosion entweder direkt im Feld oder unter Laborbedingungen zu messen (vgl. BALAGUER-PUIG et al. 2017). Andere

Methoden der Erosionsmessung nutzen Modellierungen (vgl. KONZ et al. 2010) bzw. die Kombination aus Fernerkundung und Modellierung (vgl. ALEWELL et al. 2015).

Die Kombination von UAV-basierten Luftaufnahmen und Structure-from-Motion (SfM) Algorithmen bietet eine effiziente Methode für die Fernerkundung und die Beobachtung von dynamischen Naturräumen (vgl. CLAPUYT et al. 2016). Dies ist vor allem auf die geringen Kosten der Anwendung dieser Methode zurückzuführen (vgl. COOK 2017, MAURI et al. 2021, STOTT et al. 2020). Daneben eignet sich die Methode besonders für die wiederholte topographische Vermessung von abgelegenen bzw. schwer zugänglichen Gebieten (vgl. ELTNER et al. 2016, Kaiser et al. 2014). Ein weiterer großer Vorteil von SfM ist, dass eine Topografie anhand von einem unorientierten Set von Fotos, rekonstruiert werden kann. (vgl. CLAPUYT et al. 2016) Die Entwicklung von benutzerfreundlicher SfM-Software, welche hochauflösende Topographierekonstruktionen ermöglicht, erleichtert es dem Nutzer, Oberflächenprozesse mit SfM zu untersuchen (vgl. COOK 2017). Die Verfügbarkeit von kostengünstigen, leichten und zuverlässigen UAV-Systemen sowie neuere Entwicklungen im Bereich der Bildverarbeitung, sprechen ebenfalls für die Effizienz dieser Methode (vgl. CLAPUYT et al. 2016).

1.4 Forschungsfragen und Hypothesen

Der Einsatz von SfM bei Anwendungen, die eine genaue Auflösung sowie hoch präzise DEMs im Millimeterbereich verlangen, befindet sich immer noch in der Experimentierphase (vgl. BALAGUER-PUIG et al. 2017). Aus diesem Grund ist es wichtig, die Methode unter verschiedensten Bedingungen sowie für verschiedenste Skalenbereiche zu evaluieren und weiterzuentwickeln. Dies beinhaltet sowohl Analysen zur Genauigkeit der Methode sowie Experimente, welche darauf abzielen, die Methode zu verbessern. Diese Masterarbeit beschäftigt sich sowohl mit der SfM-Erosionsmessung im kleinskaligen Bereich sowie mit der Erosionsmessung im hochalpinen Gelände. Anwendungen von UAV-Photogrammetrie auf kleinskalige Erosionsformen wie Rillenerosion und Zwischenrillenerosion sind immer noch limitiert (vgl. ELTNER et al. 2018).

Um Bodenerosionsstudien im Millimeterbereich durchführen zu können, muss die Topografie der Bodenoberfläche sowie deren Veränderung während des Erosionsprozesses genau angegeben werden können (vgl. BALAGUER-PUIG et al. 2017). Dies setzt eine Methodik voraus, die im Stande ist, präzise Ergebnisse zu liefern. Im Zuge dieser Masterarbeit soll somit einerseits die Genauigkeit der Methode untersucht werden und andererseits sollen Versuche unternommen werden, um Erkenntnisse zu gewinnen, wie die Genauigkeit der Methode möglicherweise verbessert werden könnte. Daraus ergeben sich die folgenden Forschungsfragen (F1, F2, F3) sowie die dazugehörigen Hypothesen (H01, H02, H03):

F1: Können Erosionsprozesse im kleinskaligen Bereich mithilfe der SfM-Methode im hochalpinen Gelände des Oberen Kaunertals gemessen werden?

H01: Die Qualität der mit SfM generierten 3D-Punktwolken reicht nicht aus, um Aussagen über kleinskalige Erosionstätigkeiten im Untersuchungsgebiet treffen zu können.

F2: Kann die Qualität der für die SfM-Erosionsmessung im Oberen Kaunertal generierten 3D-Punktwolken durch die Hinzufügung von terrestrischen Bilddaten zum UAV-Bilddatensatz erhöht werden?

H02: Der räumliche Fehler (RMSE), welcher bei der SfM-Erosionsmessung mit UAV-Bilddaten entsteht, kann durch eine zusätzliche Verwendung von terrestrischen Bilddaten nicht weiter reduziert werden.

F3: Ist die Qualität der 3D-Punktwolken von Sites mit einer höheren durchschnittlichen Vegetationsbedeckung schlechter als von Sites mit einer niedrigeren durchschnittlichen Vegetationsbedeckung?

H03: Zwischen der durchschnittlichen Vegetationsbedeckung der Sites und der Qualität der dementsprechenden 3D-Punktwolken kann kein kausaler Zusammenhang festgestellt werden.

1.5 Struktur der Arbeit

Kapitel 2 widmet sich dem für diese Masterarbeit untersuchten Gebiet. Dabei wird das Obere Kaunertal zunächst in Hinblick auf seine geographische Lage und auf weitere grundlegende geographische Gegebenheiten beschrieben. Wichtige humangeographische Aspekte sollen hierbei nicht außer Acht gelassen werden, um den Leser*innen einen möglichst holistischen Eindruck über das Untersuchungsgebiet zu vermitteln. Anschließend wird genau auf die Geologie, die Geomorphologie sowie auf das Klima und die Vegetation des Oberen Kaunertals eingegangen, da es sich hierbei um Faktoren handelt, welche direkten oder indirekten Einfluss auf die Forschung im Untersuchungsgebiet haben. Kapitel 3 beschäftigt sich mit den Forschungsmethoden. Die Leser*innen sollen hier zuerst mit der theoretischen Funktionsweise von SfM-Photogrammetrie vertraut gemacht werden. Danach folgt eine genaue Beschreibung der Vorgehensweise bei der Datenerhebung und der Datenanalyse. Nach der Präsentation der Ergebnisse werden diese in Hinblick auf die dieser Masterarbeit zugrunde liegenden Forschungsfragen diskutiert, wobei auch die methodische Vorgehensweise kritisch betrachtet wird. Abschließend werden die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit in Form eines Resümees zusammengefasst.

2 Untersuchungsgebiet: Oberes Kaunertal

Abbildung 2 veranschaulicht die geographische Lage des Untersuchungsgebiets. Der markante Gepatschferner im Süden und die Gepatsch-Talsperre im Norden der Karte sind deutlich zu erkennen. Auf die in der Abbildung ebenfalls dargestellten Phusicos-Sites wird im Kapitel 3 dieser Arbeit eingegangen.

Study Area: Upper Kaunertal 2019

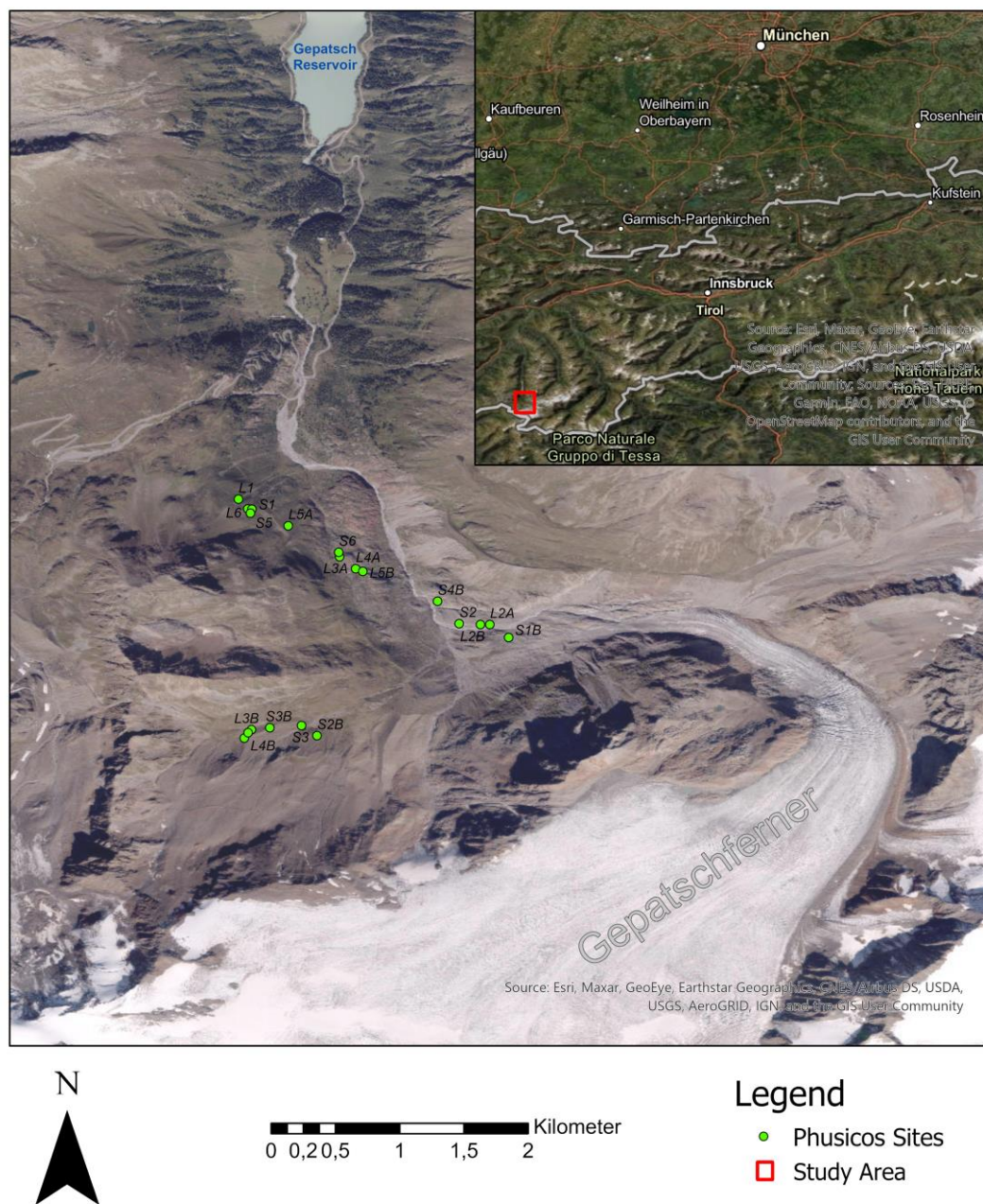


Abb. 2: Untersuchungsgebiet Oberes Kaunertal

2.1 Geographie

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Oberen Kaunertal, im österreichischen Bundesland Tirol. Das Kaunertal, ein langgestrecktes alpines Quertal mit Nord-Süd orientierter Achse (vgl. VEHLING 2016), befindet sich in den Ötztaler Alpen, welche einen Teil der österreichischen Zentralalpen darstellen. Das Tal wird vom Faggenbach entwässert, der in seinem Oberlauf durch die Gepatsch-Talsperre aufgestaut wird und bei Prutz, auf einer Höhe von 864 m a.s.l., in den Inn mündet (vgl. DUSIK et al. 2019, HECKMANN et al. 2016, MORCHE et al. 2012). Somit gehört das Untersuchungsgebiet auch zum Donaeinzugsgebiet (vgl. VEHLING 2016).

Das von der TIWAG (Tiroler Wasserkraft AG) zwischen 1961 und 1965 errichtete Hochdruck-Speicherkraftwerk, welches nach seiner Fertigstellung als das leistungsstärkste Wasserkraftwerk Österreichs galt, und der dazugehörige Jahresspeicher Gepatsch, prägen die Landschaft des hinteren Kaunertals (vgl. PIRCHER et al. 2013). Gegenwärtig gibt es Pläne für eine neue Oberstufe, einen Überleitungsstollen in den Speicher Gepatsch mit Wasserfassungen im Ötztal, einen Ausbau der Unterstufe mit neuem Triebwasserweg und ein zusätzliches Kraftwerk in Prutz (vgl. ZANON und PERGHER 2013). In den 1960er Jahren wurde neben dem Wasserkraftwerk auch die Kaunertaler Gletscherstraße bis auf 2.750 m Seehöhe ausgebaut, was den Betrieb des Gletscherskigebietes ermöglicht, welches heute als der wichtigste ökonomische Faktor des Tales gilt (vgl. VEHLING 2016).

Die Wasserscheide des Einzugsgebietes entspricht im Süden der Staatsgrenze zwischen Österreich und Italien (vgl. VEHLING 2016). Das gesamte hydrologische Einzugsgebiet weist eine Fläche von 62 km² auf (vgl. HILGER et al. 2019). Mehr als die Hälfte des Einzugsgebietes befindet sich oberhalb der Baumgrenze. Hier dominieren zerklüftetes Grundgestein sowie Lockergestein in Form von Schutthalden, Moränen und Blockgletschern das Landschaftsbild. (vgl. BAEWERT und MORCHE 2014, GROH und BLÖTJE 2019) Innerhalb der Wasserscheide befinden sich einige der höchsten Erhebungen in den Ötztaler Alpen, darunter die Hochvernagtspitze mit 3.535 m, die Weißseespitze mit 3.518 m, der Fluchtkogel mit 3.497 m, der Glocktum mit 3.353 m und die Hintere Ölgrubenspitze mit 3.295 m (vgl. MORCHE et al 2012). Mehr als 35 % des Einzugsgebiets sind durch den Weißseeferner und den Gepatschferner vergletschert (vgl. HECKMANN et al.

2016), wobei der Plateaugletscher Gepatschferner, welcher 2015 noch eine Fläche von 15,28 km² aufwies (vgl. STOCKER-WALDHUBER und KUHN 2019), den zweitgrößten Gletscher Österreichs darstellt (vgl. STOCKER-WALDHUBER et al. 2019, VEHLING et al. 2017) und durch eine durchschnittliche Rückschmelzrate an der Gletscherzunge von etwa 15 m pro Jahr gekennzeichnet ist (vgl. VEHLING 2016). Gemeinsam mit dem italienischen Teil des Gletschers ist der Gepatschferner sogar der größte Gletscher in den Ostalpen und seine Fließgeschwindigkeit ist mit Maximalwerten von mehr als 50 m pro Jahr immer noch sehr hoch (vgl. STOCKER-WALDHUBER 2017). Seit dem glazialen Maximum der Kleinen Eiszeit ist der Gepatschferner bereits um mehr als 2 km zurückgegangen (vgl. HECKMANN et al 2012, MORCHE et al. 2019).

2.2 Geologie

Lithologisch gesehen stellt das Obere Kaunertal einen Teil des Ötztal-Stubai-Komplexes dar, welcher wiederum dem Ostalpinen Kristallin zuzuordnen ist. Die im Ötztal-Stubai-Komplex vorherrschenden Gesteinsarten sind Paragneise, Orthogneise und Amphibolite (vgl. ZANON und PERGHER 2013, HECKMANN et al. 2016: 17, VEHLING 2016), wobei bei den Paragneisen zwischen metapsammischen und metapelitischen Schiefern und Gneisen unterschieden werden kann (vgl. ZANON und PERGHER 2013). Des Weiteren kommen vereinzelt auch Gesteinsarten wie Eklogite, Migmatite, Metakarbonate und Diabase vor (vgl. ZANON und PERGHER 2013). Bei den Metasedimenten im Oberen Kaunertal kann von einem proterozoischen Gesteinsalter ausgegangen werden, obwohl es keinen expliziten Nachweis dafür gibt (vgl. VEHLING 2016).

Der Ötztal-Stubai-Komplex ist durch eine polymetamorphe Entwicklung gekennzeichnet, wobei zumindest drei verschiedene Metamorphose-Ereignisse stattgefunden haben (vgl. HOINKES et al. 1997, MILLER und THÖNI 1995, ZANON und PERGHER 2013). Diese metamorphen Episoden sind auf die Kaledonische, die Variszische sowie auf die Alpidische Orogenese zurückzuführen (vgl. HECKMANN et al. 2016). Im Zeitraum der Kaledonischen und der Variszischen Orogenese kam es auch zum Eindringen von granitischen sowie basaltischen Schmelzen in die Metasedimente (vgl. PFIFFNER 2015, VEHLING 2016). Die granitischen Schmelzen wurden dann im Zuge der Kaledonischen Orogenese zu Orthogneisen

umgewandelt und die basaltischen Schmelzen zu Amphiboliten (vgl. HOINKES et al. 1997, VEHLING 2016).

Die Variszische Hauptschieferung der Gesteine im Untersuchungsgebiet streicht annähernd E-W, während in den Paragneisen aufgrund der zum Teil intensiven Verfaltung nicht immer eine einheitliche Hauptschieferungsrichtung zu erkennen ist (vgl. ZANON und PERGHER 2013). Im Zuge der Alpidischen Orogenese kam es zur Überschiebung von Ötztalkristallin-Gesteinseinheiten auf die Penninischen Decken, eine tektonische Belastung, die heute noch aktiv ist und in gegenwärtigen Hebungsraten von $> 1 \text{ mm/a}$ resultiert (vgl. PFIFFNER 2015, VEHLING 2016).

Während des letzteiszeitlichen Maximums waren das Obere Kaunertal sowie seine Nebentäler von Gletschern mit einer Mächtigkeit von mehreren hundert Metern bedeckt. In dieser Zeit wurde die Landschaft des Kaunertales intensiv umgestaltet. (vgl. HECKMANN et al. 2016)

2.3 Geomorphologie

Das Obere Kaunertal ist durch eine hauptsächlich glazial geformte Morphologie charakterisiert. Diese wurde durch postglaziale Erosions- und Akkumulationsprozesse überprägt. (vgl. ZANON und PERGHER 2013) Jedoch handelt es sich beim Untersuchungsgebiet um kein glaziales U-Tal im klassischen Sinne, denn ab dem Gepatschstausee verzweigt sich das Tal in mehrere Seitentäler, was auf einen einst mächtigen, verzweigten Plateaugletscher zurückzuführen ist. Dieser schuf das heutige Relief, indem er vom Alpenhauptkamm ausgehend in alle Himmelsrichtungen strömte. (vgl. VEHLING 2016)

Rundhöcker sowie durch Gletscherschliff geprägtes, anstehendes Festgestein, verdeutlichen die glaziale Prägung des Oberen Kaunertales (vgl. ZANON und PERGHER 2013). Auch Kare, Moränenwälle und glazial erodierte Felshänge sowie glazifluviale Schotterebenen und Blockgletscher, welche unter einigen Felshängen an die Schutthalden anschließen, gelten als Zeugen einer intensiven Vergletscherung des Untersuchungsgebietes (vgl. VEHLING 2016). Glazifluviale Ablagerungen können auch im Bereich des Gepatsch-Baches vorgefunden werden. Insgesamt lässt sich festhalten, dass im Untersuchungsgebiet sowohl glaziale, periglaziale und glazifluviale sowie gravitative Sedimente vorkommen.

Während z. B. Moränensedimente auf glaziale Aktivitäten hinweisen, deuten gravitative Sedimente wie Hangschuttablagerungen und Murschuttablagerungen auf gravitative Aktivitäten hin. (vgl. ZANON und PERGHER 2013)

Infolge des starken Gletscherrückgangs sowie des Abschmelzens von Spaltenfrost kommt es im oberen Kaunertal in den Sommermonaten verstärkt zu gravitativen Massenbewegungen, wie Felssturz- und Steinschlagaktivitäten, welche unter anderem im Bereich der Weißseespitze (vgl. KRAINER et al. 2007) oder an der „Schwarzen Wand“ (vgl. STOCKER-WALDHUBER und KUHN 2019) beobachtet werden können, wo sich 1.200.000 m³ Felsmaterial mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 1m/a bewegen (vgl. VEHLING 2019). In den letzten 50 Jahren haben sich im Kaunertal mehrere großflächige Felshangaktivitäten ereignet (vgl. VEHLING et al. 2017). Allein zwischen 2006 und 2012 konnten 108 Felsstürze mit einem Volumen von 100 m³ bis 30.000 m³ beobachtet werden. Da sich die Felsstürze im Oberen Kaunertal hauptsächlich auf einer Seehöhe von über 2.800 m a.s.l. ereignen, gilt der Rückgang des Permafrostes als wichtiger Auslöser für diese gravitativen Massenbewegungen. (vgl. VEHLING 2019)

Im Kaunertal, wo der Permafrostgürtel gegenwärtig ab einer Seehöhe von 2.600 m a.s.l. beginnt (vgl. DUSIK et al. 2019), befinden sich laut dem Blockgletscher-Inventar von WAGNER et al. (2020) 129 Blockgletscher, wobei davon 104 als intakt und die restlichen 25 als reliktsch klassifiziert wurden. Dabei machen die aktiven Blockgletscher eine Fläche von 6,96 km² aus, wohingegen die reliktschen Blockgletscher 1,29 km² in Anspruch nehmen. Somit sind 3,6 % des hydrologischen Einzugsgebietes mit Blockgletschern bedeckt. (vgl. GROH und BLÖTHE 2019, WAGNER et al. 2020) Neben den Blockgletschern findet man im Kaunertal auch kleinskalige periglaziale Formen, wie Steinpolygone, durch thermische Kontraktion entstandene Risse und Solifluktuationsloben bzw. Gelifluktuationsloben. (vgl. DUSIK et al. 2019).

Durch die hohe morphodynamische Aktivität im Kaunertal, welche durch den Rückgang des Gepatschferners hervorgerufen wird, werden auch die fluvialen Sedimenttransport-Dynamiken des Faggen-Baches stark vom Gletscherrückgang beeinflusst (vgl. MORCHE et al. 2019). Obwohl glaziale Prozesse einen wichtigen Faktor bezüglich des Sedimenttransportes darstellen, können diese Prozesse

nicht genau quantifiziert werden (vgl. HILGER et al 2019). Die Sedimentproduktion des Gepatschferners wird auf ca. 1.700 - 170.000 t/a⁻¹ geschätzt (vgl. HILGER et al 2019, STOCKER-WALDHUBER et al 2019).

2.4 Klima und Vegetation

Die Öztaler Alpen und somit auch das Kaunertal befinden sich in einer zentralalpinen Trockenregion (vgl. ABERMANN et al. 2009). Das Obere Kaunertal ist durch ein trockenes, hochalpines Klima charakterisiert (vgl. GROH und BLÖTHE 2019). Die mittlere jährliche Lufttemperatur beträgt auf 1.770 m a.s.l. 4,4 °C, auf 1.900 m a.s.l. bereits 2,7 °C, und sinkt auf 2.600 m a.s.l. auf -0,6 °C (vgl. DUSIK et al. 2019, HILGER et al. 2019). Der mittlere jährliche Niederschlag im Untersuchungsgebiet ist mit 1.073 mm/a, relativ gering (vgl. HECKMANN et al. 2016), wobei die Sommermonate in der Regel niederschlagsreicher sind als die Wintermonate (vgl. VEHLING 2016). Abhängig von der Seehöhe und der Exposition kann sich die Periode mit winterlicher Schneebedeckung von Oktober bis Juni erstrecken (vgl. GROH und BLÖTHE 2019). Stellenweise ist die Schneedecke im Oberen Kaunertal auch weit bis in die Sommermonate präsent.

Nadelwälder sind im Oberen Kaunertal bis zu einer Höhe von ca. 2.150 m vertreten (vgl. HECKMANN et al. 2016, HECKMANN et al. 2012, HILGER et al. 2019). Während Zirben und Strauchvegetation im Untersuchungsgebiet gegenwärtig bis maximal 2.300 m wachsen, befinden sich oberhalb dieser Zone alpine Matten und Rasen (vgl. VEHLING 2016). Abhängig vom Untergrund bzw. vom Substrat dominieren diese bis zu einer Höhe zwischen 2.600 - 2.800 m (vgl. HECKMANN et al. 2016). Ab einer Höhe von ca. 2.800 m - 3.000 m ist das Gebiet weitgehend vegetationslos (vgl. VEHLING 2016). Die in dieser Höhenstufe vorherrschenden Schuttkegel und Geröllhalden erlauben nur wenig Vegetation (vgl. HECKMANN et al. 2016). Gletschervorfelder, welche vor wenigen Jahrzehnten eisfrei wurden, sind teilweise schon mit Pionierpflanzen bewachsen (vgl. VEHLING 2016).

Da es sich bei der alpinen Waldgrenze um eine klima-sensitive Grenzzone handelt, führen mittel- bzw. langfristige Temperaturzunahmen zu einem Anstieg der Waldgrenze und zu einer Verdichtung des Bestandes im Grenzbereich (vgl. NICOLUSSI und PATZELT 2006). Dendrochronologische Untersuchungen der

Hochlagen-Zirbe (*Pinus cembra* L.), welche im Kaunertal den Waldgrenzbereich dominiert, zeigen ein Ansteigen ihrer Verbreitungsgrenze über die letzten 150 Jahre (vgl. NICOLUSSI 2009, NICOLUSSI und PATZELT 2006). Dabei passieren die Phasen des Anstieges der Verbreitungsgrenze und der Bestandsverdichtung synchron zu den Gletscherabschmelzphasen (vgl. NICOLUSSI und PATZELT 2006). Im Holozän schwankte die Baumgrenze im Oberen Kaunertal um mindestens 230 Höhenmeter. Die heutige potentielle Baumgrenzposition liegt jedoch bis dato unter den Höchstlagen des Holozäns. (vgl. NICOLUSSI 2009)

3 Methodik

3.1 Funktionsweise von SfM-Photogrammetrie

Structure from Motion, auch Structure-and-Motion genannt (vgl. CARRIVICK et al. 2016), oder genauer gesagt Structure from Motion-MultiView Stereo (SfM-MVS), stellt eine moderne Vermessungstechnik dar, welche digitale Photogrammetrieverfahren mit neueren Errungenschaften im Bereich Computer Vision verbindet (vgl. HENDRICKX et al. 2019). SfM-Daten sind, vereinfacht gesagt, eine Reihe von sich überlappenden Fotos, die zu einer 3D-Punktwolke weiterverarbeitet werden müssen (vgl. NOUWAKPO et al. 2016). Kamerapositionen und Ausrichtungen werden dabei aus differentiellen Positionen mehrerer übereinstimmender Features berechnet. Mithilfe der überlappenden Bilddaten wird danach ein grobes 3D-Punktwolkenmodell der fotografierten Oberfläche, Szene oder des fotografierten

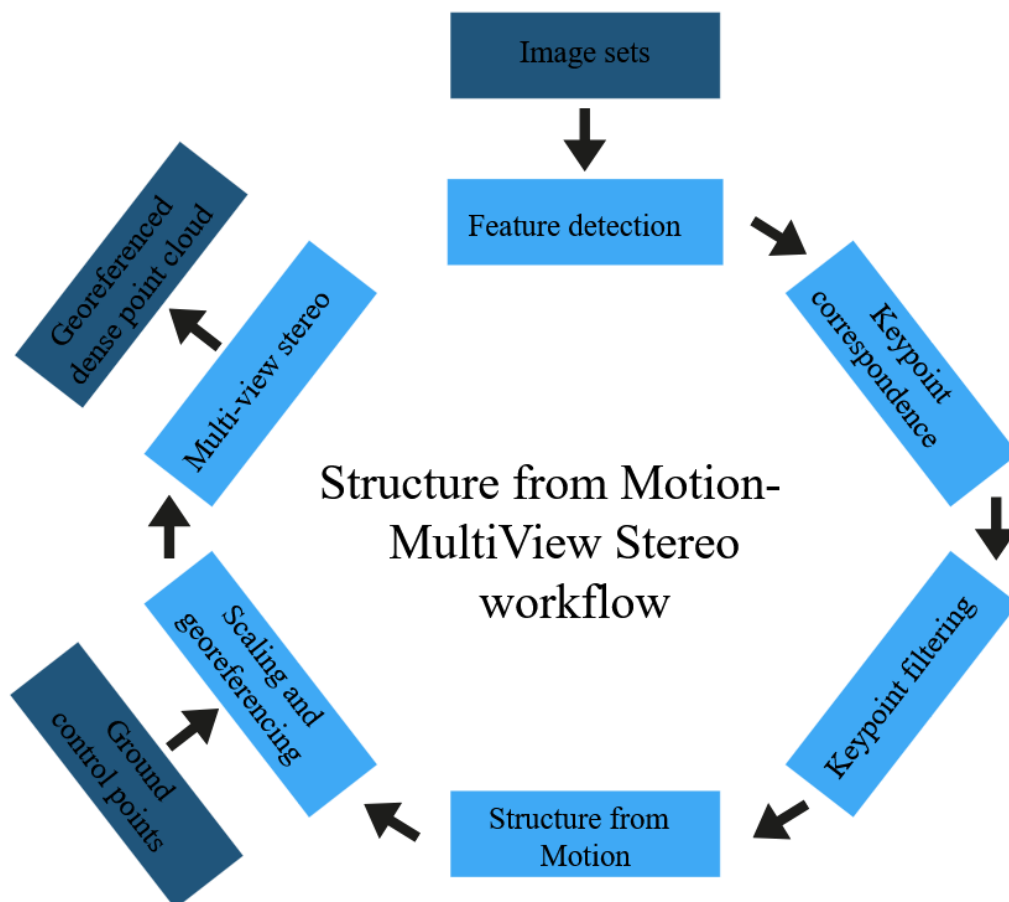


Abb. 3: SfM-MVS Workflow nach CARRIVICK et al. 2016

Objektes rekonstruiert. (vgl. BALAGUER-PUIG et al. 2017, CARRIVICK et al. 2016) Die Methode integriert sowohl Structure from Motion (SfM)-Algorithmen als auch MultiView-Stereo (MVS)-Algorithmen (vgl. JAMES und ROBSON 2012). Umgangssprachlich wird aber häufig die gesamte Methode als SfM bezeichnet. CARRIVIC et al. (2016) unterteilen den SfM-Prozess in die sechs Teilbereiche: Feature Detection, Keypoint Correspondence, Keypoint Filtering, Structure from Motion, Scaling and Georeferencing sowie MultiView Stereo.

3.1.1 Feature Detection

SfM basiert auf Algorithmen, welche zum Identifizieren von übereinstimmenden Features oder Points of Interest in einer Sammlung von überlappenden 2D-Digitalbildern dienen (vgl. BALAGUER-PUIG et al. 2017, BERBER et al 2021, CARRIVICK et al. 2016). Zur Identifikation dieser Keypoints stehen verschiedene Techniken zur Verfügung (vgl. CARRIVICK et al. 2016). In den meisten Fällen werden die Bilder aber mit dem automatischen Feature-Detection-and-Description Algorithmus SIFT verarbeitet, wobei SIFT für Scale Invariant Feature Transform steht (vgl. JAMES und ROBSON 2012, WESTOBY et al. 2012). Dabei enthält ein typisches Bild mehrere tausend SIFT-Keypoints (vgl. SNAVELY et al. 2008). Die genaue Funktionsweise des SIFT-Algorithmus kann bei LOWE (2004) nachgelesen werden.

3.1.2 Keypoint Correspondence

Nachdem die Keypoints in den einzelnen Bildern lokalisiert wurden, müssen nun Korrespondenzen zwischen diesen Keypoints bestimmt werden. Da zu diesem Zeitpunkt noch nicht sichergestellt werden kann, dass jeder Keypoint einen Partner in einem anderen Bild hat, wird ein Verfahren angewendet, welches Keypoints ohne gute Übereinstimmung verwirft. Dazu wird das Verhältnis der euklidischen Entfernung des nächsten Nachbarpunktes mit jenem des zweitnächsten Nachbarpunktes (vgl. LOWE 2004, SNAVELY et al. 2008) berechnet. Wenn ein gewisser Distanzwert überschritten wird, werden die betroffenen falschen Keypoint-Übereinstimmungen eliminiert (vgl. CARRIVIC et al. 2016). Für eine detaillierte mathematische Beschreibung dieses Verfahrens sei wieder auf LOWE (2004) sowie auf SNAVELY et al. (2008) verwiesen.

3.1.3 Keypoint Filtering

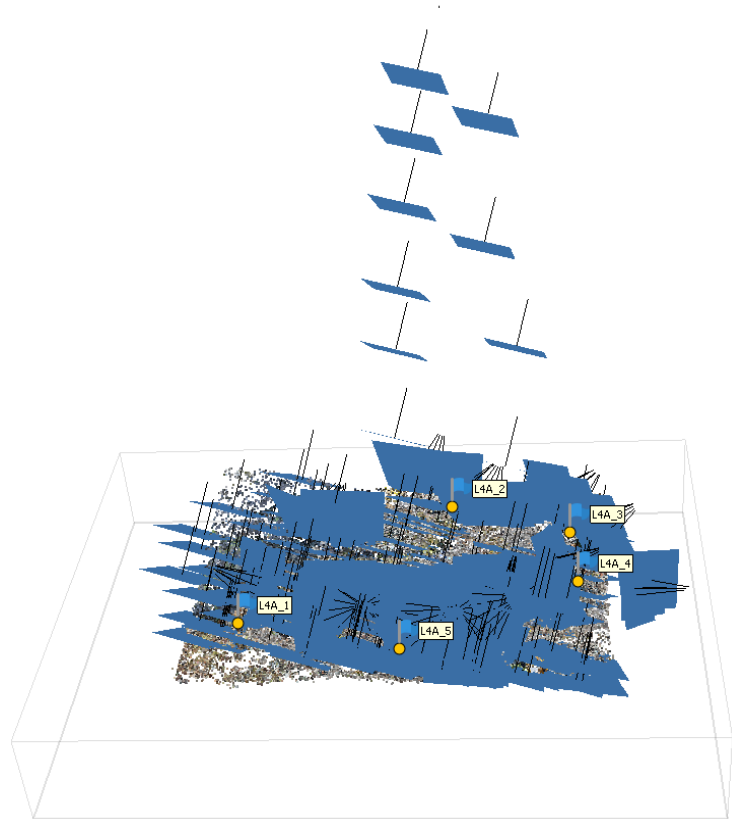
Das Keypoint Filtering ist wichtig, um sich darauf verlassen zu können, dass wirklich nur korrekte Korrespondenzen zwischen den Keypoints übrigbleiben. Dazu müssen die noch verbliebenen fehlerhaften Übereinstimmungen herausgefiltert werden. Dies geschieht, indem mit mehreren Keypoints, die in einem Bildpaar derselben Szene identifiziert wurden, die Fundamentalmatrix (F-Matrix) für das Bild-Paar berechnet wird. Die Fundamentalmatrix, welche die Lage von korrekt identifizierten Schlüsselpunkten in beiden Bildern beschränkt, kann mithilfe verschiedener Ansätze berechnet werden. (vgl. CARRIVIC et al. 2016) Während der von LONGUET-HIGGINS entwickelte Eight-Point-Algorithmus eine einfache und schnelle, jedoch ungenauere Methode darstellt, wird die Random Sample Consensus (RANSAC)-Methode von FISCHLER und BOLLES als schnell, genau und robust beschrieben (vgl. CARRIVIC et al. 2016, FISCHLER und BOLLES 1981, LONGUET-HIGGINS 1981).

3.1.4 Structure from Motion

Der Begriff Structure from Motion wurde 1979 von ULLMAN geprägt, wobei in diesem Kontext „Structure“ die 3D-Geometrie einer Szene und „Motion“ die verschiedenen Kamera-Positionen bezeichnet (vgl. CARRIVIC et al. 2016). Diese 3D-Geometrie einer Szene sowie die Kamerapositionen und Kameraausrichtung werden mithilfe der SfM-Technik gleichzeitig rekonstruiert. Dies passiert unter Verwendung der geometrisch korrekten Feature-Korrespondenzen, welche davor bereits identifiziert wurden. (vgl. CARRIVIC et al. 2016, NOUWAKPO et al. 2014)

Durch den Prozess des Bundle Adjustments (BA) können noch weitere Bilder hinzugefügt werden, um die Berechnung der Parameter zu optimieren (vgl. BALAGUER-PUIG et al 2017). Beim Bundle Adjustment bezieht sich „Bundle“ auf die Bündelung von Lichtstrahlen, welche die Kamerazentren mit 3D-Punkten verbinden, und „Adjustment“ auf die Minimierung des Reprojektionsfehlers (vgl. CARRIVIC et al. 2016). Das Ergebnis des SfM-Prozesses ist eine Punktwolke mit geringer Dichte (Sparse Point Cloud), welche die 3D-Koordinaten der markantesten Features innerhalb des Bilddaten-Sets repräsentiert. Diese Punktwolke besteht typischerweise nur aus einigen zehntausenden Punkten. (vgl.

JAMES und ROBSON 2012)
Für detaillierte Oberflächenrekonstruktionen höherer Qualität ist jedoch eine weitere Verarbeitung notwendig (vgl. CARRIVIC et al. 2016), denn die mit SfM berechneten Punktwolken sind nicht genau genug, um daraus hoch qualitative 3D-Modelle zu produzieren, so wie mit klassischen Techniken der Photogrammetrie (vgl. GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al. 2014). Zum besseren



Verständnis, ist in Abbildung 4 eine Sparse Point Cloud der Site L4A im Oktober 2019 dargestellt, welche mit der SfM-Software Agisoft Metashape erstellt wurde. Über der 3D-Punktwolke befinden sich blaue Rechtecke, welche die sich überlappenden Fotos sowie deren Kamerapositionen und Kameraausrichtung repräsentieren. Des Weiteren sind in der Abbildung, die für die Skalierung und Georeferenzierung notwendigen Kontrollpunkte visualisiert.

3.1.5 Scaling and georeferencing

Da SfM nur relative Kamerapositionen und Szenengeometrien bereitstellt, wird die Punktwolke in einem willkürlichen Koordinatensystem generiert (vgl. CARRIVIC et al. 2016). In einem weiteren Schritt kann nun eine 3D-Transformation auf die Punktwolke angewendet werden, um diese in einem lokalen Bezugssystem zu skalieren und zu referenzieren (vgl. BALAGUER-PUIG et al. 2017). Die Skalierung und Georeferenzierung von 3D-Modellen, welche mit SfM erstellt wurden, kann mithilfe der Identifizierung von bekannten Features in der Punktwolke durchgeführt werden (vgl. JAMES und ROBSON 2012). Hierbei wird ein Minimum von 3 Features bzw. Kontrollpunkten mit XYZ-Koordinaten benötigt (vgl.

BALAGUER-PUIG et al. 2017, CARRIVIC et al. 2016). In der Fernerkundung sowie in der Photogrammetrie werden diese Kontrollpunkte als Ground Control Points (GCP) bezeichnet. Alternativ kann man die Georeferenzierung und Skalierung auch von bekannten Kamerapositionen, die aus kinematischen Differential-GPS-Messungen (dGPS) in Echtzeit abgeleitet werden, durchführen (vgl. CARRIVIC et al. 2016).

3.1.6 Multi-View Stereo

Das sogenannte Multi-View Stereo (MVS)-Verfahren dient anschließend dazu, die Auflösung des groben 3D-Modells (Sparse Point Cloud), welches mit der SfM-Methode erstellt wurde, zu verfeinern (vgl. BALAGUER-PUIG et al. 2017, CARRIVIC et al. 2016), indem Daten mit hohem Rauschen effizient herausgefiltert werden und die Anzahl der rekonstruierten Punkte somit um zwei oder drei Größenordnungen erhöht wird. Das daraus resultierende Ergebnis ist ein detailliertes 3D-Modell, auch Dense Cloud genannt. Diese dichten Punktwolken sind in der Regel von ausreichender Qualität, um digitale Höhenmodelle (DEMs) zu generieren. (vgl. JAMES und ROBSON 2012) Für die Rekonstruktion von 3D-Modellen stehen verschiedene MVS-Rekonstruktions-Algorithmen zur Verfügung (vgl. SEITZ et al. 2006). Diese Algorithmen können in vier Klassen unterteilt werden. Dazu zählen voxel-basierte Methoden, oberflächenentwicklungsbasierte Methoden, Depth-Map-Merging

Methoden und Patch-basierte Methoden. (vgl. CARRIVIC et al. 2016, SEITZ et al. 2006) Für eine genaue Beschreibung der einzelnen Klassen von MVS-Rekonstruktions-Algorithmen sei auf SEITZ et al. (2006) verwiesen.

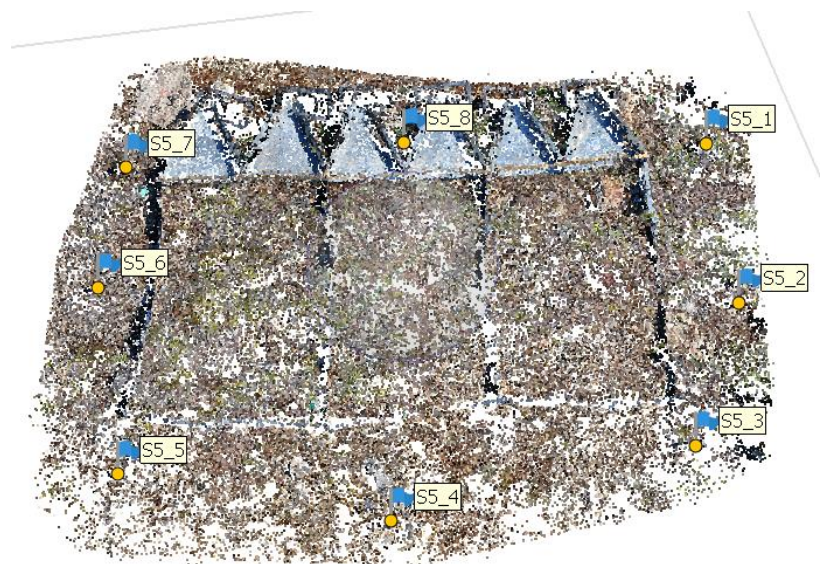


Abb. 5: Ddense Point Cloud der Site S5 im Oktober 2019

3.2 Anwendungsbereiche von SfM

Die Verwendung von SfM ist mittlerweile weit verbreitet. Dies kann unter anderem auf die hohe Flexibilität der Methode sowie auf die Ergebnisse mit hoher Qualität zurückgeführt werden. (vgl. BERBER et al. 2021) Ursprünglich wurden Computer Vision SfM-Algorithmen für die Gebäudearchitektur und die 3D-Darstellung von Objekten entwickelt (vgl. CLAPUYT et al. 2016). Heute sind die Anwendungsbereiche für Structure from Motion mannigfaltig. SfM-Photogrammetrie ist neben der Verwendung von 3D-Laserscannern die Haupttechnik bei der Erfassung der Geometrie von historischen Denkmälern in Form von 3D-Punktwolken (vgl. AL KHALIL 2020, ULVI 2021). Auch in der Forensik kann SfM bei der Wiederherstellung und Analyse von 3D-Fußabdrücken eingesetzt werden (vgl. LARSEN et al. 2021). In der Waldökologie dient SfM der Überwachung der Waldstruktur durch Einzelbaumbeobachtungen (vgl. ITAKURA und HOSOI 2020, TINKHAM und SWAYZE 2021). SfM kann aber ebenfalls eingesetzt werden, um die oberirdische Biomasse (AGB) von unbewaldeten Ökosystemen zu messen (vgl. CUNLIFFE et al. 2022).

Als „*One of those once-in-a-generation methodological leaps which transforms practice within a scientific discipline*“ (JAMES et al. 2019) bezeichnet, kann SfM in den Geowissenschaften, insbesondere der Geomorphologie, als ein erfolgreiches Werkzeug angesehen werden, um Landschaftsformen und Prozesse zu untersuchen (vgl. HENDRICKX et al. 2019). Unter anderem wurde SfM zu einer integralen Technik bei der Feststellung von Küstenveränderungen (vgl. JAMES und ROBSON 2012, LAPORTE-FAURET et al. 2019, OVER et al. 2021). Seit über einem Jahrzehnt findet SfM auch beim Monitoring von Rutschungen Verwendung (vgl. MAURI et al. 2021, NIETHAMMER et al. 2011, WARRICK et al. 2019), wobei wiederholte SfM-Untersuchungen besonders in Hinblick auf das Gefahrenpotential und die Entwicklung von Rotationsrutschungen wertvolle Informationen liefern können (vgl. WARRICK et al. 2019). Ferner wird SfM eingesetzt, um das Fließverhalten von basaltischer Lava nach Vulkaneruptionen zu analysieren (vgl. DE BENI et al. 2021, FAVALLI et al. 2018, JAMES et al. 2012). Auch für die Untersuchung von Gletscherdynamiken (vgl. BASH et al. 2018) sowie für die Schätzung von Schneetiefe (vgl. HARDER et al. 2016) kam die SfM-Methode bereits zum Einsatz. Während topographische Untersuchungen von Massenbewegungen oder fluvial geprägten Gebieten in der Geomorphologie traditionellerweise häufig mit Globalen Navi-

gations-Satellitensystemen (GNSS), Totalstationen, Terrestrischen Laserscannern (TLS) sowie Airborne-Laserscannern (ALS) ausgeführt werden und es sich dabei oft um teure und zeitaufwendige Methoden handelt (vgl. CLAPUYT et al. 2016, HACKNEY und CLAYTON 2015, WESTOBY et al. 2012), bietet sich hier SfM als eine kostengünstige Alternative zu laserbasierten Systemen an (vgl. GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al. 2014, KAISER et al. 2014, MORGAN et al. 2017, NOUWAKPO et al. 2016, WESTOBY et al. 2012). Unter bestimmten Umständen kann mit SfM sogar eine 3D-Punktgenauigkeit erreicht werden, welche sich mit jener von modernen TLS-Systemen vergleichen lässt (vgl. CARRIVIC et al. 2016, GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al. 2014).

Eine Identifizierung konvergenter Forschungsthemen der SfM-Photogrammetrie in den Geowissenschaften zeigte einen deutlichen Fokus auf Erosionsprozesse, insbesondere auf Bodenerosion (vgl. ELTNER et al. 2016). Bodenerosionsuntersuchungen mit SfM finden sowohl im Labor (vgl. BALAGUER-PUIG et al. 2017, MORGAN et al. 2017, NOUWAKPO et al. 2014 etc.), als auch direkt im Feld (vgl. ELTNER et al. 2018, GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al. 2014, KAISER et al. 2014, NOUWAKPO et al. 2016) statt. Dabei beschäftigen sich Feldstudien häufig mit der Untersuchung von Gully-Erosion (vgl. GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al. 2014, KAISER et al. 2014), weil Gullys oft unbewachsen sind, morphologisch komplexe Merkmale aufweisen, und daher für die Evaluierung der SfM-Methode prädestiniert sind (vgl. ELTNER et al. 2016).

3.3 Bodenerosionsmessung mit SfM

3.3.1 Vergleich von 3D-Punktwolken

Zeitliche geomorphologische Veränderungen wie Bodenerosion und Sedimentablagerung, können durch den Vergleich von topographischen Oberflächen verschiedener Zeitintervalle erfasst und quantifiziert werden (vgl. BALAGUER-PUIG et al. 2017). Es stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, um 3D-Punktwolken von natürlichen Oberflächen miteinander zu vergleichen. Bei der Cloud-to-mesh Distance bzw. Cloud-to-Model Distance Methode (C2M) wird die Oberflächenänderung anhand des Abstandes zwischen einer Punktwolke und

einem Referenz-3D-Mesh oder einem theoretischen Modell berechnet. Bei der Direct Cloud-to-Cloud Methode (C2C) wird für jeden Punkt der zweiten Punktwolke der am nächsten liegende Punkt in der ersten Punktwolke definiert und die Oberflächenänderung als Abstand zwischen den zwei Punkten geschätzt. (vgl. LAGUE et al. 2013, MEINEN und ROBINSON 2020) Bei der Model-to-Model Distance Methode (M3C2) werden die Distanzen zwischen zwei Punktwolken entlang von Oberflächennormalen berechnet. Hierbei muss vorher kein DEM oder Mesh erstellt werden. Des Weiteren ist der M3C2-Algorithmus als Open-Source-Software verfügbar. (vgl. LAGUE et al. 2013, NOUWAKPO et al. 2016) Bei einem konservativeren Ansatz werden sogenannte Digital Elevation Models of Difference (DoDs) analysiert. Bei der als Geomorphic Change Detection (GCD) bekannten Methode werden volumetrische Änderungen aus den Höhenunterschieden zweier zeitlich aufeinanderfolgender DEMs desselben Gebietes abgeschätzt. (vgl. BALAGUER-PUIG et al. 2017) Dazu wird ein DEM eines Anfangszeitpunktes (DEM1) von einem anderen DEM eines Endzeitpunktes (DEM2) subtrahiert. Das Ergebnis ist ein DEM, welches die Unterschiede zwischen den beiden Zeitscheiben (DoD) veranschaulicht. (vgl. GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al. 2014)

Für die Visualisierung und den Vergleich von 3D-Punktwolken stehen verschiedene Softwarepakete zur Verfügung. Unter anderem eignet sich dazu die Open-Source Software CloudCompare (vgl. LAGUE et al. 2013), wo der M3C2-Algorithmus direkt angewendet werden kann (vgl. COOK 2017), oder die kommerzielle Software Pix4D (vgl. ELTNER et al. 2018).

3.3.2 Vegetationsfilter

Bei bewachsenen Flächen muss vor dem Vergleich der Punktwolken die Vegetation entfernt werden, um schließlich Aussagen über Bodenerosion tätigen zu können. Beispielsweise verwendeten NOUWAKPO et al. (2016) dazu ein eigens programmiertes Java-Programm, um bewachsene Punkte aus den SfM-Produkten zu entfernen. Vegetation kann auch automatisch mit der Open-Source-Software CANUPO entfernt werden. Bei dieser Software handelt es sich um einen mehrskaligen Dimensionalitäts-Klassifikationsalgorithmus. (vgl. LAGUE et al. 2013) Die Methode klassifiziert 3D-Punktwolken und charakterisiert Features nach deren Geometrie. Da unterschiedliche Objekte unterschiedliche Geometrien aufweisen,

können natürliche 3D-Szenen in Kategorien wie Vegetation, Fels, Geröll oder Wasser klassifiziert werden. Die Software wird als effizient beschrieben, Vegetation vom Rest der Daten zu trennen. (vgl. BRODU und LAGUE 2012)

3.4 Erosionsplots im Untersuchungsgebiet

Im Untersuchungsgebiet waren zum Zeitpunkt der im Zuge dieser Masterarbeit durchgeführten Feldforschung 20 Sites mit einer Größe von 6 x 3 m entlang des Sukzessionsgradienten installiert. Jede dieser Sites enthält 3 Erosionsplots mit einer Größe von 2 x 3 m, was eine insgesamt Anzahl von 60 Plots ergibt. Alle Sites befinden sich auf einer Seehöhe von 2.000 bis 2.800 m und weisen eine Hangneigung von mindestens 29° bis maximal 37° auf. Des Weiteren sind die Erosionsplots durch unterschiedliche Vegetationsbedeckungen charakterisiert, welche von 0 % bis mehr als 75 % reichen. Die genaue geographische Lage aller im Untersuchungsgebiet installierten Sites ist in Abbildung 2 im 2. Kapitel dieser Arbeit, dargestellt.

Wie in Abbildung 2 ebenfalls zu erkennen ist, befinden sich im Untersuchungsgebiet sowohl Sites, die mit dem Buchstaben L und einer Nummer bezeichnet sind, als auch Sites, welche mit dem Buchstaben S und einer Nummer gekennzeichnet wurden. Dabei handelt es sich um zwei verschiedene Arten von Erosionsplots. Zum einen wurden Erosionsplots errichtet, die nur mit Holzpflocken abgesteckt sind und der SfM-Erosionsmessung dienen. Die betroffenen Sites, an denen sich diese Art von Erosionsplots befinden, sind mit „L“ bezeichnet. Zum anderen wurden Erosionsplots errichtet, welche an den Außenrändern mit Metallplatten abgegrenzt sind und an denen Erosionsprozesse neben der SfM-Methode mithilfe von Erosionswannen mechanisch gemessen werden. Dabei sorgt ein Metalltrichter dafür, dass der Oberflächenabfluss und das Sediment in zwei 60 Liter große Polyvinylchlorid (PVC)-Behälter transportiert werden (vgl. HASSELBERGER et al. 2021). Die Sites, an denen sich Erosionsplots mit Erosionswannen befinden sind mit „S“ bezeichnet. Abbildung 6 veranschaulicht stellvertretend für die beiden im Untersuchungsgebiet Oberes Kaunertal installierten Arten von Erosionsplots, Luftaufnahmen der beiden Sites L3A (Foto Nr. 1 in Abbildung 6) und S1 (Foto Nr. 2 in Abbildung 6). Foto Nr. 3 in Abbildung 6 zeigt einen der Holzpflocke, mit denen die SfM-Erosionsplots der Site L3A

abgegrenzt wurden. Diese Holzpflocke sind im Foto Nr. 1 der Abbildung nur schwer zu erkennen und deshalb mit grünen Ringen markiert.



Abb. 6: 1.: Site L3A, 2.: Site S1, 3.: Begrenzungs-Holzpflock und Mobiler GCP, 4.: Bedrock-GCP

An jeder Site wurden zwischen fünf und acht Ground Control Points (GCPs) installiert. Dabei wurden zwei verschiedene Arten von GCPs verwendet. Hauptsächlich handelt es sich bei den im Untersuchungsgebiet installierten GCPs um kreisförmige Kontrollpunkte. Die gut reflektierende und somit auf den Luftaufnahmen auch gut erkennbare, schwarz-weiße Oberfläche dieser Ground Control Points befindet sich auf einem Zylinder, an dessen Unterseite eine Metallstange befestigt ist. Rund um alle Sites wurden Bodenanker in den Untergrund getrieben. Die Metallstangen der mobilen GCPs werden bei Bedarf einfach in die Bodenanker eingeführt. Zur besseren Orientierung bei der Datenanalyse wurden die kreisförmigen GCPs außerdem mit Ziffern von 0 bis 8

versehen und vor der Datenerhebung im Feld jeweils in der gleichen Reihenfolge um die Sites herum platziert. Einer dieser kreisförmigen GCPs ist im Foto 3 der Abbildung 6 unter dem Holzpflöck dargestellt. Die nur schwer erkennbaren GCPs der Luftaufnahmen von Site L3A (Foto 1) und Site S1 (Foto 2) sind in Abbildung 6 mit roten Ringen markiert. Des Weiteren wurden seltener (maximal einmal pro Site) mit Haftklebeband auf dem Festgestein angebrachte Kontrollpunkte verwendet. Obwohl diese Art von GCP nicht so genau wie die kreisförmige Variante ist, weil deren Mittelpunkt bei der Datenanalyse schwerer ausgemacht werden kann, dienen die geklebten Kontrollpunkte ebenfalls dazu, die Genauigkeit, der im Zuge der Datenanalyse generierten Modelle, zu verbessern. Ein am Festgestein geklebter GCP ist exemplarisch im Foto Nr. 4 der Abbildung 6 zu sehen.

3.5 Datenerhebung

3.5.1 Tachymetrie

Neben der Verteilung der GCPs im Feld stellt auch deren Registrierung mit einer Totalstation oder einem Differentiellen GPS (dGPS) einen zeitaufwändigen Teil von UAV-Vermessungen dar (vgl. KAISER et al. 2014). Obwohl viele UAV-Systeme mit einem eigenen dGPS ausgestattet sind, kann mit Totalstationen häufig eine genauere Georeferenzierung erzielt werden (vgl. KINGSLAND 2020). Um die GCPs der jeweiligen Sites in einem lokalen Koordinatensystem verorten zu können, wurden diese dementsprechend mit einem Tachymeter vermessen. Dazu wurde eine Totalstation vom Typ Leica 1201+ verwendet. Dieser Tachymeter weist eine Reichweite von mehr als einem Kilometer sowie eine Genauigkeit von ± 2 mm auf (vgl. UNIVERSITÄT WIEN



Abb. 7: Tachymetrie im Untersuchungsgebiet (LIEDL 2019)

2021). Für die Vermessung wurde der Tachymeter neben der jeweiligen Site installiert. Während eine Person die Totalstation bediente, wurde von einer zweiten Person das Prisma genau über dem Mittelpunkt des jeweiligen GCPs positioniert. Dabei wurde die Erfassung der einzelnen GCPs durch die Automatische Zielerfassung (ATR), welche den Reflektor verfolgt, erleichtert (vgl. UNIVERSITÄT WIEN 2021).

3.5.2 Fernerkundung und terrestrische Datenerfassung

Unter Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), auch als Drohnen, Remotely Piloted Vehicles (RPVs) oder Unoccupied aerial Systems (UASs) bezeichnet, versteht man pilotenlose Fluggeräte, welche entweder ferngesteuert geführt oder auf Basis einer vorprogrammierten Software autonom navigiert werden. Bei UAVs kann zwischen militärischen und zivilen Systemen unterschieden werden, (vgl. RONCONI et al. 2014) wobei sich der Einsatz von UAVs signifikant von verteidigungsorientierten Anwendungen zu Industrie- und Umwelthanwendungen hin gewandelt hat (vgl. VILLANUEVA und BLANCO 2019). UAS-Photogrammetrie ist ein Messwerkzeug der Geodäsie und kombiniert Techniken der traditionellen Photogrammetrie mit SfM (vgl. BERBER et al. 2021). Diese Kombination der Bildaufnahme mit UAVs und auf SfM basierender Topographierekonstruktion hat sich in den letzten 10 Jahren weit verbreitet und wurde bereits erfolgreich auf ein breites Spektrum von Landschaftsformen und Landschaften angewandt (vgl. BERGER et al. 2021, CLAPUYT et al. 2016). Die Methode wurde somit zu einem mächtigen neuen Werkzeug für die hochauflösende topographische Modellierung (vgl. COOK 2017).

Für die Befliegungen, welche im Zuge der Feldarbeit für diese Masterarbeit durchgeführt wurden, kam eine Drohne vom Typ DJI Spark zum Einsatz. Dieses UAV-System hat laut Herstellerangaben ein Startgewicht von nur 300 g und eine maximale Flugzeit von 16 Minuten. Der ISO-Bereich der Kamera beträgt 100 - 1600 und die maximale Bildgröße 3968 x 2976. Die technischen Daten zur DJI Spark können unter <https://www.dji.com/at/spark> aufgerufen werden. Die Sites im Untersuchungsgebiet wurden zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten mit der soeben beschriebenen Drohne befliegen. Dabei fand die erste Befliegung im Juni 2019, die zweite Befliegung im Oktober 2019 statt, um den kurzen Sommer im

Oberes Kaunertal bestmöglich temporär abzudecken. Die Schneebedeckung einiger Sites im Zuge der Feldarbeit für diese Masterarbeit führte dazu, dass nur sieben der insgesamt 20 Sites zweimal befliegen werden konnten, davon zwei „S“-Sites und fünf „L“-Sites. Abbildung 8 veranschaulicht die geographische Lage dieser Sites.

Investigated Phusicos Sites, Kaunertal 2019

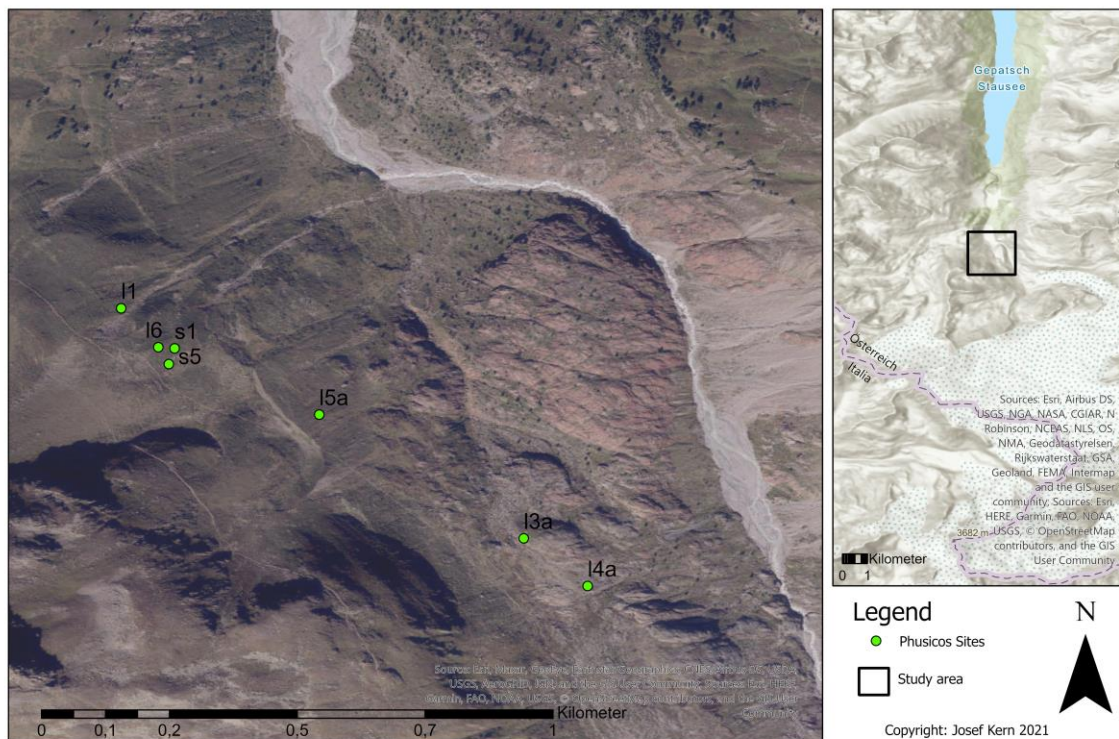


Abb. 8: Jeweils im Juni und Oktober 2019 beflogene Sites

Die Drohne wurde manuell gesteuert und die Sites wurden in Form von einem Grid befliegen, um die für die SfM-Methode notwendigen Überlappungsbereiche zwischen den einzelnen Aufnahmen, welche im Abstand von zwei Sekunden erfolgten, zu gewährleisten (vgl. LIEDL 2019). Um die Erosionsplots möglichst genau zu erfassen, wurde eine sehr niedrige Flughöhe von ca. 1 - 2 m über dem Grund gewählt, wobei im Juni noch eher auf 2 m Höhe geflogen wurde und die Flughöhe im Oktober weiter Richtung 1 m über dem Grund reduziert wurde. Aufgrund von teilweise starkem Wind und thermischen Turbulenzen im Untersuchungsgebiet konnte die gewünschte Flughöhe aus Sicherheitsgründen nicht immer genau eingehalten werden. Es wurde aber jedenfalls versucht, die Drohne stabil im Tiefflug zu halten und die Sites aus einer geringen Entfernung

von maximal 3 m über dem Grund zu erfassen. Die Flughöhe betrug somit 1 m bis maximal 3 m. Bei jeder Befliegung wurden nicht nur Nadir-Luftbilder, sondern auch Oblique-Luftbilder mit einem Kamerawinkel von 45° aufgenommen. Oblique-Bildflüge können dazu beitragen, Kantendetails des Objektes besser zu erkennen (vgl. ULVI 2021). Somit können durch die zusätzliche Einbindung von Oblique-Bildern in das Bilddaten-Set systematische Fehler deutlich reduziert (vgl. JAMES und ROBSON 2014) und schließlich bessere 3D-Modelle generiert werden (vgl. ULVI 2021). Abschließend wurde die Drohne bei jeder Befliegung in eine Höhe von ca. 10 m über dem Grund gebracht, um auch Aufnahmen von den gesamten Sites zu erhalten. Diese Aufnahmen erleichtern das halbautomatische Setzen von Markern bei der Datenauswertung, wenn auf anderen Fotos nicht genau erkannt werden kann, um welchen GCP es sich handelt.

Neben den Luftaufnahmen, welche mithilfe der UAV-Befliegungen generiert wurden, sind bei beiden Feldkampagnen auch terrestrische Fotos der Erosions-plots mit einer Spiegelreflexkamera vom Typ Nikon D 7500 aufgenommen worden. Dazu wurde jede Site einmal zu Fuß umrundet, um sie dabei aus verschiedenen Winkeln und Perspektiven aufzunehmen. Pro Site und Feldkampagne entstanden dabei durchschnittlich 209 Luftbilder (nadir und oblique) sowie durchschnittlich 110 terrestrische Aufnahmen. Die terrestrischen Fotos sollen dazu dienen, die Qualität des Bilddatensets zu verbessern. Während UAV-Aufnahmen aus geringer Flughöhe besonders für die Abdeckung größerer Untersuchungsstandorte sinnvoll sind, eignen sich terrestrische Aufnahmen in der Regel besser für kleinskalige Standorte mit steilen Hängen. Die Kombination von Fotos, welche mithilfe verschiedener Plattformen aufgenommen wurden, kann sich als optimal erweisen, weil somit unterschiedliche Detaillierungsgrade in verschiedenen Bereichen der Szene bereitgestellt werden. (vgl. WESTOBY et al. 2012)

3.6 Datenanalyse

3.6.1 Berechnung der 3D-Punktwolken

Heute stehen dem Anwender verschiedene photogrammetrische Softwarepakete, welche SfM- und MVS-Ansätze für Rekonstruktionen aus Fotografien ver-

wenden, zur Verfügung. Dazu zählen sowohl Programme, die eine Software-Lizenz verlangen, als auch Open-Source-Produkte. (vgl. James und Robson 2012, KINGSLAND 2020, MORGAN et al. 2017) Für die SfM-Datenanalyse im Zuge dieser Masterarbeit wurde die kommerzielle Software Agisoft Metashape (Version 1.7.3) verwendet. Metashape ist die Weiterentwicklung der Photogrammetrie-Software PhotoScan und wurde von Agisoft LLC mit Firmensitz in St. Petersburg, Russland entwickelt. Die 3D-Modellierungssoftware basiert auf der SfM-Technik und unterstützt neben der standardmäßigen Bearbeitung von digitalen Fotos seit 2020 auch die Bearbeitung von Satellitenbildern (vgl. HAN et al. 2020, LASTILLA et al. 2021). Metashape ist die am häufigsten eingesetzte SfM-Software (vgl. ELTNER et al. 2016), was vermutlich an folgenden Gründen liegt: Das Werkzeugset in Metashape wird, verglichen mit vielen anderen Punktwolkenklassifizierungsalgorithmen, als benutzerfreundlich beschrieben, setzt kein hohes Maß an Expertise in Bezug auf Photogrammetrie voraus, und erfordert keine zusätzliche Software (vgl. HOWLAND et al. 2022, LAPORTE-FAURET et al. 2019). Ferner ermöglicht Metashape die automatische Erstellung von fotorealistischen 3D-Modellen, welche eine geringe Standardabweichung von den Kontrollpunkten sowie von lasergescannten Daten aufweisen (vgl. KINGSLAND 2020, LI 2016). Die Konstruktion der 3D-Umgebung auf Grundlage von 2D-Bildern basiert bei Metashape sowohl auf den Prinzipien von SfM als auch auf jenen von Multi-View Stereo (MVS). In der Geomorphologie wird Metashape eingesetzt, um Digitale Höhenmodelle (DSMs) zu erzeugen. (vgl. HENDRICKX et al. 2019)

Der SfM-Prozess von Metashape kann in zwei Hauptkomponenten unterteilt werden: Dazu gehört zum einen das Ausrichten der Bilder (Alignment), welches durch das Berechnen der Kameraposition sowie der Orientierung passiert. Dies geschieht, indem Key Points erkannt und über die Bilder hinweg gematcht werden. Zum anderen werden in Metashape Punktwolken (Dense Point Clouds) generiert. Dazu werden aus dem Stereo-Matching berechnete Depth Maps verwendet. (vgl. TINKHAM und SWAYZE 2021) Der Genauigkeitsgrad des Alignments und die Qualität der Dense Cloud können in Metashape vom Anwender ausgewählt werden (vgl. MORGAN et al. 2017).

Gute Ergebnisse mit Metashape zu erzielen, erfordert einen iterativen Prozess der Datenbearbeitung, indem Fotos ausgerichtet (Alignment), GCPs markiert bzw.

Marker gesetzt, das Foto-Alignment überprüft, zusätzliche Marker gesetzt und die Fotos neu ausgerichtet werden müssen (vgl. COOK 2017). Mittlerweile stehen verschiedene Metashape-Workflows für unterschiedlichste Anwendungsbereiche zur Verfügung. Für diese Arbeit orientierte sich der Autor an jenem Workflow, welcher von David LIEDL (2019) im Zuge seiner Masterarbeit entwickelt wurde. Diese Abschlussarbeit beschäftigt sich ebenfalls mit der Messung von Boden-erosion mithilfe von SfM und entstand auch im Zuge des Phusicos-Forschungsprojektes. Dementsprechend können die genauen Metashape-Arbeitsschritte in der Masterarbeit von LIEDL (2019) nachgelesen werden, weshalb in der vorliegenden Masterarbeit auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte verzichtet wird. Grundsätzlich wurden die Einstellungen in Metashape aber meistens im Default-Modus belassen und die Berechnungen wurden mit der höchsten Genauigkeitsstufe durchgeführt (vgl. LIEDL 2019).

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist jedoch nicht die Berechnung von Dense Point Clouds sowie DSMs bzw. DoDs. Vielmehr liegt der Fokus der Arbeit in der Analyse der Modellgenauigkeit, um Aussagen über die Qualität der generierten Punktwolken für die untersuchten Standorte (Sites) zu treffen, und somit die der Masterarbeit zugrunde liegenden Forschungsfragen beantworten zu können.

3.6.2 Statistische Analyse der Modellgenauigkeit

Die Qualität von photogrammetrischen Ergebnissen darf nicht durch eine einfache Angabe des bei der Kontrollpunktmessung beobachteten Fehlers evaluiert werden. Stattdessen muss jede Bewertung der Datenqualität den Vergleich mit unabhängigen Check Point-Koordinaten oder Oberflächen- bzw. Längenmessungen beinhalten. Die Anforderung für unabhängige Kontrollmessungen erfordern die Bereitstellung separater Datensets für die Kontrollpunkt-Daten sowie für die Check Point-Daten. (vgl. JAMES et al. 2019) Häufig wird jedoch dieser notwendige Teil des Datenerhebungsprozesses, in dem Kontrollpunkte, welche nicht im Skalierungs- und Registrierungsprozess der Punktwolke verwendet werden, um die Genauigkeit der Punktwolke unabhängig zu bewerten, vernachlässigt (vgl. CARRIVIC et al 2016).

Um den räumlichen Fehler (Registrierungsfehler) der Modelle zu berechnen, wurde eine Kreuzvalidierung der Kontrollpunkte durchgeführt. Dabei werden alle GCPs einer Site nicht nur für die Berechnung der Geometrie, sondern auch als Check Points genutzt. Dies geschieht, indem die Geometrie einer Site mit einem GCP weniger berechnet wird, dieser stattdessen als Check-Point dient, und seine Koordinaten mit dem Ergebnis der Berechnung verglichen werden. Anschließend werden auch die anderen GCPs der Reihe nach als Check-Points genutzt und das Verfahren so oft wiederholt, bis die Geometrie eines Modells mit allen GCPs berechnet wurde. (vgl. LIEDL 2019) Für die genauen Arbeitsschritte bei der Kreuzvalidierung in Agisoft Metashape sei wieder auf LIEDL 2019 verwiesen.

Der räumliche Fehler des Modells und somit auch die Modellgenauigkeit kann mit der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler oder Root Mean Square Error (RMSE) angegeben werden. Beim RMSE handelt es sich um eine in den Geowissenschaften häufig verwendete Fehlermetrik, welche zum Vergleich von Modellvorhersagen mit unabhängigen Beobachtungen eingesetzt wird (vgl. CARRIVIC et al 2016). Der RMSE findet regelmäßig in Modellevaluationsstudien Verwendung und wird als statistisches Standardmaß benutzt, um beispielsweise Modelleleistungen in Meteorologie-, Luftqualitäts- und Klimaforschungsstudien zu messen (vgl. CHAI und DRAXLER 2014, CORT und MATSUURA 2005). Der RMSE findet bei der überwiegenden Mehrheit von SfM-MVS-Studien zur Validierung der Ergebnisse Verwendung. Er repräsentiert nicht nur die Fehlergröße, sondern integriert auch die Verteilung der Fehlergrößen sowie die Quadratwurzel der Anzahl der Fehler in die Berechnung (vgl. CARRIVIC et al 2016). Bei der Modellierung mit SfM kann der RMSE eingesetzt werden, um die Genauigkeit einer Punktwolke bzw. eines DSM festzustellen (vgl. HENDRICKX et al. 2019).

4 Ergebnisse

Tabelle 1 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Kreuzvalidierung der Kontrollpunkte für die Site S1 im Oktober 2019 mit einem Gesamt-RMSE der Site S1 von 0,0132 m. Wie in der Tabelle 1 zu sehen ist, ergibt sich der Gesamt-RMSE der einzelnen Control Points aus dem räumlichen Fehler der X-, Y-, und Z-Koordinaten und das RMSE-Ergebnis für die gesamte Site aus dem Gesamt-RMSE der einzelnen Control Points. Wie in der Spalte Accuracy zu erkennen ist, wurde bei der Modellierung mit Metashape bei den kreisförmigen GCPs von einer Genauigkeit von 0,005 m und bei den geklebten Bedrock-GCPs von einer Genauigkeit von 0,05 m ausgegangen. (vgl. LIEDL 2019)

Tab. 1: RMSE der Kontrollpunkte für die Site S1 im Oktober 2019

Site: S1 - October 2019 (UAV + Terrestrial)						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S1_1	Control point	-0,009225	-0,011845	-0,004007	0,005	0,015539
S1_2	Control point	0,019065	0,005983	0,005801	0,005	0,020807
S1_3	Control point	-0,005371	0,003225	-0,008282	0,005	0,010385
S1_4	Control point	-0,010517	0,008108	0,001765	0,005	0,013396
S1_5	Control point	-0,002143	-0,011184	-0,002543	0,005	0,011668
S1_6	Control point	0,008192	-0,000178	0,002699	0,005	0,008627
S1_7	Control point	0,000005	0,006017	0,004601	0,005	0,007575
S1_BR1	Control point	-0,00063	-0,012528	-0,003482	0,05	0,013018
Total	Control points	0,009084	0,008445	0,004589		0,013224

Neben der mittleren quadratischen Abweichung der Control Points für S1 ist auch die RMSE-Berechnung der Check Points beispielhaft für die Site S1 im Oktober 2019, in Tabelle 2 dargestellt. Der RMSE der Check Points von S1 ist mit 0,0222 m um 0,009 m höher als der RMSE der Control Points.

Die gesamten Tabellen mit allen Ergebnissen und Teilergebnissen der statistischen Qualitätsanalyse zur Modellgenauigkeit, also die Ergebnisse der RMSE-Berechnung für die Check Points und Control Points aller Sites, für die beiden Zeitscheiben Juni 2019 und Oktober 2019 sowie der RMSE der einzelnen Control Points und Check Points und deren X-, Y-, und Z-Koordinaten sind dem Anhang dieser Arbeit zu entnehmen.

Tab. 2: RMSE der Check Points für die Site S1 im Oktober 2019

Site: S1 - October 2019 (UAV + Terrestrial)						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S1_1	Check point	-0,014669	-0,020535	-0,011402	0,005	0,027692
S1_2	Check point	0,030723	0,012522	0,014764	0,005	0,036314
S1_3	Check point	-0,008929	0,00317	-0,018614	0,005	0,020887
S1_4	Check point	-0,018147	0,015347	0,010357	0,005	0,025925
S1_5	Check point	-0,002966	-0,015874	-0,005047	0,005	0,016919
S1_6	Check point	0,01115	0,00009	0,003956	0,005	0,011831
S1_7	Check point	0,000431	0,009874	0,008757	0,005	0,013205
S1_BR1	Check point	-0,000634	-0,012574	-0,003504	0,05	0,013068
Total	Check points	0,014585	0,012902	0,010792		0,022263

In Tabelle 3 ist der RMSE der Control Points für die 3D-Punktwolken der untersuchten Sites in den beiden Zeitscheiben Juni 2019 und Oktober 2019 dargestellt. Dabei wird für beide Zeitscheiben zwischen einer Berechnung der 3D-Punktwolken mit den UAV-Bilddaten und den terrestrischen Bilddaten sowie einer Berechnung der 3D-Punktwolken nur mit den Remote-Bilddaten, welche mit einem UAV-System aufgenommen wurden, unterschieden. Des Weiteren sind in der Tabelle die durchschnittlichen Vegetationsbedeckungen der einzelnen Sites visualisiert.

Erwartungsgemäß sind alle jeweiligen Werte der RMSE-Berechnung für die Control Points niedriger als das dementsprechende Pendant für die Check Points (Tabelle 4). Bei den Ergebnissen der Zeitscheibe Juni 2019 gibt es für den Datensatz mit UAV-Aufnahmen und terrestrischen Fotos für die Sites L5A, S5 und L6 keine Ergebnisse und bei dem Datensatz mit UAV-Fotos für die Site L6 kein Ergebnis. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei L5A die terrestrischen Fotos in Metashape nicht aligned werden konnten, bei L6 die UAV-Fotos nicht aligned

Tab. 3: RMSE der Kontrollpunkte für die untersuchten Sites im Juni und Oktober 2019

RMSE of Control points [m]					
Site	June 2019		October 2019		Ø Vegetation cover [%]
	UAV + Terrestrial-Photos	UAV-Photos	UAV + Terrestrial-Photos	UAV-Photos	
S1	0,1417	0,0320	0,0132	0,0135	2
L1	0,0094	0,0129	0,0296	0,0219	42
L3A	0,7690	0,0177	0,0098	0,0121	5
L4A	1,6478	1,6737	0,0118	0,0148	17
L5A	n.a.	0,0478	0,0205	0,0220	34
S5	n.a.	0,0205	0,0162	0,0323	34
L6	n.a.	n.a.	0,0610	0,0495	82

werden konnten und die 3D-Punktwolke daher nur mit terrestrischen Aufnahmen berechnet wurde. Hingegen sind für S5 keine terrestrischen Aufnahmen vorhanden. Wie in Abbildung 11 ersichtlich, wurden auch für diese Sites 3D-Punktwolken und deren RMSE mit den vorhandenen Datensätzen berechnet.

Tabelle 4 zeigt die entsprechenden Check Point-Fehlerwerte der modellierten Sites zu den beiden Untersuchungszeitpunkten Juni 2019 und Oktober 2019. Der kleinste RMSE aller Sites ist der Oktoberwert von L3A mit 0,0137 m (UAV-Datensatz und terrestrischer Datensatz) und 0,0161 m (UAV-Datensatz). Der geringste RMSE der Juni-Zeitscheibe beträgt 0,0208 m und wurde bei der Site L1 (UAV-Datensatz und terrestrischer Datensatz) berechnet. Der höchste RMSE ist jener der Site L4A im Juni, mit 2,7929 m (UAV-Datensatz) und 2,7735 m (UAV-Datensatz und terrestrischer Datensatz). Der höchste RMSE im Oktober wurde für die Site L6 berechnet und beträgt 0,1121 m (UAV-Datensatz) sowie 0,1049 m (UAV-Datensatz und terrestrischer Datensatz). Der durchschnittliche RMSE beträgt für den Datensatz mit UAV-Aufnahmen und terrestrischen Aufnahmen im Juni 1,0270 m, im Oktober 0,0415 m. Beim UAV-Datensatz beträgt der durchschnittliche RMSE im Juni 0,5181 m und im Oktober 0,0462 m.

Tab. 4: RMSE der Check Points für die untersuchten Sites im Juni und Oktober 2019

RMSE of Check points [m]					
Site	June 2019		October 2019		Ø Vegetation cover [%]
	<i>UAV + Terrestrial-Photos</i>	<i>UAV-Photos</i>	<i>UAV + Terrestrial-Photos</i>	<i>UAV-Photos</i>	
S1	0,3414	0,0511	0,0223	0,0232	2
L1	0,0208	0,0295	0,0430	0,0376	42
L3A	0,9721	0,0258	0,0137	0,0161	5
L4A	2,7735	2,7929	0,0190	0,0313	17
L5A	n.a.	0,0923	0,0444	0,0461	34
S5	n.a.	0,1167	0,0433	0,0572	34
L6	n.a.	n.a.	0,1049	0,1121	82

Vergleicht man die beiden Zeitscheiben Juni 2019 und Oktober 2019 miteinander, fällt auf, dass für Oktober qualitativ hochwertigere Ergebnisse produziert wurden. Der RMSE ist beim Datensatz inklusive terrestrischer Fotos bei drei von vier Sites kleiner und beim UAV-Datensatz bei fünf von sechs Sites kleiner als im Juni. Noch deutlicher wird die bessere Qualität der 3D-Punktwolken für Oktober, wenn man alle verfügbaren Datensätze, also auch jene, wo entweder nur terrestrische oder

nur UAV-Daten zur Verfügung stehen, für die Berechnung verwendet und somit auch im Juni für alle Sites Ergebnisse hat, wie in Abbildung 11 dargestellt. Hier ist der RMSE im Juni nur bei einer Site (L1) niedriger als im Oktober.

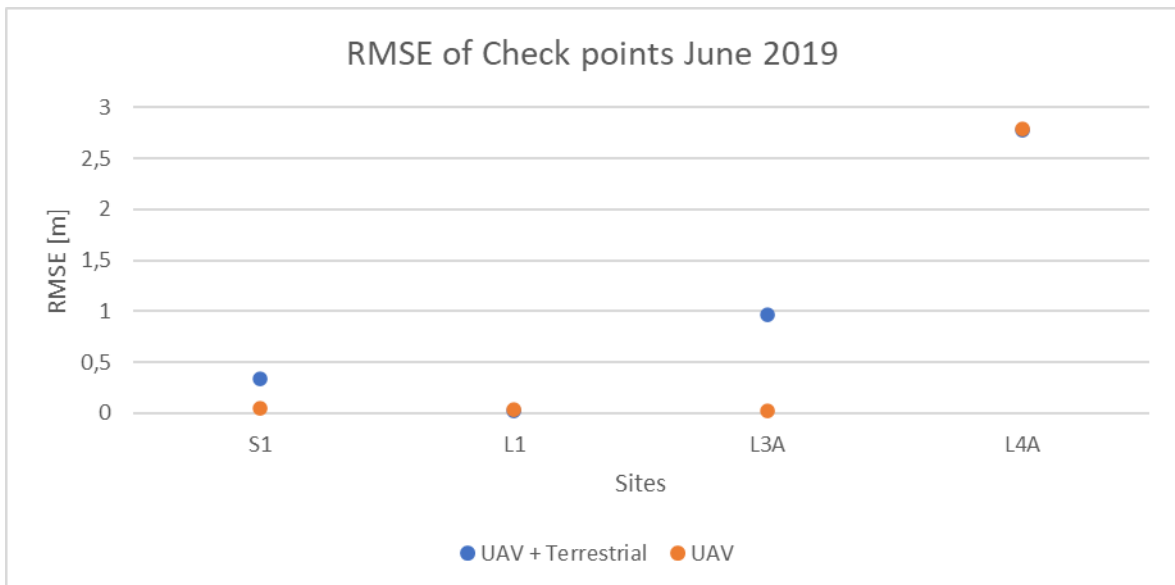


Abb. 9: RMSE der Check Points für UAV+ terrestrische Fotos sowie UAV-Fotos, Juni 2019

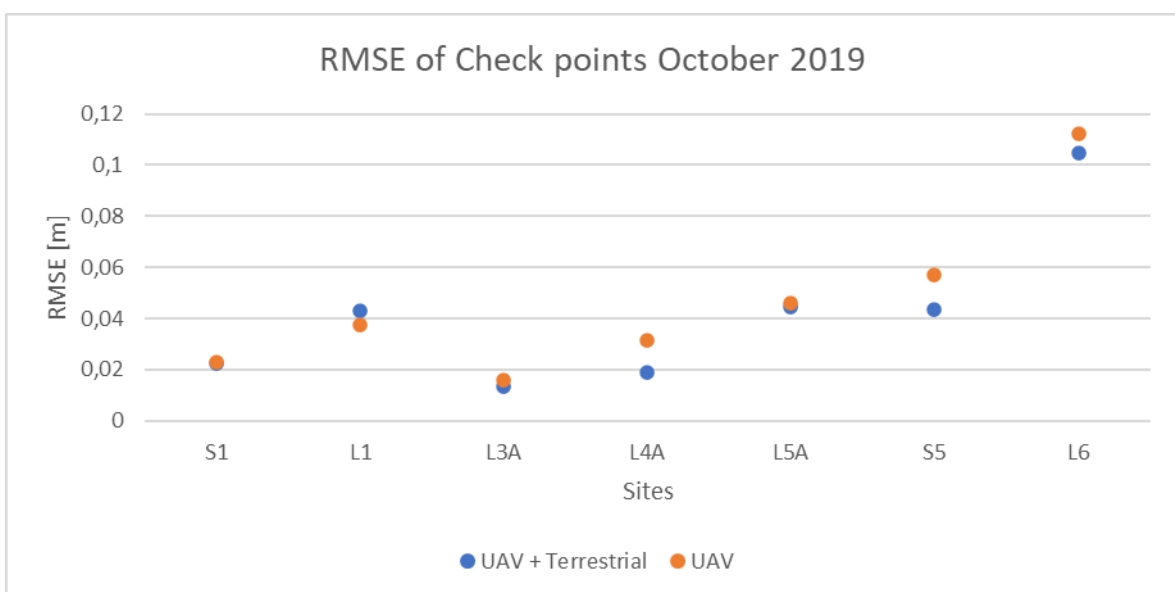


Abb. 10: RMSE der Check Points für UAV+ terrestrische Fotos sowie UAV-Fotos, Oktober 2019

Beim Vergleich der RMSE-Werte vom UAV-Datensatz mit jenem der UAV-Daten und terrestrischen Daten kann festgestellt werden, dass der Check Point-RMSE im Juni beim Datensatz inklusive terrestrischer Aufnahmen bei zwei von vier Sites kleiner als jener des UAV-Datensatzes ist und der RMSE im Oktober durch die zusätzliche Verwendung von terrestrischen Bilddaten bei insgesamt sechs von

sieben Sites reduziert wurde. Der RMSE konnte somit bei acht von elf 3D-Punktwolken reduziert werden. Durchschnittlich wurde der RMSE durch die zusätzliche Verwendung der terrestrischen Bilddaten im Oktober um 0,0047 m pro Site verkleinert. Im Juni beträgt die Reduzierung des RMSE durch zusätzliche Verwendung von terrestrischen Bilddaten 0,0087 m bei L1 und 0,0194 m bei L4A. Die Reduzierung der mittleren quadratischen Abweichung durch die Verwendung zusätzlicher terrestrischer Bilddaten kann also hauptsächlich im mm-Bereich festgestellt werden, bzw. beträgt die niedrigste Reduzierung 0,0009 m bei S1 im Oktober und die höchste Reduzierung 0,0194 m bei L4A im Juni 2019.

Betrachtet man die RMSE-Werte der Check Points und vergleicht diese mit der Vegetationsbedeckung der einzelnen Sites, kann beim Datensatz für Oktober festgestellt werden, dass bis auf die beiden Sites mit der geringsten Vegetationsbedeckung (S1 und L1) folgender Trend zu erkennen ist: Mit zunehmender durchschnittlicher Vegetationsbedeckung der einzelnen Sites steigt der RMSE. Vor allem aufgrund der sehr hohen Fehlerwerte der Sites S1, L3A und L4A im Juni-Datensatz ist der Trend für diese Zeitscheibe nicht zu erkennen.

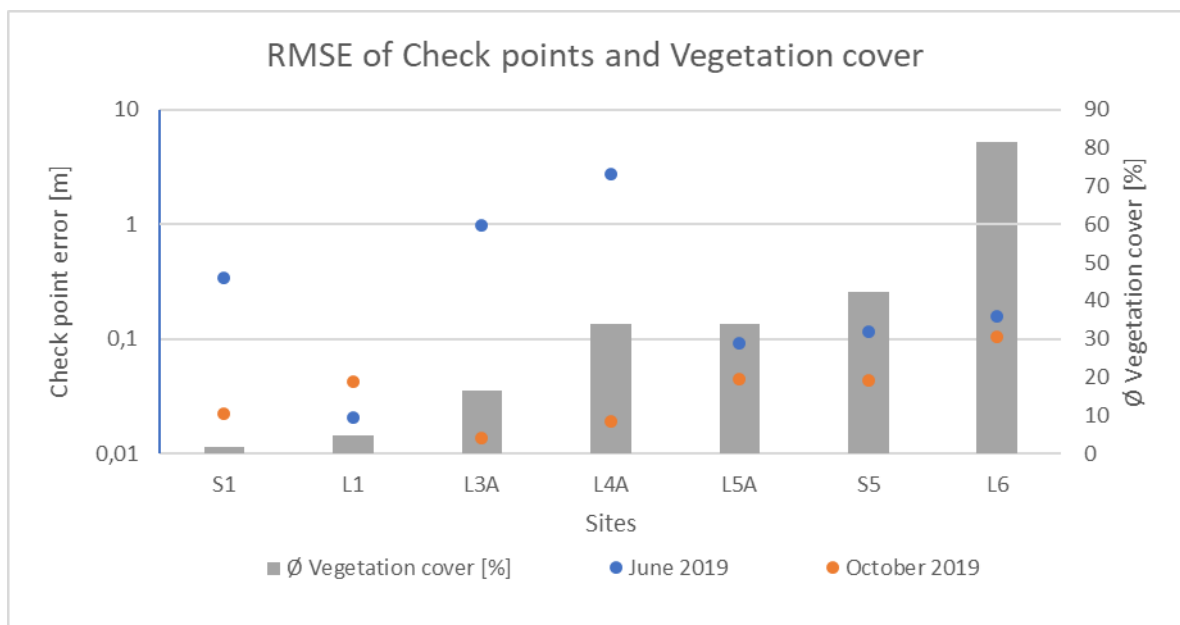


Abb. 11: RMSE der Check Points und durchschn. Vegetationsbedeckung aller untersuchten Sites

Während zur Erstellung des Diagramms in Abbildung 11 alle verfügbaren Daten verwendet wurden, sind in Abbildung 12 hingegen nur Ergebnisse für Sites berücksichtigt, bei denen sowohl UAV-Bilddaten als auch terrestrische Bilddaten in die Modelle integriert werden konnten. Somit sind in diesem Diagramm nur

RMSE-Werte von Sites visualisiert, die sich aufgrund der verwendeten Bild-
datensätze auch wirklich mit den anderen Sites vergleichen lassen. Während für
Juni 2019 jetzt nur noch der RMSE für 4 Sites angegeben werden kann, ändert
sich für die Zeitscheibe Oktober 2019 nichts.

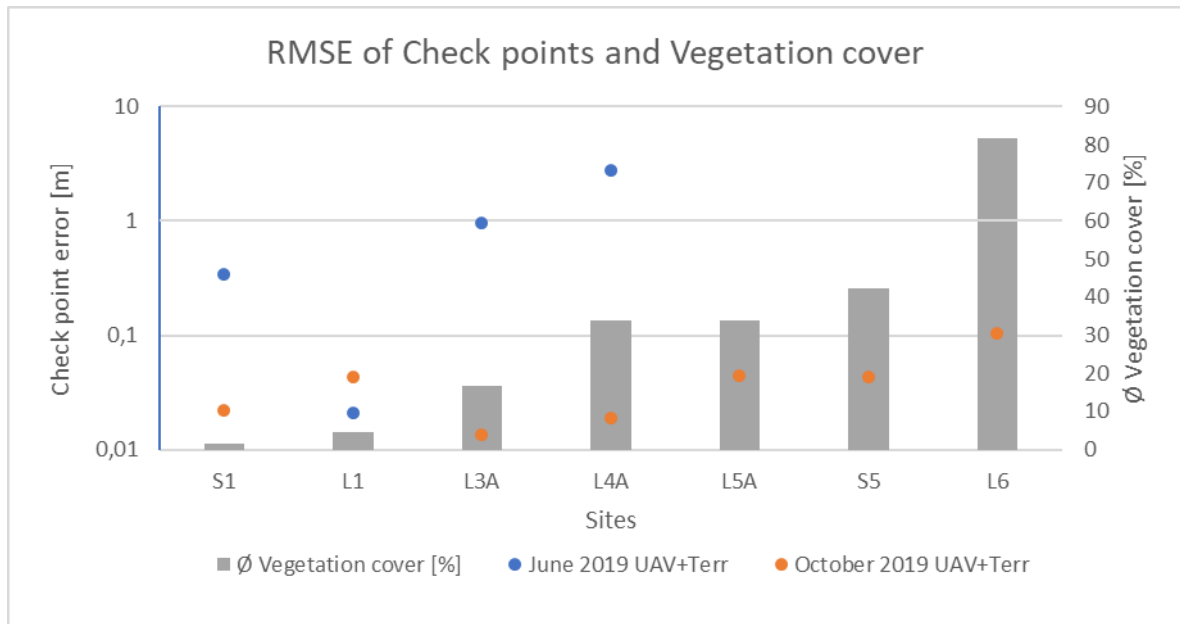


Abb. 12: RMSE der Check Points und durchschnittliche Vegetationsbedeckung der Sites inkl. UAV-Bilddaten und terrestrischer Bilddaten

5 Diskussion

5.1 Allgemeine Diskussion

Ein Nachteil der Feldmessungen von Bodenerosion, die unter natürlichen Niederschlagsbedingungen durchgeführt werden, sind die langen Zeiträume, welche notwendig sind, um die Evolution analysieren zu können (vgl. BALAGUER-PUIG et al. 2017). Häufig betragen die Untersuchungsperioden bei Bodenerosionsstudien mindestens ein halbes Jahr (vgl. Cook und Dietze 2019, ELTNER et al. 2013, ELTNER et al. 2015, SMITH und VERICAT 2015) oder sogar länger als ein Jahr (vgl. KAISER et al. 2014, NOUWAKPO et al. 2016). Obwohl diese Masterarbeit nicht den Vergleich von 3D-Punktwolken zur Feststellung von Bodenerosion und Sedimentablagerung, sondern vielmehr eine Qualitätsanalyse der Modellgenauigkeit zum Ziel hat, wurde die Zeitspanne zwischen den Aufnahmen im Zuge der Feldarbeit für diese Masterarbeit höchstwahrscheinlich zu kurz gewählt, um kleinskalige Bodenerosionsprozesse im Oberen Kaunertal feststellen zu können. Des Weiteren wurden die UAV-Aufnahmen im Juni sowie im Oktober durchgeführt, wodurch Schneeprozesse als auslösender Faktor für Erosionsprozesse im Hochgebirge nicht berücksichtigt werden. Schneeprozesse wie Lawinen, Schneegleiten oder Schneeablation stellen aber häufig einen wichtigen Faktor im Zusammenhang mit Bodenerosionsprozessen dar (vgl. MEUSBURGER et al. 2014, ALEWELL et al. 2015). Jedoch ist es schwierig, Erosionsprozesse an Gebirgshängen, die durch Schneeprozesse ausgelöst werden, mit Sedimentfallen zu erfassen, da die Messungseinrichtungen häufig durch Schneegleiten und Lawinen zerstört werden (vgl. KONZ et al. 2012, MEUSBURGER et al. 2014). Aus diesem Grund wäre es interessant, die für diese Arbeit angewandte Methode für verschiedene Zeitspannen zu testen und vor allem UAV-Aufnahmen sowie terrestrische Aufnahmen vor und nach dem Winter durchzuführen. Dadurch könnte herausgefunden werden, zu welchen Zeitpunkten und innerhalb welcher Zeitspannen kleinskalige Bodenerosion mit SfM im Untersuchungsgebiet am besten gemessen werden kann.

Um auch innerhalb von kurzen Untersuchungszeiträumen Erosionsprozesse effektiv messen zu können, könnten Niederschlagssimulatoren eingesetzt werden.

Die Verwendung von Niederschlagssimulatoren gilt sowohl im Labor als auch im Feld als gängige Praxis (vgl. BALAGUER-PUIG et al. 2017). Mithilfe von Niederschlagssimulatoren könnten die notwendigen Zeiträume für Bodenerosionsuntersuchungen im Oberen Kaunertal verkürzt werden. Allerdings würde die Bodenerosion im Untersuchungsgebiet dann nicht mehr unter natürlichen Niederschlagsbedingungen erforscht werden. Die beiden Überlegungen, den Untersuchungszeitraum zu erweitern bzw. Niederschlagssimulatoren einzusetzen, wären für weitere Untersuchungen nur empfehlenswert, wenn es gelingt, den RMSE der 3D-Punktwolken so weit zu reduzieren, dass man tatsächlich valide Aussagen über kleinskalige Bodenerosionsprozesse im Oberen Kaunertal treffen kann. In den folgenden beiden Subkapiteln (5.2 und 5.3) werden unter anderem Vorschläge präsentiert, welche möglicherweise zu einer Reduzierung des RMSE und somit zu einer Qualitätsverbesserung der mit SfM generierten 3D-Punktwolken beitragen könnten.

5.2 Diskussion der Datenerhebung

Was die Datenerhebung betrifft, muss allgemein festgehalten werden, dass die SfM-Methode ein ausgefeiltes Studiendesign sowie Erfahrung in der Bildaufnahme voraussetzt, um Fehler zu vermeiden und um später eine gute Qualität der rekonstruierten Szene zu gewährleisten (vgl. ELTNER et al. 2016).

Wie im Kapitel 3.1 bereits erwähnt wurde, sind die kreisförmigen, mobilen GCPs mit Nummern zwischen 1 und 8 versehen, was die Orientierung bei der Datenanalyse erleichtert. Jedoch sind diese Ziffern auf stark belichteten Aufnahmen häufig gar nicht oder nur schwer zu erkennen. Dadurch wird das Platzieren der Marker bei der Datenanalyse mit Agisoft Metashape aufwendiger, da in so einem Fall nach dem Ausschlussprinzip vorgegangen werden muss, sofern noch nicht genügend Marker auf Fotos platziert wurden, um die halbautomatische Platzierung der Software zu ermöglichen. Abbildung 13 zeigt exemplarisch jeweils einen GCP, dessen Nummer gut erkennbar ist, und einen GCP, dessen Nummer aufgrund der Belichtungsverhältnisse unkenntlich ist. Um diesem eben beschriebene Problem entgegenzuwirken, könnte versucht werden, die Ziffern viel dicker auf die GCPs zu schreiben, damit sie durch die starke Belichtung auf den Aufnahmen nicht so leicht unkenntlich werden.

Auch die Anzahl der im Zuge der Datenerhebung installierten GCPs sollte noch einmal überdacht werden, da es durchaus sinnvoll ist, ein gewisses Maß an Redundanz in den GCP-Verbund einzubauen (vgl. WESTOBY et al. 2012). Untersuchungen von CARRIVIC et al. (2016) zeigen, dass die Genauigkeit von Modellen abnimmt, wenn die Anzahl an GCPs reduziert wird. Weil mit zunehmender Anzahl an verwendeten GCPs der RMSE konstant abnimmt und die Qualität des Datenproduktes durch die Verwendung genauer und gut verteilter GCPs signifikant verbessert werden kann (vgl. JAMES und ROBSON 2012, KAMBLE und DESHMUKH 2017, VILLANUEVA und BLANCO 2018), könnte es helfen, die Anzahl der Kontrollpunkte zu erhöhen, um somit die im Zuge der Datenanalyse berechneten

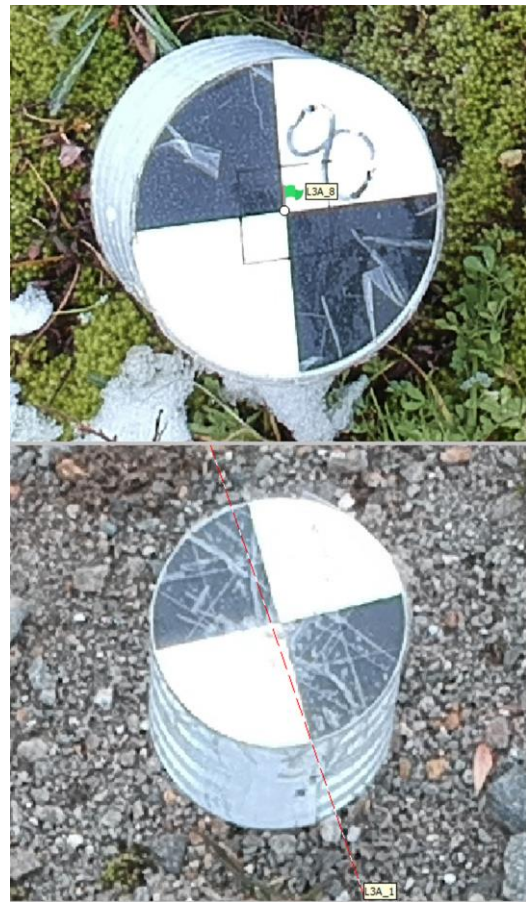


Abb. 13: Oben: Gut erkennbare GCP-Nummer, unten: nicht erkennbare GCP-Nummer

Fehlerwerte zu reduzieren. Dazu könnten im Untersuchungsgebiet Oberes Kaunertal einfach mehr GCPs als diejenigen, die bisher verwendet wurden, pro Site installiert werden. Überdies könnten Versuche unternommen werden, kleinere GCPs vor der Datenaufnahme auch direkt in den Erosionsplots zu installieren (vgl. HÄNSEL et al. 2016), denn der Fehler kann durch eine gleichmäßige Verteilung der GCPs über das gesamte Untersuchungsgebiet reduziert (vgl. CARRIVIC et al. 2016) und somit die Genauigkeit des Modelles erhöht werden (vgl. HENDRICKX et al. 2019). Eine statistische Auswertung im Zuge der Datenanalyse wäre interessant, um die Frage zu klären, wie groß der Einfluss einer erhöhten Anzahl an Kontrollpunkten auf den RMSE der einzelnen Sites im Oberen Kaunertal ist bzw. wie weit der RMSE dadurch reduziert werden kann. Damit könnte in weiterer Folge auch herausgefunden werden, wie viel Sinn es macht, die Zahl der

Kontrollpunkte zu erhöhen bzw. wie viele GCPs pro Site notwendig sind, um im Zuge der Datenanalyse brauchbare Ergebnisse zu erzielen.

Obwohl die für die Platzierung der mobilen GCPs benötigten Bodenanker rund 60 cm in den Untergrund getrieben wurden, kann ein erosionsbedingter Versatz der Kontrollpunkte nicht vollständig ausgeschlossen werden (vgl. LIEDL 2019). Ein möglicher Versatz der Bodenanker könnte in weiterer Folge beim Vergleich von 3D-Punktwolken bzw. bei der Berechnung von Differenzmodellen zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen, da sich die Position der GCPs zwischen 2 Erhebungszeitpunkten in diesem Fall ändern würde. Um einen eventuellen Versatz der Bodenanker eruieren zu können, wurde die tachymetrische Vermessung der Bodenkontrollpunkte sowohl im Juni als auch im Oktober 2019 durchgeführt. Leider passierten die Vermessungen zu beiden Zeitpunkten irrtümlicherweise in unterschiedlichen lokalen Koordinatensystemen. Dies führte in weiterer Folge dazu, dass sich die beiden Datensätze nicht miteinander vergleichen ließen. Aus diesem Grund wurden zur Verortung der GCPs nur die Tachymeter-Daten vom Oktober verwendet und es muss davon ausgegangen werden, dass sich die Bodenanker zwischen den beiden Untersuchungszeitpunkten nicht bewegt haben. Bei einer tachymetrischen Vermessung zu verschiedenen Zeitpunkten sollte also unbedingt darauf geachtet werden, dass an der Totalstation immer die gleichen Voreinstellungen getroffen werden. Die Gefahr von unterschiedlichen Einstellungen besteht besonders dann, wenn der Tachymeter von verschiedenen Personen bedient wird.

Die Technik, Klebeband am Festgestein anzubringen, welches danach als GCP fungiert, sollte ebenfalls überdacht werden. GCPs in dieser Form dienen zwar als zusätzliche Kontrollpunkte und verbessern somit die Genauigkeit der SfM-Methode, jedoch kann das Klebeband durch starke Niederschläge oder während der Schneebedeckung im Winter leicht vom Gestein gelöst werden. Außerdem ist es schwierig, bei dieser Art von GCPs einen genauen Mittelpunkt auszumachen. Stattdessen könnten stabil markierte Punkte am Festgestein ähnlich wie die in der Geodäsie verwendeten Vermessungspunkte als GCPs eingesetzt werden. Somit könnte zum einen der Mittelpunkt des GCPs im Zuge der Datenanalyse leichter erkannt werden und zum anderen kann sichergestellt werden, dass sich die GCPs nicht bewegen oder durch das Wetter bzw. die Witterung zerstört werden.

MORGAN et al. stellten in SfM-Laborversuchen fest, dass ca. 100 Pixel pro Sedimentpartikel benötigt werden, um eine Auflösung im Maßstab eines Sedimentpartikels zu erhalten (vgl. MORGAN et al. 2017). Eine hohe Bildauflösung, welche durch eine hohe Pixelzahl und Pixelgröße definiert ist, resultiert in einer ausreichenden Bildqualität und somit auch in qualitativ hochwertigen 3D-Punktwolken (vgl. ELTNER et al. 2016). Dahingehend könnte auch untersucht werden, ob die Qualität, der mit SfM generierten 3D-Punktwolken durch die Verwendung anderer Sensoren noch weiter verbessert werden kann. Dabei sollten neben der Anzahl der Pixel auch Faktoren wie der Höhe der ISO-Zahl, dem Bildrauschen sowie der Wiedergabe von Helligkeitsunterschieden Aufmerksamkeit geschenkt werden. Daneben können auch die Kameraeinstellungen (Blendeneinstellung, Verschlusszeit, ISO-Einstellungen, Objektiv-einstellungen) die Qualität der 3D-Punktwolken beeinflussen. (vgl. HENDRICKX et al. 2019)

An sonnigen Tagen sollte die Datenerhebung einer Site nicht länger als 30 Minuten dauern, weil sich mit zunehmender Dauer die Schatten ändern, was in weiterer Folge die Matching-Leistung bei der Datenanalyse verringert (vgl. ELTNER et al. 2016). Auch die mit einer Spiegelreflexkamera aufgenommenen terrestrischen Fotos, welche zusätzlich zu den UAV-Fotos mit dem Ziel verwendet werden, genauere SfM-Ergebnisse zu erzielen, sollten unbedingt direkt vor oder nach der UAV-Befliegung aufgenommen werden. Eine zeitlich versetzte Aufnahme der terrestrischen Fotos kann zu unterschiedlichen Belichtungsverhältnissen gegenüber den UAV-Fotos führen. Dadurch weisen die Pixel, welche sich jeweils an der gleichen Stelle befinden, unterschiedliche Farbwerte auf. Dies führt dazu, dass die UAV-Fotos nicht mit den entsprechenden, überlappenden terrestrischen Aufnahmen zusammenpassen und somit entweder die UAV-Fotos oder die terrestrischen Fotos für die SfM-Methode unbrauchbar werden. Im Zuge der Datenanalyse mit Agisoft Metashape äußert sich dieses Problem, indem ein gesamter Datensatz (UAV-Datensatz oder terrestrischer Datensatz) nicht mit dem entsprechenden anderen Datensatz aligned werden kann.

Der Maximierung des Überlappungsbereiches der Fotos und einer gleichmäßigen Abdeckung des Untersuchungsgebietes sollte bei der Datenaufnahme besondere

Aufmerksamkeit geschenkt werden (vgl. WESTOBY et al. 2012). Daher könnte versucht werden, die Sites in einem noch engeren Grid zu befliegen, um die Überlappungsbereiche der Luftbilder zu maximieren und somit möglicherweise bessere Punktwolken generieren zu können. Daneben könnte die Auslösezeit der Kamera von zwei Sekunden noch weiter reduziert werden, um somit mehr Fotos in kürzerer Zeit zu generieren und dementsprechend ebenfalls die Überlappungsbereiche der Aufnahmen zu vergrößern bzw. durch eine höhere Anzahl von Fotos auch den gesamten Bilddatensatz zu vergrößern. Da es keinen standardisierten Wert bezüglich der benötigten Anzahl an Bildern und des Überlappungsgrades der Bilder für SfM-Modellierungen gibt (vgl. CARRIVIC et al. 2016), kann die optimale Anzahl an Bildern sowie die optimale Bildüberlappung nur durch Versuche eruiert werden.

5.3 Diskussion der Datenanalyse

An dieser Stelle gilt es anzumerken, dass die Berechnungen mit der kommerziellen Software Agisoft Metashape als eine Art Blackbox beschrieben werden müssen (vgl. ELTNER et al. 2016), da der Autor keine Informationen über die Algorithmen des Photogrammetrie-Programmes hat und somit auch die genaue Funktionsweise der Modellierung von Metashape nicht kennt. Obwohl die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit bei der Rekonstruktion von Szenen als 3D-Computermodelle mit Metashape als sehr hoch beschrieben werden, gibt es keine Publikationen über die in Metashape verwendeten Algorithmen (vgl. HENDRICKX et al. 2019, KINGSLAND 2020, LAPORTE-FAURET et al. 2019). Dies dürfte auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass es sich bei Metashape um eine kommerzielle Software handelt und es dementsprechend im Sinne des Herstellers ist, die genaue Funktionsweise des Programmes geheim zu halten.

Metashape bzw. die Vorgängersoftware PhotoScan benötigt einen leistungsstarken PC mit einer Grafikkarte. Neben der Anzahl der verwendeten Fotos ist die Verarbeitungsgeschwindigkeit bei Metashape von Parametern wie dem Arbeitsspeicher (RAM) des Computers abhängig. (vgl. LI et al. 2016) Die Anforderungen an den Arbeitsspeicher steigen mit der Anzahl der Bilder, die bei der Rekonstruktion verwendet werden. Ferner wird die Grenze für die Anzahl an

Bildern, die gleichzeitig abgeglichen werden können, ebenfalls durch den RAM festgelegt. (vgl. CARRIVIC et al. 2016) Weiters ist die Dauer der Berechnungen in Metashape stark davon abhängig, mit welchem Prozessor (CPU) der verwendete PC ausgestattet ist. So kommt eine leistungsstarke CPU besser mit rechenintensiven Prozessen wie jenem des Alignments zurecht. Diese Tatsache musste der Autor selbst im Zuge der Datenanalyse mit Metashape erfahren. So dauerte das Alignment mit einem Intel Core i3-Prozessor und 8 GB-RAM bei manchen Sites ca. 2 - 3 Stunden oder konnte in anderen Fällen gar nicht durchgeführt werden, während derselbe Arbeitsschritt mit denselben Datensätzen, aber unter Verwendung eines Computers mit einem Intel Core i7-Prozessor und einem 16 GB-RAM Arbeitsspeicher in ca. 0.5 Stunden abgeschlossen werden konnte. Noch zeitintensiver als der Prozess des Alignments ist aber das Berechnen von Dense Point Clouds. Weil dieser Arbeitsschritt noch mehr Rechenleistung in Anspruch nimmt, empfiehlt der Autor besonders hier eine adäquate Hardware, um kostbare Zeitressourcen zu sparen bzw. um die Arbeitsschritte überhaupt durchführen zu können.

5.4 Diskussion der Ergebnisse

Entsprechend der in Kapitel 4 präsentierten Ergebnisse konnte festgestellt werden, dass die Qualität der 3D-Punktwolken, mit dem niedrigsten RMSE aller untersuchten Sites von 0,0137 m für Oktober 2019 und 0,0208 m für Juni 2019, nicht ausreicht, um kleinskalige Erosionsprozesse wie Rillenerosion oder Zwischenrillenerosion im hochalpinen Gelände des Oberen Kaunertals erfassen zu können, wenn von den geschätzten Bodenerosionsraten an stark betroffenen alpinen Standorten von 1.4 - 3 mm/a⁻¹ (vgl. ALEWELL et al. 2015) ausgegangen wird. Um brauchbare Aussagen über kleinskalige Erosionsprozesse tätigen zu können, muss die Methode bzw. der hier verwendete Workflow noch weiter verbessert werden, um den RMSE der 3D-Punktwolken ausreichend zu reduzieren. Möglicherweise könnten die in diesem Kapitel präsentierten Verbesserungsvorschläge dazu dienen, die Qualität der 3D-Punktwolken zu erhöhen.

Allgemein muss angemerkt werden, dass die Ergebnisse bei Untersuchungen mithilfe von UAV-Photogrammetrie davon abhängen, wie die Daten erfasst, bearbeitet und analysiert werden. Dies betrifft bei der Datenerfassung beispielsweise Faktoren wie die Flughöhe, die Bildüberlappung, die Beobachtungsgeometrie sowie die Beleuchtungssituation. Die Datenanalyse ist hingegen unter anderem von der Verarbeitungsqualität, der verwendeten Software und der Tiefenfilterung abhängig, während die Ergebnisse der Datenanalyse zum Beispiel von der statistischen Auswertung abhängen. (vgl. CUNLIFFE et al. 2022) Die in dieser Masterarbeit präsentierten Ergebnisse beziehen sich somit auf den im Zuge der Datenerhebung und der Datenanalyse verwendeten Workflow. Änderungen am Workflow können sich dementsprechend auch auf die Ergebnisse auswirken.

Obwohl am Metashape-Workflow zwischen beiden Zeitscheiben nichts geändert wurde, um die gleichen Voraussetzungen bei der Datenanalyse zu gewährleisten, wurde während der Feldkampagne im Oktober 2019, verglichen zur Datenerhebung im Juni 2019, noch mehr auf einen ausreichenden Überlappungsbereich der Aufnahmen sowie auf eine möglichst niedrige Flughöhe geachtet. Diese Tatsache könnte mitunter dafür verantwortlich sein, dass für Oktober 2019 qualitativ hochwertigere Ergebnisse erzielt werden konnten als für Juni 2019. Weil mit zunehmender Distanz zwischen Sensor und Oberfläche der gemessene Fehler steigt (vgl. ELTNER et al. 2016), könnten eventuell schon geringe Veränderungen der Flughöhe im Submeter-Bereich die Genauigkeit der Messergebnisse verändern. Da zur Verortung der GCPs nur die im Oktober 2019 aufgenommenen Tachymeter-Daten verwendet wurden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Tachymeter-Daten für die Zeitscheibe Oktober 2019 genauer sind als für die Zeitscheibe Juni 2019. Wenn sich also die Bodenanker der Sites, welche für die Platzierung der GCPs installiert wurden, zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten bewegt haben, was zumindest makroskopisch nicht festgestellt werden konnte, könnte dies ein Grund für die höheren RMSE-Werte für Juni 2019 sein.

Wie der Tabelle 4 im Kapitel 4 entnommen werden kann, weisen einige Sites besonders hohe RMSE-Werte auf. Bei den höchsten RMSE-Werten im Oktober

von 0,1121 m (UAV-Datensatz) sowie 0,1049 m (UAV-Datensatz und terrestrischer Datensatz), beide für die Site L6 berechnet, kann nur spekuliert werden. Der Autor nimmt an, dass hier die hohe durchschnittliche Vegetationsbedeckung der Site (82 %) für den hohen RMSE verantwortlich ist. Der ebenfalls hohe RMSE-Wert dieser Site für Juni (0,1582 m), würde diese These bestätigen. Der Juni-RMSE für L6 ist in den Tabellen im Ergebnisteil nicht ersichtlich, denn für die Berechnung konnten nur die terrestrischen Aufnahmen verwendet werden, weil diese im Schatten und die UAV-Fotos in der Sonne aufgenommen wurden.

Bezüglich des extrem-hohen RMSE von 2,7929 m (UAV-Datensatz) und 2,7735 m (UAV-Datensatz und terrestrischer Datensatz) der Site L4A im Juni 2019 konnte auch kein eindeutiger Grund festgestellt werden, warum es hier zu einem so massiven Ausreißer kam. Abschattungen bei der Datenaufnahme können jedenfalls ausgeschlossen werden. Obwohl für L4A mit 5 GCPs die geringste Anzahl an Kontrollpunkten aller Sites zur Verfügung stand, kann auch diese Tatsache als Grund für den hohen RMSE ausgeschlossen werden, da im Oktober 2019 ein dementsprechend kleiner RMSE von 0,0189 m für diese Site berechnet wurde. Da die Fehler bei der 3D-Rekonstruktion mit SfM von vielen Faktoren, wie z. B.: Abstand, Bildanpassungsleistung, Oberflächenstruktur, Lichtverhältnisse, GCP-Eigenschaften etc., beeinflusst werden (vgl. ELTNER et al. 2016), ist es aber häufig sehr schwierig, einen konkreten Grund dafür zu nennen, warum ein Modell höhere RMSE-Werte aufweist als ein anderes.

Die ebenfalls sehr hohen Fehlerwerte von 0,3414 m (Site S1 im Juni) und 0,9720 m (Site L3A im Juni) können damit erklärt werden, dass die terrestrischen Aufnahmen gemeinsam mit den UAV Aufnahmen schlechte Ergebnisse liefern, da die RMSE-Werte der Punktwolken, wenn für die Berechnung nur UAV-Fotos verwendet werden, für S1 0,0511 m und für L3A 0,0257 m betragen. Somit beträgt der Unterschied zwischen den Datensätzen mit bzw. ohne terrestrische Bilddaten von S1 und L3A im Juni 0,2903 m bei S1 und 0,9463 m bei L3A. Schon bei der Datenanalyse mit Metashape konnte bei diesen Sites festgestellt werden, dass zwar die meisten Fotos beider Datensätze aligned werden konnten, aber sehr hohe Pix-Error entstanden, wenn Marker auf terrestrischen Aufnahmen gesetzt wurden. Deshalb wurden hier die meisten Marker von terrestrischen Fotos

entfernt. Das schlechte Matching der beiden Datensätze ist höchstwahrscheinlich auf unterschiedliche Lichtverhältnisse bei der Datenaufnahme zurückzuführen. Bei einer Recherche des Bildmaterials wurde festgestellt, dass beide Datensätze zwar am selben Tag, aber nicht direkt hintereinander, sondern mit einigen Stunden Abstand aufgenommen wurden.

Betrachtet man aufgrund dieser Erkenntnisse neben L4A auch die beiden Juni-Modelle von S1 und L3A als Ausreißer, kann nun neben der Oktober-Zeitscheibe auch bei der Juni-Zeitscheibe eine eindeutige Verbesserung der Modellqualität durch eine Ergänzung des UAV-Datensatzes mit terrestrischen Bilddaten festgestellt werden, sofern die terrestrischen Fotos zum annähernd gleichen Zeitpunkt wie die UAV-Fotos aufgenommen wurden. Obwohl terrestrische Oblique-Aufnahmen weniger genau als Luftbilder aus niedrigen Höhen sind (vgl. CARRIVIC et al. 2016), kann der RMSE einer 3D-Punktwolke, den Ergebnissen dieser Masterarbeit nach zu urteilen, meist im Millimeterbereich reduziert werden. Warum der RMSE der Site L1 im Oktober beim Modell inklusive terrestrischer Aufnahmen höher ist als ohne, ist dem Autor nicht bekannt.

Da sich Vegetation im Wind bewegt und daher Bildfehler verursachen kann, stellt dies eine besondere Herausforderung für SfM-Modellierungen dar. Außerdem erschwert eine Vegetationsdecke die Bildanpassungsleistung aufgrund des sehr variablen Erscheinungsbildes aus unterschiedlichen Betrachtungswinkeln (vgl. ELTNER et al. 2016, NOUWAKPO et al. 2016). Dadurch können bereits vor der Anwendung von Vegetationsfiltern, bei bewachsenen Flächen viel höhere RMSE-Werte entstehen als bei unbewachsenen Flächen (vgl. CARRIVIC et al. 2016). Aus dem Vergleich zwischen dem RMSE und der durchschnittlichen Vegetationsbedeckung der einzelnen Sites kann jedoch kein kausaler Zusammenhang abgeleitet werden, dass der RMSE mit zunehmender Vegetationsbedeckung steigt. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Modellgenauigkeit durch verschiedene Faktoren, wie beispielsweise durch die Steilheit des Geländes (vgl. HENDRICKX et al. 2019), beeinflusst werden kann. Dementsprechend repräsentiert die prozentuelle Vegetationsbedeckung einer Site auch nur einen Faktor. Betrachtet man aber bei der Juni-Zeitscheibe auch hier wieder die Sites S1, L3A und L4A als Ausreißer, was aber nur mit den gesamten

verfügbaren Daten für Juni, wie im Diagramm in Abbildung 11 visualisiert, Sinn ergibt, dann steigt der RMSE mit zunehmender durchschnittlicher Vegetationsbedeckung. In diesem Fall ist der gleiche Trend wie bei der Oktober-Zeitscheibe zu erkennen, wenn man die beiden Sites mit der geringsten Vegetationsbedeckung (S1 und L1) nicht berücksichtigt. Möglicherweise wird der Einfluss der Vegetationsbedeckung auf den RMSE der 3D-Punktwolken auch erst ab einem gewissen Grad an Vegetationsbedeckung tragend. Jedenfalls kann mit dem Vergleich zwischen RMSE der 3D-Punktwolken und der durchschnittlichen Vegetationsbedeckung der Sites aufgezeigt werden, dass Sites mit hoher durchschnittlicher Vegetationsbedeckung, relativ hohe RMSE-Werte aufweisen.

Nicht zuletzt möchte der Autor anmerken, dass eine genaue Dokumentation der Arbeitsschritte, Zwischenergebnisse und Ergebnisse bei der Modellierung mit SfM-MVS besonders wichtig ist. Weitere Analysen, wie beispielsweise der Vergleich von Dense Point Clouds oder DEMs, dürfen die Unsicherheiten, welche der photogrammetrischen Verarbeitung innewohnen, nicht vernachlässigen. Zu diesen Unsicherheiten zählen unter anderem das potentielle Risiko für systematische Fehler sowie die Genauigkeit der Messergebnisse. (vgl. JAMES et al. 2019)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, unter anderem herauszufinden, ob kleinskalige Erosionsprozesse im Gletschervorfeld des Oberen Kaunertals mit der SfM-MVS-Methode erfasst werden können. Dazu wurden insgesamt 7 Sites im Juni 2019 und im Oktober 2019 mit einem UAV-System und einer Spiegelreflexkamera aufgenommen. Geht man von geschätzten Erosionsraten von 1.4 – 3 mm/a-1 (vgl. ALEWELL et al. 2015) aus, reicht die Qualität der mit SfM generierten 3D-Punktwolken nicht aus, um Erosionsprozesse festzustellen, denn der niedrigste RMSE aller untersuchten Sites beträgt 0,0137 m. Daneben beschäftigte sich diese Arbeit mit der Frage, ob die Qualität der 3D-Punktwolken verbessert werden kann, wenn zusätzlich zu den UAV-Aufnahmen, terrestrische Bilddaten in den zur Modellierung verwendeten Bilddatensatz integriert werden. Hierbei konnte aufgezeigt werden, dass der RMSE beim überwiegenden Teil der untersuchten Sites reduziert werden konnte, sofern keine längeren zeitlichen Abstände zwischen den Aufnahmen der UAV-Fotos und jener der terrestrischen Fotos liegen. Des Weiteren sollte eruiert werden, ob mit Zunahme der durchschnittlichen Vegetationsbedeckung der einzelnen Sites, die Qualität der 3D-Punktwolken sinkt. Obwohl hier ein Trend in diese Richtung zu erkennen ist, konnte, mitunter aufgrund von Ausreißern bei manchen Sites, kein eindeutiger Zusammenhang festgestellt werden. Während manche Ausreißer darauf zurückzuführen sind, dass zu lange zeitliche Abstände zwischen den UAV-Aufnahmen und den terrestrischen Aufnahmen lagen, konnte bei anderen Ausreißern kein eindeutiger Grund für die hohen RMSE-Werte festgestellt werden. Weiterer Forschungsbedarf ist notwendig, um den für diese Masterarbeit verwendeten Workflow und dementsprechend auch die Genauigkeit der 3D-Punktwolken weiter zu verbessern, um somit schließlich kleinskalige Erosionsprozesse im Untersuchungsgebiet mit der SfM-MVS-Methode erfassen zu können. Dabei sollte besonderes Augenmerk auf die Installationsart, die Anzahl und die räumliche Verteilung der GCPs gelegt werden. Auch die Art des Sensors, die Kameraeinstellungen, der Überlappungsgrad und die Anzahl der verwendeten Fotos sollten weiter untersucht werden, um optimale Bedingungen für kleinskalige Erosionsmessung zu schaffen.

7 Literatur

- ABERMANN J., LAMBRECHT A., FISCHER A., KUHN M. (2009): Quantifying changes and trends in glacier area and volume in the Austrian Ötztal Alps (1969-1997-2006). – In: *The Cryosphere* 3, 205-215.
- AHNERT F. (2015⁵): Einführung in die Geomorphologie. – Stuttgart.
- ALEWELL C., EGLI M., MEUSBURGER K. (2015): An attempt to estimate tolerable soil erosion rates by matching soil formation with denudation in Alpine grasslands. – In: *Journal of Soils and Sediments* 15, 1383-1399.
- ALEWELL C., MEUSBURGER K., JURETZKO G., MABIT L., KETTERER M. (2014): Suitability of ²³⁹⁺²⁴⁰Pu and ¹³⁷Cs as tracers for soil erosion assessment in mountain grasslands. – In: *Chemosphere* 103, 274-280.
- AL KHALIL O. (2020): Structure from Motion (SfM) Photogrammetry as Alternative to Laser Scanning for 3D Modelling of Historical Monuments. – In: *Open Science Journal* 5 (2), 1-17.
- BAEWERT H. und MORCHE D. (2014): Coarse sediment dynamics in a proglacial fluvial system (Fagge River, Tyrol). – In: *Geomorphology* 218, 88-97.
- BALAGUER-PUIG M., MARQUÉS-MATEU Á., LERMA J., IBÁÑEZ-ASENSIO S. (2017): Estimation of small-scale soil erosion in laboratory experiments with Structure from Motion photogrammetry. – In: *Geomorphology* 295, 285-296.
- BASH E., MOORMAN B., GUNTHER A. (2018): Detecting Short-Term Surface Melt on an Arctic Glacier Using UAV Surveys. – In: *Remote Sensing* 10, 1547-1564.
- BERBER M., MUNJY R., LOPEZ J. (2021): Kinematic GNSS positioning results compared against Agisoft Metashape and Pix4dmapper results produced in the San Joaquin experimental range in Fresno County, California. – In: *Journal of Geodetic Science* 11, 48-57.
- BRODU N. und LAGUE D. (2012): 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. – In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 68, 121-134.

- CARRIVICK J., HECKMANN T., FISCHER M., DAVIES B. (2019): An Inventory of Proglacial Systems in Austria, Switzerland and Across Patagonia. – In: HECKMANN T. und MORCHE D. (Hrsg.): *Geomorphology of Proglacial Systems. Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciaded Alpine Landscapes.* – Cham, 43-58.
- CARRIVICK J., SMITH M., QUINCEY D. (2016): *Structure from Motion in the Geosciences.* – Chichester.
- CHAI T. und DRAXLER R. (2014): Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. – In: *Geoscientific Model Development* 7, 1247-1250.
- CLAPUYT F., VANACKER V., VAN OOST K. (2016): Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. – In: *Geomorphology* 260, 4-15.
- COOK K. (2017): An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. – In: *Geomorphology* 278, 195-208.
- COOK K. UND DIETZE M. (2019): Short Communication: A simple workflow for robust low-cost UAV- derived change detection without ground control points. – In: *Earth Surface Dynamics* 7, 1009-1017.
- CUNLIFFE A., ANDERSON K., BOSCHETTI F., BRAZIER R., GRAHAM H., MYERS-SMITH I., ASTOR T., BOER M., CALVO L., CLARK P., CRAMER M., ENCINAS-LARA M., ESCARZAGA S., FERNÁNDEZ-GUISURAGA J., FISHER A., GDULOVÁ K., GILLESPIE B., GRIEBEL A., HANAN N., HANGGITO M., HASELBERGER S., HAVRILLA C., HEILMAN P., JI W., KARL J., KIRCHHOFF M., KRAUSHAAR S., LYONS M., MARZOLFF I., MAURITZ M., MCINTIRE C., METZEN D., MÉNDEZ.BARROSO L., POWER S., PROŠEK J., SANZ-ABLANEDO E., SAUER K., SCHULZE-BRÜNINGHOFF D., ŠÍMOVÁ P., SITCH S., SMIT J., STEELE C., SUÁREZ-SEOANE S., VARGAS S., VILLARREAL M., VISSER F., WACHENDORF M., WIRNSBERGER H., WOJCIKIEWICZ R. (2022): Global application of an unoccupied aerial vehicle photogrammetry protocol for predicting aboveground biomass in non-forest ecosystems. – In: *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 8 (1), 57-71.

- DE BENI E., CANTARERO M., NERI M., MESSINA A. (2021): Lava flows of Mt Etna, Italy: the 2019 eruption within the context of the last two decades (1999–2019). – In: *Journal of Maps* 17 (3), 65-76.
- DUSIK J., LEOPOLD M., HAAS F. (2019): Periglacial Morphodynamics in the Upper Kaunertal. – In: HECKMANN T. und MORCHE D. (Hrsg.): *Geomorphology of Proglacial Systems. Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes*. – Cham, 99-116.
- EICHEL J., CORENBLIT D., DIKAU R. (2016): Conditions for feedbacks between geomorphic and vegetation dynamics on lateral moraine slopes: a biogeomorphic feedback window. – In: *Earth Surface Processes and Landforms* 41, 406-419.
- ELTNER A., BAUMGART P., MAAS H., FAUST D. (2015): Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. – In: *Earth Surface Dynamics* 40, 741-755.
- ELTNER A., KAISER A., CASTILLO C., GILLES R., NEUGIRG F., ABELLÁN A. (2016): Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments. – In: *Earth Surface Dynamics* 4, 359-389.
- ELTNER A., MAAS H., FAUST D. (2018): Soil micro-topography change detection at hillslopes in fragile Mediterranean landscapes. – In: *Geoderma* 213, 217-232.
- ELTNER A., MULSOW C., MAAS H. (2013): Quantitative measurement of soil erosion from TLS and UAV data. – In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-1/W2, 119–124.
- FAVALLI M., FORNACIAI A., NANNIPIERI L., HARRIS A., CALVARI S., LORMAND C. (2018): UAV-based remote sensing surveys of lava flow fields: a case study from Etna's 1974 channel-fed lava flows. – In: *Bulletin of Volcanology* 80 (29), 1-18.
- FISCHLER M. und BOLLES R. (1981): Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. – In: *Communications of the ACM* 24 (6), 381-395.

- GÓMEZ-GUTIÉRREZ Á., SCHNABEL S., BERENGUER-SEMPERE F., LAVADO-CONTADOR F., RUBIO-DELGADO J. (2014): Using 3D photo-reconstruction methods to estimate gully headcut erosion. – In: *Catena* 120, 91-101.
- GROH T. und BLÖTHE H. (2019): Rock Glacier Kinematics in the Kaunertal, Ötztal Alps, Austria. – In: *Geosciences* 9, 373-398.
- HACKNEY C. und CLAYTON A. (2015): Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and their application in geomorphic mapping. – In: CLARKE L. und NIELD J. (Hrsg.): *Geomorphical Techniques*. – London, 1-12.
- HAN Y., WANG S., GONG D., WANG Y., WANG Y., MA X. (2020): State of the art in digital surface modelling from multi-view high-resolution satellite images. – In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2, 351-356.
- HÄNSEL P., SCHINDEWOLF M., ELTNER A., KAISER A., SCHMIDT J. (2016): Feasibility of High-Resolution Soil Erosion Measurements by Means of Rainfall Simulations and SfM Photogrammetry. – In: *Hydrology* 3 (4), 1-16.
- HARDER P., SCHIRMER M., POMEROY J., HELGASON W. (2016): Accuracy of snow depth estimation in mountain and prairie environments by an unmanned aerial vehicle. – In: *The Cryosphere* 10, 2559-2571.
- HASELBERGER S., OHLER L., JUNKER R., OTTO J., GLADE T., KRAUSHAAR S. (2021): Quantification of biogeomorphic interactions between small-scale sediment transport and primary vegetation succession on proglacial slopes of the Gepatschferner, Austria. – In: *Earth Surface Processes and Landforms*, 1-12.
- HASELBERGER S., OTTO J., JUNKER R., OHLER L., GLADE T., KRAUSHAAR S. (2018): Kaunertal Austria – Concept Case; online aufrufbar unter: https://phusicos.eu/wp-content/uploads/2018/06/PHUSICOS-Case-study-site-poster-Kaunertal_Kick-off.pdf (letzter Aufruf 8.7.2021).
- HECKMANN T., HAAS F., MORCHE D., SCHMIDT K., ROHN J., MOSER M., LEOPOLD M., KUHN M., BRIESE C., PFEIFER N., BECHT M. (2012): Investigating an Alpine proglacial sediment budget using field measurements, airborne and terrestrial LiDAR data. – In: *IAHS Publ.* 356, 438-447.

- HECKMANN T., HILGER L., VEHLING L., BECHT M. (2016): Integrating field measurements, a geomorphological map and stochastic modelling to estimate the spatially distributed rockfall sediment budget of the Upper Kaunertal, Austrian Central Alps. – In: *Geomorphology* 260, 16-31.
- HENDRICKX H., VIVERO S., DE COCK L., DE WIT B., DE MAEYER P., LAMBIEL C., DELALOYE R., NYSSSEN J., FRANKL A. (2019): The reproducibility of SfM algorithms to produce detailed Digital Surface Models: the example of PhotoScan applied to a high-alpine rock glacier. – In: *Remote Sensing Letters* 10 (1), 11-20.
- HILGER L., DUSIK J., HECKMANN T., HAAS F., GLIRA P., PFEIFER N., VEHLING L., ROHN J., MORCHE D., BAEWERT H., STOCKER-WALDHUBER M., KUHN M., BECHT M. (2019): A Sediment Budget of the Upper Kaunertal. – In: HECKMANN T. und MORCHE D. (Hrsg.): *Geomorphology of Proglacial Systems. Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciaded Alpine Landscapes*. – Cham, 289-312.
- HOINKES G., THÖNI M., LICHEM C., BERNHARD F., KAINDL R., SCHWEIGL J., TROPPER P. COSCA M. (1997): Metagranitoides and associated metasediments as indicators for the pre-Alpine magmatic and metamorphic evolution of the western Ötztal Basement (Kaunertal, Tirol). – In: *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* 77, 299-314.
- HOWLAND M., TAMBERINO A., LIRITZIS I., LEVY T. (2022): Digital Deforestation: Comparing Automated Approaches to the Production of Digital Terrain Models (DTMs) in Agisoft Metashape. – In: *Quaternary* 5 (5), 1-12.
- ITAKURA K. und HOSOI F. (2020): Automatic Tree Detection from Three-Dimensional Images Reconstructed from 360° Spherical Camera Using YOLO v2. – In: *Remote Sensing* 12 (988), 1-20.
- JAMES M., APPLGARTH L., PINKERTON H. (2012): Lava channel roofing, overflows, breaches and switching: insights from the 2008–2009 eruption of Mt. Etna. – In: *Bull Volcanol* 74, 107-117.
- JAMES M., CHANDLER J., ELTNER A., FRASER C., MILLER P., MILLS J., NOBLE T., ROBSON S., Lane S. (2019): Guidelines on the use of structure-from-motion

- photogrammetry in geomorphic research. – In: *Earth Surface Processes and Landforms* 2019, 1-4.
- JAMES M. und ROBSON S. (2014): Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. – In: *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 1413-1420.
- JAMES M. und ROBSON S. (2012): Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. – In: *Journal of Geophysical Research* 117, 1-12.
- KAISER A., NEUGIRG F., ROCK G., MÜLLER C., HAAS F., RIES J., SCHMIDT J. (2014): Small-Scale Surface Reconstruction and Volume Calculation of Soil Erosion in Complex Moroccan Gully Morphology Using Structure from Motion. – In *Remote Sensing* 6, 7050-7080.
- KAMBLE V. und DESHMUKH S. (2017): Comparison between Accuracy and MSE, RMSE by using Proposed Method with Imputation Technique. – In: *Oriental Journal of Computer Science and Technology* 4, 773-779.
- KINGSLAND K. (2020): Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage. – In: *Digital Applications in Archeology and Cultural Heritage* 18 (e00157), 1-10.
- KONZ N., BAENNINGER D., KONZ M., NEARING M., ALEWELL C. (2010): Process identification of soil erosion in steep mountain regions. – In: *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 675-686.
- KONZ N., PRASUHN V., ALEWELL C. (2012): On the measurement of alpine soil erosion. – In: *Catena* 91, 63-71.
- KRAINER K. (2007): Permafrost und Naturgefahren in Österreich. – In: *Ländlicher Raum. Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft*, 1-18.
- LAGUE D., BRODU N., LEROUX J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). – In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82, 10-26.

- LAPORTE-FAURET Q., MARIEU V., CASTELLE B., MICHALET R., BUJAN S., ROSEBERY D. (2019): Low-Cost UAV for High-Resolution and Large-Scale Coastal Dune Change Monitoring Using Photogrammetry. – In: *Journal of Marine Science and Engineering* 7 (63), 1-16.
- LARSEN H., BUDKA M., BENNETT M. (2021): Technological innovation in the recovery and analysis of 3D forensic footwear evidence: Structure from motion (SfM) photogrammetry. – In: *Science & Justice* 61, 356-368.
- LASTILLA L., BELLONI V., RAVANELLI R., CRESPI M. (2021): DSM Generation from Single and Cross-Sensor Multi-View Satellite Images Using the New Agisoft Metashape: The Case Studies of Trento and Matera (Italy). – In: *Remote Sensing* 13 (4), 593-615.
- LI X. CHEN Z., ZHANG L., JIA D. (2016): Construction and Accuracy Test of a 3D Model of Non-Metric Camera Images Using Agisoft PhotoScan. – In: *Procedia Environmental Sciences* 36, 184-190.
- LIEDL D. (2019): Messung von kleinskaliger Erosion mittels SfM im hochalpinen Bereich. – Masterarbeit, Universität Wien, Wien.
- LONGUET-HIGGINS H. (1981): A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. – In: *Nature* 293, 133-135.
- LOWE D. 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. – In: *International Journal of Computer Vision* 60 (2), 91-110.
- MATULLA C. (2019): Das Klima der nächsten 100 Jahre. – In: SCHMIDT R., MATULLA C., PSENNER R. (Hrsg.): *Klimawandel in Österreich. Die letzten 20.000 Jahre ... und ein Blick voraus.* – Innsbruck, 165-180.
- MAURI L., STRAFFELINI E., CUCCHIARO S., TAROLLI P. (2021): UAV-SfM 4D mapping of landslides activated in a steep terraced agricultural area. – In: *Journal of Agricultural Engineering* 1130, 1-13.
- MEINEN B. und ROBINSON D. (2020): Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization of UAV image acquisition schemes for SfM-MVS. – In: *Remote Sensing of Environment* 239, 1-10.

- MEUSBURGER K. und ALEWELL C. (2014): Soil Erosion in the Alps. Experience gained from case studies (2006-2013). – Bern.
- MEUSBURGER K., LEITINGER G., MABIT L., MUELLER M., WALTER A., ALEWELL C. (2014): Soil erosion by snow gliding – a first quantification attempt in a subalpine area in Switzerland. – In: *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 3763-3775.
- MILLER C. und THÖNI M. (1995): Origin of eclogites from the Austroalpine Ötztal basement (Tirol, Austria): Geochemistry and Sm-Nd vs. Rb-Sr isotope systematics. – In: *Chemical Geology* 122, 199-225.
- MILLER H. und LANE S. (2018): Biogeomorphic feedbacks and the ecosystem engineering of recently deglaciated terrain. – In: *Progress in Physical Geography* 20 (10), 1-22.
- MORCHE D., BAEWERT H., SCHUCHARDT A., FAUST M., WEBER M., KHAN T. (2019): Fluvial Sediment Transport in the Proglacial Fagge River, Kaunertal, Austria. – In: HECKMANN T. und MORCHE D. (Hrsg.): *Geomorphology of Proglacial Systems. Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes.* – Cham, 219-229.
- MORCHE D., HAAS F., BÄWERT H., HECKMANN T., SCHMIDT K., BECHT M. (2012): Sediment transport in the proglacial Fagge River (Kaunertal/Austria). – In: *IAHS Publ.* 356, 72-80.
- MORGAN J., BROGAN D., NELSON P. (2017): Application of Structure-from-Motion photogrammetry in laboratory flumes. – In: *Geomorphology* 276, 125-143.
- NICOLUSSI K. (2009): Alpine Dendrochronologie – Untersuchungen zur Kenntnis der holozänen Umwelt- und Klimaentwicklung. – In: SCHMIDT R., MATULLA C., PSENNER R. (Hrsg.): *Klimawandel in Österreich. Die letzten 20.000 Jahre ... und ein Blick voraus.* – Innsbruck, 41-54.
- NICOLUSSI K. und PATZELT G. (2006): Klimawandel und Veränderungen an der alpinen Waldgrenze – aktuelle Entwicklungen im Vergleich zur Nacheiszeit. – In: *BFW-Praxisinformation* 10, 3-5.
- NIETHAMMER U., ROTHMUND S., SCHWADERER U., ZEMAN J., JOSWIG M. (2011): Open source image-processing tools for low-cost UAV-based Landslide

- Investigations. – In: ISPRS - International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, 161-166.
- NOUWAKPO S., JAMES M., WELTZ M., HUANG C., CHAGAS I., LIMA L., (2014): Evaluation of Structure from Motion for soil microtopography measurement. – In: The Photogrammetric Record 29 (147), 297-316.
- NOUWAKPO S., WELTZ M., MCGWIRE K. (2016): Assessing the performance of structurefrom-motion photogrammetry and terrestrial LiDAR for reconstructing soil surface microtopography of naturally vegetated plots. – In: Earth Surface Processes and Landforms 41, 308-32.
- OHLEL L., SEELEITNER S., HASELBERGER S., KRAUSHAAR S., OTTO J., MITTER B., JUNKER R. (2021): Manipulation of phyllosphere bacterial communities reversibly altersthe plant microbiome and leaf traits in the field. – In: Alpine Botany 2021, 1-14.
- OVER J., RITCHIE A., KRANENBURG C., BROWN J., BUSCOMBE D., NOBLE T., SHERWOOD C., WARRICK J., WERNETTE P. (2021): Processing Coastal Imagery With Agisoft Metashape Professional Edition, Version 1.6 – Structure From Motion Workflow Documentation. – In: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021-1039, 1-46.
- PAUL F. und BOLCH T. (2019): Glacier Changes Since the Little Ice Age. – In: HECKMANN T. und MORCHE D. (Hrsg.): Geomorphology of Proglacial Systems. Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes. – Cham, 23-42.
- PHUSICOS (2021): Test plots in the Kaunertal Valley; online aufrufbar unter: <https://phusicos.eu/uncategorized/test-plots-in-the-kaunertal-valley> (letzter Aufruf am 8.7.2021).
- PHUSICOS (2021): PHUSICOS information flyer; online aufrufbar unter: <https://phusicos.eu/about> (letzter Aufruf am 6.7.2021).
- PIFFNER O. (2015): Geologie der Alpen. – Bern.

- PIRCHER J., PACHER W., NEUGSCHWANDTNER E. (2013): Kaunertal power station – the new shafts in the fall to the powerhouse. – In: *Geomechanics and Tunnelling* 6, 594-602.
- RONCONI G., BATISTA T., MEROLA V. (2014): The utilization of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for military action in foreign airspace. – In: *UFRGSMUN UFRGS Model United Nations* 2, 137-180.
- SCHMIDT R., MATULLA C., PSENNER R. (2009): Zusammenfassung und Ausblick. – In: SCHMIDT R., MATULLA C., PSENNER R. (Hrsg.): *Klimawandel in Österreich. Die letzten 20.000 Jahre ... und ein Blick voraus.* – Innsbruck, 181-183.
- SEITZ S., CURLESS B., DIEBEL J., SCHARSTEIN D., SZELISKI R. (2006): A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms. – In: *Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1-8.
- SMITH M. und VERICAT D. (2015): From experimental plots to experimental landscapes: topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-from-Motion photogrammetry. – In: *Earth Surface Processes and Landforms* 40, 1656-1671.
- SNAVELY N., SEITZ S., SZELISKI R. (2008): Modeling the World from Internet Photo Collections. – In: *International Journal of Computer Vision* 60, 91-110.
- STOCKER-WALDHUBER M., FISCHER A., HELFRICHT K., KUHN M. (2019): Long-term records of glacier surface velocities in the Ötztal Alps (Austria). – In: *Earth System Science Data* 11, 705-715.
- STOCKER-WALDHUBER M., FISCHER A., KELLER L., MORCHE D., KUHN M. (2017): Funnel-shaped surface depressions – Indicator or accelerant of rapid glacier disintegration? A case study in the Tyrolean Alps. – In: *Geomorphology* 287, 58-72.
- STOCKER-WALDHUBER M. und KUHN M. (2019): Closing the Balances of Ice, Water and Sediment Fluxes Through the Terminus of Gepatschferner. – In: HECKMANN T. und MORCHE D. (Hrsg.): *Geomorphology of Proglacial Systems. Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciaded Alpine Landscapes.* – Cham, 73-83.

- STOTT E., WILLIAMS R., HOEY T. (2020): Ground Control Point Distribution for Accurate Kilometre-Scale Topographic Mapping Using an RTK-GNSS Unmanned Aerial Vehicle and SfM Photogrammetry. – In: *Drones* 4, 55, 1-21.
- STROOSNIJDER L. (2005): Measurement of erosion: Is it possible? – In: *Catena* 64, 162-173.
- SUDHAUS D. (2010): Äußeres Erscheinungsbild – exogene Formungskräfte. – In: Glaser R., Hauter C., Faust D., Glawion R., Saurer H., Schulte A., Sudhaus D. (Hrsg.): *Physische Geographie kompakt*. – Berlin, 27-54.
- TINKHAM W. und SWAYZE N. (2021): Influence of Agisoft Metashape Parameters on UAS Structure from Motion Individual Tree Detection from Canopy Height Models. – In: *Forests* 12, 250-264.
- ULLMAN S. (1978): The interpretation of structure from motion. – In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 203, 405-426.
- ULVI A. (2021): Documentation, Three-Dimensional (3D) Modelling and visualization of cultural heritage by using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry and terrestrial laser scanners. – In: *International Journal of Remote Sensing* 42 (6), 1995-2021.
- UNIVERSITÄT WIEN (2021): Institut für Geographie und Regionalforschung. PHUSICOS, online aufrufbar unter: <https://geographie.univie.ac.at/arbeitsgruppen/engage-geomorphologische-systeme-und-risikoforschung/forschung/laufende-projekte/phusicos> (letzter Aufruf am 08.7.2021).
- UNIVERSITÄT WIEN (2021): Physiogeographie. Tachymeter Leica 1201+, online aufrufbar unter: <https://physio.univie.ac.at/einrichtungen/feldgeraete/geodaesie/leica-tachymeter/> (letzter Aufruf am 30.07.2021).
- VEHLING L. (2016): Gravitative Massenbewegungen an alpinen Felshängen: Quantitative Bedeutung in der Sedimentkaskade proglazialer Geosysteme (Kaunertal, Tirol). – Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Mönchengladbach.

- VEHLING L., BAEWERT H., GLIRA P., MOSER M., ROHN J., MORCHE D. (2017): Quantification of sediment transport by rockfall and rockslide processes on a proglacial rock slope (Kaunertal, Austria). – In: *Geomorphology* 287, 46-57.
- VEHLING L., ROHN J., MOSER M. (2019): Rockfall at Proglacial Rockwalls – A Case Study from the Kaunertal, Austria. – In: HECKMANN T. und MORCHE D. (Hrsg.): *Geomorphology of Proglacial Systems. Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes*. – Cham, 143-156.
- VILLANUEVA J. und BLANCO A. (2018): Optimization of ground control points (GCP) configuration for unmanned aerial vehicle (UAV) survey using structure from Motion (SfM). – In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W12, 167–174.
- WAGNER T., PLESCHBERGER R., KAINZ S., RIBIS M., KELLERER-PIRKLBAUER A., KRAINER K., PHILIPPITSCH R., WINKLER G. (2020): The first consistent inventory of rock glaciers and their hydrological catchments of the Austrian Alps. – In: *Austrian Journal of Earth Sciences* 113 (1), 1-23.
- WARRICK J., RITCHIE A., SCHMIDT K., REID M., LOGAN J. (2019): Characterizing the catastrophic 2017 Mud Creek landslide, California, using repeat structure-from-motion (SfM) photogrammetry. – In: *Landslides* 16, 1201-1219.
- WESTOBY M., BRASINGTON J., GLASSER N., HAMBREY M., REYNOLDS J. (2012): 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. – In: *Geomorphology* 179, 300-314.
- WILLMOTT C. und MATSUURA K. (2005): Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. – In: *Climate Research* 30, 79-82.
- ZANON R. und PERGHER L. (2013): Geologische Evaluierung hochalpiner Speicherstandorte in Tirol / Österreich. – In: 19. Tagung für Ingenieurgeologie mit Forum für junge Ingenieurgeologen München 2013, 401-406.

Ich versichere:

- dass ich die Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- dass alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Publikationen entnommen sind, als solche kenntlich gemacht sind.
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.
- dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Datum

Unterschrift

Anhang

Control Point-RMSE: UAV-Datensatz für Juni 2019

Tab. 1: RMSE der Control Points für die Site L1 im Juni 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L1 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L1_1	Control point	-0,004592	-0,010836	0,000027	0,005	0,011769
L1_2	Control point	0,001658	0,00777	0,005044	0,005	0,009411
L1_3	Control point	0,001807	0,00531	0,003418	0,005	0,006568
L1_4	Control point	0,005249	-0,016715	-0,016025	0,005	0,023743
L1_5	Control point	-0,001247	0,007004	0,007072	0,005	0,010031
L1_6	Control point	-0,002875	0,007466	0,000464	0,005	0,008014
Total	Control points	0,003278	0,009918	0,007574		0,012902

Tab. 2: RMSE der Control Points für die Site S1 im Juni 2019 (UAV-Datensatz)

Site: S1 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S1_1	Control point	-0,028399	0,003053	0,024281	0,005	0,037489
S1_2	Control point	0,015999	-0,030276	0,002253	0,005	0,034317
S1_3	Control point	-0,009281	0,004212	0,014345	0,005	0,017597
S1_4	Control point	0,017903	0,002556	-0,017421	0,005	0,025111
S1_5	Control point	0,003838	-0,01439	0,001088	0,005	0,014933
S1_6	Control point	0,017021	0,019164	0,017637	0,005	0,031113
S1_7	Control point	-0,016835	0,015918	-0,042163	0,005	0,048109
S1_BR1	Control point	-0,024551	-0,023784	-0,001877	0,05	0,034234
Total	Control points	0,018234	0,017116	0,019992		0,032017

Tab. 3: RMSE der Control Points für die Site S5 im Juni 2019 (UAV-Datensatz)

Site: S5 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S5_1	Control point	0,016911	0,015487	-0,009951	0,005	0,024997
S5_2	Control point	0,007383	0,000797	0,007645	0,005	0,010658
S5_3	Control point	-0,016122	0,00443	-0,001539	0,005	0,016790
S5_4	Control point	-0,015797	-0,010392	0,009479	0,005	0,021152
S5_5	Control point	0,000485	-0,004394	0,000921	0,005	0,004516
S5_6	Control point	-0,00022	0,000012	0,00014	0,005	0,000261
S5_7	Control point	0,033462	-0,007153	-0,001079	0,005	0,034235
S5_8	Control point	-0,026102	0,001214	-0,005616	0,005	0,026727
Total	Control points	0,018205	0,007417	0,005950		0,020538

Tab. 4: RMSE der Control Points für die Site L3A im Juni 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L3A - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L3A_1	Control point	0,012674	-0,005799	-0,000311	0,005	0,013941
L3A_2	Control point	0,006385	-0,00009	-0,002386	0,005	0,006817
L3A_3	Control point	0,007922	-0,000522	-0,009896	0,005	0,012687
L3A_4	Control point	-0,019089	-0,000349	0,022243	0,005	0,029313
L3A_5	Control point	0,013742	0,016298	0,004449	0,005	0,021778
L3A_6	Control point	0,004902	-0,002272	-0,009443	0,005	0,010879
L3A_7	Control point	-0,005798	-0,008344	-0,009235	0,005	0,013730
L3A_8	Control point	-0,020739	0,001078	0,004579	0,005	0,021266
Total	Control points	0,012773	0,006852	0,010085		0,017658

Tab. 5: RMSE der Control Points für die Site L4A im Juni 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L4A - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L4A_1	Control point	1,69922	1,055608	-0,155056	0,005	2,006415
L4A_2	Control point	-0,657889	0,172405	0,356166	0,005	0,767721
L4A_3	Control point	0,350207	0,669509	0,237146	0,005	0,791913
L4A_4	Control point	-0,651073	-2,459689	-1,03456	0,005	2,746685
L4A_5	Control point	-0,740464	0,562167	0,596304	0,005	1,104490
Total	Control points	0,939680	1,261616	0,571494		1,673702

Tab. 6: RMSE der Control Points für die Site L5A im Juni 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L5A - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L5A_1	Control point	-0,004135	-0,014832	0,010573	0,005	0,018678
L5A_2	Control point	0,017432	0,027861	-0,006566	0,005	0,033515
L5A_3	Control point	0,046441	0,010012	-0,038674	0,005	0,061259
L5A_4	Control point	0,013354	0,022882	0,010809	0,005	0,028614
L5A_5	Control point	-0,043986	0,019931	0,005222	0,005	0,048572
L5A_6	Control point	-0,027199	-0,059916	0,037359	0,005	0,075666
L5A_7	Control point	-0,001434	-0,005593	-0,01891	0,005	0,019772
L5A_BR1	Control point	-0,047407	-0,03452	0,018697	0,05	0,061552
Total	Control points	0,030782	0,029219	0,022072		0,047838

Tab. 7: RMSE der Control Points für die Site L6 im Juni 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L6 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L6_1	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_2	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_3	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_4	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_5	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_6	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_7	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
Total	Control points	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!

Control Point-RMSE: UAV-Datensatz für Oktober 2019)

Tab. 8: RMSE der Control Points für die Site L1 im Oktober 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L1 - Oktober 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L1_1	Control point	0,008582	-0,022539	0,000974	0,005	0,024137
L1_2	Control point	-0,001031	-0,003405	0,004604	0,005	0,005818
L1_3	Control point	-0,003698	0,008785	-0,002027	0,005	0,009745
L1_4	Control point	0,00619	-0,002504	-0,007828	0,005	0,010289
L1_5	Control point	0,007828	0,008439	-0,007976	0,005	0,014004
L1_6	Control point	0,017574	-0,010121	-0,000113	0,005	0,020280
L1_7	Control point	-0,035927	0,021239	0,013772	0,005	0,043949
Total	Control points	0,015980	0,013244	0,006978		0,021897

Tab. 9: RMSE der Control Points für die Site S1 im Oktober 2019 (UAV-Datensatz)

Site: S1 - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S1_1	Control point	-0,009287	-0,004963	-0,008869	0,005	0,013767
S1_2	Control point	0,010305	0,006754	0,009405	0,005	0,015500
S1_3	Control point	-0,006066	-0,000606	-0,008171	0,005	0,010195
S1_4	Control point	-0,011914	0,007841	0,001382	0,005	0,014330
S1_5	Control point	0,000694	-0,015012	0,001868	0,005	0,015144
S1_6	Control point	0,012932	-0,003422	0,003106	0,005	0,013733
S1_7	Control point	0,003413	0,009524	0,001284	0,005	0,010198
S1_BR1	Control point	-0,007582	-0,011625	-0,000518	0,05	0,013889
Total	Control points	0,008718	0,008624	0,005600		0,013481

Tab. 10: RMSE der Control Points für die Site S5 im Oktober 2019 (UAV-Datensatz)

Site: S5 - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S5_1	Control point	0,008969	-0,006137	-0,020243	0,005	0,022976
S5_2	Control point	0,006455	0,022395	0,019904	0,005	0,030649
S5_3	Control point	-0,005942	0,017745	0,019568	0,005	0,027076
S5_4	Control point	-0,029746	-0,040848	-0,040936	0,005	0,065032
S5_5	Control point	0,015645	0,001005	0,028518	0,005	0,032543
S5_6	Control point	0,000656	0,003897	0,001664	0,005	0,004288
S5_7	Control point	0,020862	0,007316	-0,006006	0,005	0,022909
S5_8	Control point	-0,016899	-0,005373	-0,002469	0,005	0,017904
Total	Control points	0,015844	0,018101	0,021572		0,032312

Tab. 11: RMSE der Control Points für die Site L3A im Oktober 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L3A - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L3A_1	Control point	0,007902	-0,005371	0,001576	0,005	0,009684
L3A_2	Control point	-0,003849	0,00711	0,002852	0,005	0,008573
L3A_3	Control point	0,006718	0,006529	0,004225	0,005	0,010277
L3A_4	Control point	-0,005405	-0,000268	-0,003771	0,005	0,006596
L3A_5	Control point	-0,00742	-0,006585	-0,008942	0,005	0,013356
L3A_6	Control point	-0,00455	0,005527	0,004286	0,005	0,008344
L3A_7	Control point	0,01756	-0,000835	0,008324	0,005	0,019451
L3A_8	Control point	-0,010957	-0,006106	-0,00855	0,005	0,015180
Total	Control points	0,009054	0,005408	0,005952		0,012110

Tab. 12: RMSE der Control Points für die Site L4A im Oktober 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L4A - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L4A_1	Control point	0,000809	0,004441	-0,007338	0,005	0,008615
L4A_2	Control point	-0,001557	-0,013975	0,000648	0,005	0,014076
L4A_3	Control point	0,003531	-0,002027	-0,004524	0,005	0,006086
L4A_4	Control point	0,008638	0,017804	-0,003378	0,005	0,020075
L4A_5	Control point	-0,011421	-0,006243	0,014591	0,005	0,019553
Total	Control points	0,006642	0,010725	0,007734		0,014797

Tab. 13: RMSE der Control Points für die Site L5A im Oktober 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L5A - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L5A_1	Control point	-0,001266	-0,012685	0,001873	0,005	0,012885
L5A_2	Control point	0,010336	0,003306	-0,002293	0,005	0,011091
L5A_3	Control point	0,030273	-0,003279	-0,023108	0,005	0,038225
L5A_4	Control point	-0,006392	0,00204	-0,00114	0,005	0,006806
L5A_5	Control point	0,001383	0,01221	0,010013	0,005	0,015851
L5A_6	Control point	-0,022718	-0,001162	0,011925	0,005	0,025684
L5A_7	Control point	-0,011307	-0,000352	0,002753	0,005	0,011643
L5A_BR1	Control point	-0,030861	-0,00785	-0,002301	0,05	0,031927
Total	Control points	0,018248	0,007062	0,009996		0,021973

Tab. 14: RMSE der Control Points für die Site L6 im Oktober 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L6 - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L6_1	Control point	-0,039166	-0,017915	0,016133	0,005	0,045991
L6_2	Control point	0,000239	-0,005779	-0,05352	0,005	0,053832
L6_3	Control point	0,071364	-0,005077	0,063929	0,005	0,095945
L6_4	Control point	-0,037078	0,029254	-0,015208	0,005	0,049617
L6_5	Control point	-0,002699	0,002564	-0,009979	0,005	0,010651
L6_6	Control point	0,002202	-0,013286	0,005563	0,005	0,014571
L6_7	Control point	0,005139	0,010239	-0,006918	0,005	0,013383
Total	Control points	0,033891	0,014754	0,032996		0,049548

Check Point-RMSE: UAV-Datensatz für Juni 2019)

Tab. 15: RMSE der Check Points für die Site L1 im Juni 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L1 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L1_1	Check point	-0,009035	-0,02559	-0,00987	0,005	0,028877
L1_2	Check point	0,002366	0,012547	0,006481	0,005	0,014319
L1_3	Check point	0,006319	0,012132	0,007573	0,005	0,015635
L1_4	Check point	-0,00253	-0,021317	-0,029461	0,005	0,036452
L1_5	Check point	0,001749	0,007378	0,023314	0,005	0,024516
L1_6	Check point	-0,015409	0,022635	-0,035713	0,005	0,045002
Total	Check points	0,007896	0,018169	0,021923		0,029548

Tab. 16: RMSE der Check Points für die Site S1 im Juni 2019 (UAV-Datensatz)

Site: S1 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S1_1	Check point	-0,042645	0,010536	0,050304	0,005	0,066784
S1_2	Check point	0,027593	-0,052948	-0,010299	0,005	0,060588
S1_3	Check point	-0,012143	0,011115	0,030297	0,005	0,034480
S1_4	Check point	0,027286	0,003053	-0,030573	0,005	0,041092
S1_5	Check point	0,004755	-0,019809	0,000671	0,005	0,020383
S1_6	Check point	0,025288	0,029048	0,031524	0,005	0,049770
S1_7	Check point	-0,026172	0,016165	-0,070011	0,005	0,076471
S1_BR1	Check point	-0,024627	-0,02387	-0,00191	0,05	0,034350
Total	Check points	0,026042	0,025285	0,036036		0,051148

Tab. 17: RMSE der Check Points für die Site S5 im Juni 2019 (UAV-Datensatz)

Site: S5 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S5_1	Check point	0,030443	0,025579	-0,013476	0,005	0,041984
S5_2	Check point	0,011874	0,005033	0,019857	0,005	0,023677
S5_3	Check point	-0,032186	0,016726	0,008041	0,005	0,037153
S5_4	Check point	-0,028846	-0,021806	0,002931	0,005	0,036279
S5_5	Check point	0,044275	-0,048814	0,063618	0,005	0,091599
S5_6	Check point	-0,121552	-0,062191	-0,260888	0,005	0,294457
S5_7	Check point	0,082847	-0,006903	0,021174	0,005	0,085788
S5_8	Check point	-0,037288	0,000137	-0,012028	0,005	0,039180
Total	Check points	0,059081	0,031091	0,095755		0,116732

Tab. 18: RMSE der Check Points für die Site L3A im Juni 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L3A - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L3A_1	Check point	0,019422	-0,008509	-0,001547	0,005	0,021261
L3A_2	Check point	0,008839	-0,000053	-0,003565	0,005	0,009531
L3A_3	Check point	0,012081	-0,000077	-0,017375	0,005	0,021162
L3A_4	Check point	-0,025423	-0,00228	0,033135	0,005	0,041826
L3A_5	Check point	0,020562	0,024033	0,004482	0,005	0,031945
L3A_6	Check point	0,007095	-0,003063	-0,014123	0,005	0,016099
L3A_7	Check point	-0,007221	-0,011159	-0,014774	0,005	0,019873
L3A_8	Check point	-0,027708	0,000187	0,011119	0,005	0,029856
Total	Check points	0,017821	0,009932	0,015718		0,025754

Tab. 19: RMSE der Check Points für die Site L4A im Juni 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L4A - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L4A_1	Check point	3,390307	2,069972	-0,2966	0,005	3,983332
L4A_2	Check point	-1,338033	0,471894	0,590941	0,005	1,536954
L4A_3	Check point	0,836023	1,759402	0,498566	0,005	2,010721
L4A_4	Check point	-0,952547	-3,349557	-1,5079	0,005	3,794818
L4A_5	Check point	-1,021585	0,777052	0,825708	0,005	1,526185
Total	Check points	1,785185	1,971107	0,853382		2,792921

Tab. 20: RMSE der Check Points für die Site L5A im Juni 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L5A - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L5A_1	Check point	-0,001022	-0,034503	0,033155	0,005	0,047862
L5A_2	Check point	0,035879	0,038805	-0,029329	0,005	0,060443
L5A_3	Check point	0,064421	0,008184	-0,066404	0,005	0,092879
L5A_4	Check point	0,042763	0,063205	0,041223	0,005	0,086735
L5A_5	Check point	-0,105165	0,053672	-0,005906	0,005	0,118217
L5A_6	Check point	-0,02616	-0,10478	0,108688	0,005	0,153220
L5A_7	Check point	-0,011169	-0,010321	-0,067048	0,005	0,068751
L5A_BR1	Check point	-0,047733	-0,034664	0,018882	0,05	0,061940
Total	Check points	0,051738	0,052352	0,055642		0,092269

Tab. 21: RMSE der Check Points für die Site L6 im Juni 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L6 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L6_1	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_2	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_3	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_4	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_5	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_6	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_7	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
Total	Check points	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!

Check Point-RMSE: UAV-Datensatz für Oktober 2019)

Tab. 22: RMSE der Check Points für die Site L1 im Oktober 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L1 - Oktober 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L1_1	Check point	0,008175	-0,036965	0,000835	0,005	0,037867
L1_2	Check point	-0,00098	-0,005292	0,012314	0,005	0,013439
L1_3	Check point	-0,006366	0,007925	-0,019617	0,005	0,022094
L1_4	Check point	0,015986	-0,002218	-0,003712	0,005	0,016561
L1_5	Check point	0,0088	0,016527	-0,018196	0,005	0,026109
L1_6	Check point	0,021013	-0,012787	-0,014542	0,005	0,028575
L1_7	Check point	-0,054619	0,033957	0,043382	0,005	0,077578
Total	Check points	0,023501	0,020880	0,020617		0,037595

Tab. 23: RMSE der Check Points für die Site S1 im Oktober 2019 (UAV-Datensatz)

Site: S1 - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S1_1	Check point	-0,01498	-0,010697	-0,019799	0,005	0,027034
S1_2	Check point	0,01723	0,014817	0,021464	0,005	0,031259
S1_3	Check point	-0,0115	-0,004301	-0,01874	0,005	0,022404
S1_4	Check point	-0,024759	0,012293	-0,007419	0,005	0,028621
S1_5	Check point	0,000712	-0,020862	0,001852	0,005	0,020956
S1_6	Check point	0,017834	-0,004262	0,006097	0,005	0,019323
S1_7	Check point	0,005312	0,015113	0,003672	0,005	0,016435
S1_BR1	Check point	-0,007606	-0,011665	-0,000528	0,05	0,013936
Total	Check points	0,014453	0,012852	0,012813		0,023200

Tab. 24: RMSE der Check Points für die Site S5 im Oktober 2019 (UAV-Datensatz)

Site: S5 - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S5_1	Check point	0,01027	-0,011794	-0,036989	0,005	0,040159
S5_2	Check point	0,010265	0,032221	0,031131	0,005	0,045964
S5_3	Check point	-0,004659	0,027084	0,034557	0,005	0,044152
S5_4	Check point	-0,0531	-0,065429	-0,091446	0,005	0,124350
S5_5	Check point	0,026861	0,005671	0,051441	0,005	0,058308
S5_6	Check point	0,001016	0,005389	0,002585	0,005	0,006063
S5_7	Check point	0,029492	0,01064	-0,006911	0,005	0,032105
S5_8	Check point	-0,02159	-0,007493	-0,005363	0,005	0,023474
Total	Check points	0,025275	0,028334	0,042754		0,057180

Tab. 25: RMSE der Check Points für die Site L3A im Oktober 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L3A - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L3A_1	Check point	0,011187	-0,007038	0,000412	0,005	0,013223
L3A_2	Check point	-0,005578	0,010015	0,003021	0,005	0,011855
L3A_3	Check point	0,008872	0,008054	0,004792	0,005	0,012905
L3A_4	Check point	-0,006717	-0,001473	-0,003399	0,005	0,007671
L3A_5	Check point	-0,010599	-0,010054	-0,01335	0,005	0,019790
L3A_6	Check point	-0,006022	0,007945	0,005832	0,005	0,011550
L3A_7	Check point	0,025519	-0,000254	0,009037	0,005	0,027073
L3A_8	Check point	-0,013194	0,00694	-0,006999	0,005	0,016469
Total	Check points	0,012520	0,007326	0,006953		0,016086

Tab. 26: RMSE der Check Points für die Site L4A im Oktober 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L4A - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L4A_1	Check point	-0,002781	0,018413	-0,032746	0,005	0,037671
L4A_2	Check point	0,002569	-0,027686	0,012951	0,005	0,030673
L4A_3	Check point	0,005649	-0,003099	-0,00791	0,005	0,010202
L4A_4	Check point	0,01189	0,029635	-0,009132	0,005	0,033211
L4A_5	Check point	-0,013687	-0,013632	0,031119	0,005	0,036627
Total	Check points	0,008660	0,020877	0,021700		0,031332

Tab. 27: RMSE der Check Points für die Site L5A im Oktober 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L5A - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L5A_1	Check point	-0,0014	-0,019986	0,003519	0,005	0,020342
L5A_2	Check point	0,016437	0,002572	-0,004777	0,005	0,017309
L5A_3	Check point	0,035672	-0,003894	-0,033893	0,005	0,049360
L5A_4	Check point	-0,036087	0,004179	-0,093898	0,005	0,100681
L5A_5	Check point	0,005532	0,019573	0,024589	0,005	0,031911
L5A_6	Check point	-0,031146	-0,001515	0,016106	0,005	0,035097
L5A_7	Check point	-0,02155	-0,0002	0,00236	0,005	0,021680
L5A_BR1	Check point	-0,03097	-0,007856	-0,002361	0,05	0,032038
Total	Check points	0,025669	0,010523	0,036871		0,046142

Tab. 28: RMSE der Check Points für die Site L6 im Oktober 2019 (UAV-Datensatz)

Site: L6 - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L6_1	Check point	-0,075204	-0,024084	0,077676	0,005	0,110767
L6_2	Check point	0,035735	-0,012794	-0,134833	0,005	0,140074
L6_3	Check point	0,066591	-0,010853	0,161905	0,005	0,175401
L6_4	Check point	-0,051089	0,041738	-0,011057	0,005	0,066891
L6_5	Check point	-0,003486	-0,015505	-0,044952	0,005	0,047679
L6_6	Check point	-0,028627	-0,082052	-0,098838	0,005	0,131609
L6_7	Check point	0,006423	0,008855	-0,033421	0,005	0,035166
Total	Check points	0,046059	0,037139	0,095211		0,112097

Control Point-RMSE: Datensatz mit UAV- und terrestrischen Aufnahmen, Juni 2019)

Tab. 29: RMSE der Control Points für die Site L1 im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L1 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L1_1	Control point	-0,000064	-0,008726	-0,00318	0,005	0,009288
L1_2	Control point	0,000171	0,00475	0,002645	0,005	0,005439
L1_3	Control point	0,00036	0,003906	-0,000767	0,005	0,003997
L1_4	Control point	0,008774	-0,004479	-0,001666	0,005	0,009991
L1_5	Control point	-0,009106	0,008262	-0,006517	0,005	0,013916
L1_6	Control point	-0,000134	-0,003712	0,009486	0,005	0,010187
Total	Control points	0,005165	0,006001	0,005049		0,009390

Tab. 30: RMSE der Control Points für die Site S1 im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: S1 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S1_1	Control point	-0,046169	-0,028821	-0,038778	0,005	0,066828
S1_2	Control point	0,037292	0,003665	-0,030643	0,005	0,048406
S1_3	Control point	0,079895	0,082891	0,077115	0,005	0,138567
S1_4	Control point	-0,228247	-0,037732	-0,184575	0,005	0,295953
S1_5	Control point	0,102665	0,015102	0,10774	0,005	0,149586
S1_6	Control point	0,076579	-0,005027	0,102257	0,005	0,127852
S1_7	Control point	-0,021791	-0,029853	-0,032415	0,005	0,049161
S1_BR1	Control point	-0,022383	-0,022501	-0,070125	0,05	0,076973
Total	Control points	0,099613	0,036725	0,093868		0,141714

Tab. 31: RMSE der Control Points für die Site S5 im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: S5 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S5_1	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
S5_2	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
S5_3	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
S5_4	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
S5_5	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
S5_6	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
S5_7	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
S5_8	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
Total	Control points	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!

Tab. 32: RMSE der Control Points für die Site L3A im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L3A - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L3A_1	Control point	-0,013272	0,034337	-0,003997	0,005	0,037029
L3A_2	Control point	-0,063358	0,054835	-0,071602	0,005	0,110218
L3A_3	Control point	-0,097301	0,072097	-0,103807	0,005	0,159503
L3A_4	Control point	0,987968	-1,795042	0,330702	0,005	2,075481
L3A_5	Control point	-0,156012	0,313466	-0,036945	0,005	0,352088
L3A_6	Control point	-0,140001	0,313382	-0,019976	0,005	0,343813
L3A_7	Control point	-0,121605	0,295571	0,052008	0,005	0,323813
L3A_8	Control point	-0,07846	0,167778	0,055941	0,005	0,193481
Total	Control points	0,363081	0,665539	0,128880		0,769013

Tab. 33: RMSE der Control Points für die Site L4A im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L4A - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L4A_1	Control point	1,682471	1,009203	-0,157588	0,005	1,968256
L4A_2	Control point	-0,656395	0,256624	0,383392	0,005	0,802309
L4A_3	Control point	0,292363	0,611006	0,244233	0,005	0,720038
L4A_4	Control point	-0,601637	-2,43919	-1,037338	0,005	2,718030
L4A_5	Control point	-0,716802	0,562357	0,567338	0,005	1,073277
Total	Control points	0,919001	1,242865	0,570862		1,647774

Tab. 34: RMSE der Control Points für die Site L5A im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L5A - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L5A_1	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L5A_2	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L5A_3	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L5A_4	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L5A_5	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L5A_6	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L5A_7	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L5A_BR1	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,05	0
Total	Control points	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!

Tab. 35: RMSE der Control Points für die Site L6 im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L6 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L6_1	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_2	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_3	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_4	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_5	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_6	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
L6_7	Control point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
Total	Control points	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!

Control Point-RMSE: Datensatz mit UAV- und terrestrischen Aufnahmen, Oktober 2019)

Tab. 36: RMSE der Control Points für die Site L1 im Oktober 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L1 - Oktober 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L1_1	Control point	0,000124	-0,031389	-0,00202	0,005	0,031454
L1_2	Control point	0,000618	-0,00581	-0,000791	0,005	0,005896
L1_3	Control point	0,003459	0,003823	-0,002305	0,005	0,005647
L1_4	Control point	0,024388	0,004573	-0,001406	0,005	0,024853
L1_5	Control point	-0,000843	0,01613	-0,022354	0,005	0,027579
L1_6	Control point	0,010377	-0,006473	-0,012779	0,005	0,017689
L1_7	Control point	-0,037072	0,019274	0,040656	0,005	0,058299
Total	Control points	0,017279	0,015712	0,018236		0,029631

Tab. 37: RMSE der Control Points für die Site S1 im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: S1 - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S1_1	Control point	-0,009225	-0,011845	-0,004007	0,005	0,015539
S1_2	Control point	0,019065	0,005983	0,005801	0,005	0,020807
S1_3	Control point	-0,005371	0,003225	-0,008282	0,005	0,010385
S1_4	Control point	-0,010517	0,008108	0,001765	0,005	0,013396
S1_5	Control point	-0,002143	-0,011184	-0,002543	0,005	0,011668
S1_6	Control point	0,008192	-0,000178	0,002699	0,005	0,008627
S1_7	Control point	0,000005	0,006017	0,004601	0,005	0,007575
S1_BR1	Control point	-0,00063	-0,012528	-0,003482	0,05	0,013018
Total	Control points	0,009084	0,008445	0,004589		0,013224

Tab. 38: RMSE der Control Points für die Site S5 im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: S5 - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S5_1	Control point	0,010499	-0,007412	-0,005941	0,005	0,014158
S5_2	Control point	0,005517	0,016574	0,006131	0,005	0,018513
S5_3	Control point	-0,007782	0,009925	-0,004303	0,005	0,013326
S5_4	Control point	-0,000056	-0,017962	0,005645	0,005	0,018828
S5_5	Control point	-0,004621	-0,00065	-0,003236	0,005	0,005679
S5_6	Control point	-0,003127	0,005344	0,000489	0,005	0,006211
S5_7	Control point	0,01956	0,005403	0,001981	0,005	0,020389
S5_8	Control point	-0,01999	-0,011221	-0,000766	0,005	0,022937
Total	Control points	0,011261	0,010810	0,004161		0,016155

Tab. 39: RMSE der Control Points für die Site L3A im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L3A - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L3A_1	Control point	0,005022	-0,005702	-0,000952	0,005	0,007658
L3A_2	Control point	-0,004455	0,00606	0,000052	0,005	0,007522
L3A_3	Control point	0,008487	0,004866	0,005448	0,005	0,011198
L3A_4	Control point	-0,003207	-0,000534	-0,007301	0,005	0,007992
L3A_5	Control point	-0,006164	-0,006886	0,001321	0,005	0,009336
L3A_6	Control point	-0,003286	0,006444	-0,000612	0,005	0,007259
L3A_7	Control point	0,013863	0,000304	0,001337	0,005	0,013931
L3A_8	Control point	-0,010259	-0,004551	0,000707	0,005	0,011245
Total	Control points	0,007694	0,005037	0,003322		0,009778

Tab. 40: RMSE der Control Points für die Site L4A im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L4A - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L4A_1	Control point	-0,001805	0,001854	0,00208	0,005	0,003320
L4A_2	Control point	0,001269	-0,010358	-0,008007	0,005	0,013153
L4A_3	Control point	0,002098	-0,005614	0,000413	0,005	0,006007
L4A_4	Control point	0,006504	0,01836	0,003425	0,005	0,019777
L4A_5	Control point	-0,008067	-0,004237	0,002077	0,005	0,009346
Total	Control points	0,004830	0,009973	0,004115		0,011820

Tab. 41: RMSE der Control Points für die Site L5A im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L5A - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L5A_1	Control point	0,004466	-0,024408	0,007147	0,005	0,025822
L5A_2	Control point	-0,010726	0,009	0,007546	0,005	0,015906
L5A_3	Control point	0,016499	-0,000778	-0,020667	0,005	0,026457
L5A_4	Control point	-0,009791	-0,001833	0,00053	0,005	0,009975
L5A_5	Control point	0,020033	0,003221	0,002116	0,005	0,020400
L5A_6	Control point	-0,020255	-0,000057	0,008095	0,005	0,021813
L5A_7	Control point	-0,000041	0,014954	-0,004836	0,005	0,015717
L5A_BR1	Control point	-0,018523	-0,009868	0,00698	0,05	0,022118
Total	Control points	0,014395	0,011248	0,009203		0,020455

Tab. 42: RMSE der Control Points für die Site L6 im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L6 - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L6_1	Control point	-0,004631	-0,013629	-0,043068	0,005	0,045410
L6_2	Control point	-0,032007	-0,020696	0,034647	0,005	0,051509
L6_3	Control point	0,076337	-0,018628	0,058301	0,005	0,097843
L6_4	Control point	-0,037941	0,051757	-0,055875	0,005	0,085090
L6_5	Control point	0,021126	0,031498	-0,024168	0,005	0,044972
L6_6	Control point	-0,020281	-0,035881	0,026259	0,005	0,048870
L6_7	Control point	0,007357	0,0065	-0,00487	0,005	0,010959
Total	Control points	0,036301	0,029183	0,039413		0,061015

Check Point-RMSE: Datensatz mit UAV- und terrestrischen Aufnahmen, Juni 2019)

Tab. 43: RMSE der Check Points für die Site L1 im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L1 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L1_1	Check point	-0,004269	-0,016322	-0,011095	0,005	0,020192
L1_2	Check point	0,0005	0,007037	0,004236	0,005	0,008229
L1_3	Check point	0,000584	0,005391	-0,001759	0,005	0,005701
L1_4	Check point	0,01566	-0,007345	-0,003303	0,005	0,017609
L1_5	Check point	-0,019746	0,016032	-0,017753	0,005	0,031018
L1_6	Check point	0,007008	-0,007608	0,026721	0,005	0,028653
Total	Check points	0,010825	0,010908	0,014049		0,020821

Tab. 44: RMSE der Check Points für die Site S1 im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: S1 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S1_1	Check point	-0,086402	-0,070763	-0,106633	0,005	0,154413
S1_2	Check point	0,079206	0,015337	-0,068355	0,005	0,105741
S1_3	Check point	0,162646	0,167736	0,190772	0,005	0,301634
S1_4	Check point	-0,536265	-0,128145	-0,593067	0,005	0,809771
S1_5	Check point	0,168302	0,019059	0,211421	0,005	0,270902
S1_6	Check point	0,129044	-0,01588	0,204524	0,005	0,242352
S1_7	Check point	-0,044261	-0,076446	-0,059674	0,005	0,106602
S1_BR1	Check point	-0,022151	-0,022241	-0,080446	0,05	0,086353
Total	Check points	0,216564	0,084227	0,250182		0,341446

Tab. 45: RMSE der Check Points für die Site S5 im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: S5 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S5_1	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
S5_2	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
S5_3	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
S5_4	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
S5_5	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
S5_6	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
S5_7	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
S5_8	Check point	n.a.	n.a.	n.a.	0,005	0
Total	Check points	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!

Tab. 46: RMSE der Check Points für die Site L3A im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L3A - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L3A_1	Check point	-0,21038	0,0515	-0,011456	0,005	0,216895
L3A_2	Check point	-0,095116	0,077672	-0,108902	0,005	0,164133
L3A_3	Check point	-0,130509	0,104716	-0,189871	0,005	0,253079
L3A_4	Check point	1,198258	-2,217865	0,423815	0,005	2,556241
L3A_5	Check point	-0,226487	0,516269	-0,142023	0,005	0,581378
L3A_6	Check point	-0,209828	0,468349	-0,036326	0,005	0,514488
L3A_7	Check point	-0,174309	0,431517	0,075578	0,005	0,471490
L3A_8	Check point	-0,103815	0,208366	0,088516	0,005	0,249056
Total	Check points	0,453134	0,840690	0,181211		0,972074

Tab. 47: RMSE der Check Points für die Site L4A im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L4A - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L4A_1	Check point	3,360437	2,043708	-0,301637	0,005	3,944650
L4A_2	Check point	1,440014	0,735641	0,512597	0,005	1,696338
L4A_3	Check point	0,767199	1,602736	0,512061	0,005	1,849206
L4A_4	Check point	-0,872209	-3,372056	-1,499986	0,005	3,792291
L4A_5	Check point	-0,997905	0,774753	0,792396	0,005	1,491291
Total	Check points	1,772644	1,962533	0,835918		2,773547

Tab. 48: RMSE der Check Points für die Site L5A im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L5A - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L5A_1	Check point	n.a	n.a	n.a	0,005	0
L5A_2	Check point	n.a	n.a	n.a	0,005	0
L5A_3	Check point	n.a	n.a	n.a	0,005	0
L5A_4	Check point	n.a	n.a	n.a	0,005	0
L5A_5	Check point	n.a	n.a	n.a	0,005	0
L5A_6	Check point	n.a	n.a	n.a	0,005	0
L5A_7	Check point	n.a	n.a	n.a	0,005	0
L5A_BR1	Check point	n.a	n.a	n.a	0,05	0
Total	Check points	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!

Tab. 49: RMSE der Check Points für die Site L6 im Juni 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L6 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L6_1	Check point	n.a	n.a	n.a	0,005	0
L6_2	Check point	n.a	n.a	n.a	0,005	0
L6_3	Check point	n.a	n.a	n.a	0,005	0
L6_4	Check point	n.a	n.a	n.a	0,005	0
L6_5	Check point	n.a	n.a	n.a	0,005	0
L6_6	Check point	n.a	n.a	n.a	0,005	0
L6_7	Check point	n.a	n.a	n.a	0,005	0
Total	Check points	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!

Check Point-RMSE: Datensatz mit UAV- und terrestrischen Aufnahmen, Oktober 2019)

Tab. 50: RMSE der Check Points für die Site L1 im Oktober 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L1 - Oktober 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L1_1	Check point	0,005437	-0,045815	0,00011	0,005	0,046137
L1_2	Check point	0,00025	-0,008292	0,002985	0,005	0,008816
L1_3	Check point	0,000803	0,004351	-0,004245	0,005	0,006132
L1_4	Check point	0,027516	0,007322	-0,012011	0,005	0,030903
L1_5	Check point	0,004591	0,02706	-0,022841	0,005	0,035708
L1_6	Check point	0,013668	-0,009753	-0,023014	0,005	0,028488
L1_7	Check point	-0,053732	0,029495	0,062477	0,005	0,087524
Total	Check points	0,023551	0,023717	0,027061		0,043005

Tab. 51: RMSE der Check Points für die Site S1 im Oktober 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: S1 - Oktober 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S1_1	Check point	-0,014669	-0,020535	-0,011402	0,005	0,027692
S1_2	Check point	0,030723	0,012522	0,014764	0,005	0,036314
S1_3	Check point	-0,008929	0,00317	-0,018614	0,005	0,020887
S1_4	Check point	-0,018147	0,015347	0,010357	0,005	0,025925
S1_5	Check point	-0,002966	-0,015874	-0,005047	0,005	0,016919
S1_6	Check point	0,01115	0,00009	0,003956	0,005	0,011831
S1_7	Check point	0,000431	0,009874	0,008757	0,005	0,013205
S1_BR1	Check point	-0,000634	-0,012574	-0,003504	0,05	0,013068
Total	Check points	0,014585	0,012902	0,010792		0,022263

Tab. 52: RMSE der Check Points für die Site S5 im Oktober 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: S5 - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
S5_1	Check point	0,014731	-0,011824	-0,01085	0,005	0,021784
S5_2	Check point	0,008617	0,023957	0,011224	0,005	0,027824
S5_3	Check point	-0,011765	0,012471	-0,008452	0,005	0,019115
S5_4	Check point	0,044823	0,00325	0,096463	0,005	0,106418
S5_5	Check point	-0,008266	-0,002276	-0,0088	0,005	0,012286
S5_6	Check point	-0,004176	0,007287	0,000764	0,005	0,008433
S5_7	Check point	0,028712	0,008962	0,006366	0,005	0,030744
S5_8	Check point	-0,025779	-0,014998	-0,004015	0,005	0,030093
Total	Check points	0,022398	0,012467	0,034919		0,043318

Tab. 53: RMSE der Check Points für die Site L3A im Oktober 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L3A - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L3A_1	Check point	0,007705	-0,008471	-0,001961	0,005	0,011618
L3A_2	Check point	-0,006122	0,008141	0,00008	0,005	0,010186
L3A_3	Check point	0,010969	0,006234	0,007542	0,005	0,014699
L3A_4	Check point	-0,003371	-0,00046	-0,009637	0,005	0,010220
L3A_5	Check point	-0,009434	-0,010136	0,003244	0,005	0,014222
L3A_6	Check point	-0,004588	0,009009	-0,000902	0,005	0,010150
L3A_7	Check point	0,019892	0,000781	0,000129	0,005	0,019908
L3A_8	Check point	-0,013556	-0,006124	0,003401	0,005	0,015259
Total	Check points	0,010712	0,007063	0,004697		0,013664

Tab. 54: RMSE der Check Points für die Site L4A im Oktober 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L4A - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L4A_1	Check point	-0,004655	0,004857	0,006406	0,005	0,009290
L4A_2	Check point	0,000394	-0,014071	-0,015486	0,005	0,020928
L4A_3	Check point	0,003661	-0,009373	0,001133	0,005	0,010126
L4A_4	Check point	0,009459	0,029334	0,004158	0,005	0,031101
L4A_5	Check point	-0,011999	-0,006683	0,003884	0,005	0,014273
Total	Check points	0,007330	0,015586	0,007931		0,018962

Tab. 55: RMSE der Check Points für die Site L5A im Oktober 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L5A - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L5A_1	Check point	0,013071	-0,043274	0,02187	0,005	0,050217
L5A_2	Check point	-0,014979	0,012358	0,011741	0,005	0,022692
L5A_3	Check point	0,018459	-0,000701	-0,034621	0,005	0,039241
L5A_4	Check point	-0,038056	-0,002773	-0,070879	0,005	0,080497
L5A_5	Check point	0,040111	0,003707	0,014668	0,005	0,042869
L5A_6	Check point	-0,031918	0,00015	0,012505	0,005	0,034281
L5A_7	Check point	-0,004232	0,029431	-0,018798	0,005	0,035178
L5A_BR1	Check point	-0,018581	-0,009891	0,006991	0,05	0,022180
Total	Check points	0,025434	0,019401	0,030847		0,044439

Tab. 56: RMSE der Check Points für die Site L6 im Oktober 2019 (Datensatz: UAV- und terrestrische Aufnahmen)

Site: L6 - October 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L6_1	Check point	0,012762	-0,032904	-0,118665	0,005	0,123802
L6_2	Check point	-0,05801	-0,029973	0,07385	0,005	0,098577
L6_3	Check point	0,096751	-0,025261	0,095495	0,005	0,138268
L6_4	Check point	-0,041377	0,055157	-0,094365	0,005	0,116872
L6_5	Check point	0,033933	0,037008	-0,045562	0,005	0,067801
L6_6	Check point	-0,025228	-0,034182	0,110104	0,005	0,118016
L6_7	Check point	0,01073	0,017198	0,01492	0,005	0,025170
Total	Check points	0,048556	0,034837	0,086173		0,104867

Control Point-RMSE: Terrestrischer Datensatz für Juni 2019

Tab 57: RMSE der Control Points für die Site L6 im Juni 2019 (terrestrischer Datensatz)

Site: L6 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L6_1	Control point	0,009901	0,019218	0,000735	0,005	0,021631
L6_2	Control point	-0,037017	-0,017447	-0,015031	0,005	0,043596
L6_3	Control point	0,027116	-0,001771	0,014296	0,005	0,030705
L6_4	Control point	-0,000221	0,000344	-0,000258	0,005	0,000483
L6_5	Control point	0,000119	-0,0008	0,000457	0,005	0,000929
L6_6	Control point	0,000102	0,000457	-0,000198	0,005	0,000508
L6_7	Control point	0	0	0	0,005	0,000000
Total	Control points	0,017743	0,009840	0,007848		0,021754

Check Point-RMSE: Terrestrischer Datensatz für Juni 2019)

Tab. 58: RMSE der Check Points für die Site L6 im Juni 2019 (terrestrischer Datensatz)

Site: L6 - June 2019						
GCP-Name	GCP-Function	X-Error	Y-Error	Z-Error	Accuracy	Total-RMSE
L6_1	Check point	0,080515	0,050239	0,103271	0,005	0,140255
L6_2	Check point	-0,058388	-0,050306	-0,090937	0,005	0,119203
L6_3	Check point	0,08607	0,006979	0,144004	0,005	0,167910
L6_4	Check point	-0,065018	0,06923	-0,105724	0,005	0,142119
L6_5	Check point	0,006886	-0,021859	0,04383	0,005	0,049460
L6_6	Check point	0,00169	0,065065	-0,043406	0,005	0,078233
L6_7	Check point	-0,219344	-0,189309	0,024182	0,005	0,290748
Total	Check points	0,099778	0,084891	0,088833		0,158283