



universität  
wien

# MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Einsatz von terrestrischem Laserscanning zur  
Untersuchung der Hofermühl-Rutschung (NÖ)“

verfasst von / submitted by

Konstanze Fila BA BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of  
Master of Science (MSc)

Wien, 2017 / Vienna 2017

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:

Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade



## **Erklärung**

Hiermit versichere ich,

- dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe,
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe
- und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig übereinstimmt.

Wien, am 1.Juni 2017

Konstanze Fila



## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mir während der Erstellung dieser Arbeit unterstützend zur Seite gestanden sind.

Dabei gilt mein Dank allen voran Prof. Dr. Thomas Glade für die Betreuung dieser Arbeit. Vielen Dank, dass Sie mir die Arbeit an diesem Thema ermöglicht haben und mich stets mit richtungsweisenden Anregungen unterstützt haben.

Insbesondere bedanke ich mich bei Eki, der mir bei kleineren und größeren Herausforderungen immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist. Danke für deine konstruktive Kritik, die wertvollen Denkanstöße und das gemeinsame Brainstorming,

Ein herzliches Dankeschön auch an Bernhard Groiss für die Geduld und Unterstützung bei der Arbeit im Gelände – egal ob bei Sonnenschein, Regen oder dichtem Nebel.

Ein großer Dank gilt auch Martin Hämmerle der Universität Heidelberg für die vielen Tipps zur Optimierung meiner Arbeitsschritte.

Mein Dank richtet sich außerdem an Dipl.Ing. Kotzmaier der Wildbach- und Lawinenverbauung für die Bereitstellung umfassender Informationen zum Standort der Hofermühl-Rutschung.

Zuletzt gilt mein Dank meinen Eltern. Vielen Dank für eure motivierende Unterstützung im Verlauf meines Studiums. Im Lauf der Jahre konnte ich dadurch viele tolle Erfahrungen sammeln und eine schöne Studienzeit genießen!



# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	i
Abbildungsverzeichnis .....	iii
Tabellenverzeichnis .....	v
Zusammenfassung .....	vi
Abstract.....	vii
Abkürzungen.....	viii
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1. Hintergrund .....	1
1.2. Hypothesen und Fragestellungen.....	3
<b>2. Gravitative Massenbewegungen.....</b>	<b>5</b>
2.1. Klassifikation gravitativer Massenbewegungen.....	5
2.2. Prozesse und Einflussfaktoren.....	8
2.3. Methoden zur Untersuchung gravitativer Massenbewegungen .....	12
2.3.1. Oberflächenbeobachtungen .....	12
2.3.2. Untergrunduntersuchungen .....	17
<b>3. Methodik .....</b>	<b>18</b>
3.1. Geländearbeit.....	18
3.1.1. Geländeplanung.....	18
3.1.2. Datenaufnahme .....	20
3.2. Datenverarbeitung .....	21
3.2.1. Sichtung der Scans .....	22
3.2.2. Scan Position Registrierung.....	22
3.2.3. Datenbereinigung .....	25
3.3. Datenanalyse .....	28
3.3.1. Oberflächenvergleich in RiSCAN PRO .....	28
3.3.2. Oberflächenvergleich in ArcMap .....	29
<b>4. Untersuchungsgebiet .....</b>	<b>31</b>
4.1. Lage.....	31

4.2.	Umweltfaktoren.....	32
4.2.1.	Klima.....	32
4.2.2.	Geologie .....	33
4.2.3.	Landnutzung.....	35
4.2.4.	Böden .....	35
4.2.5.	Rutschungen in Niederösterreich.....	37
4.3.	Standortbedingungen Hofermühle.....	38
5.	Ergebnisse .....	42
5.1.	Geländearbeit .....	42
5.1.1.	Geländeplanung .....	42
5.1.2.	Datenaufnahme.....	44
5.2.	Datenverarbeitung.....	46
5.2.1.	Sichtung der Scans.....	46
5.2.2.	Scan Position Registrierung.....	52
5.2.3.	Datenbereinigung.....	56
5.3.	Datenanalyse .....	64
5.3.1.	Oberflächenvergleich in RiSCAN PRO.....	65
5.3.2.	Oberflächenvergleich in ArcMap.....	69
6.	Diskussion .....	72
7.	Conclusio.....	81
8.	Perspektiven.....	83
9.	Literatur.....	87
10.	Anhang .....	94

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassifizierung gravitativer Massenbewegungen nach den kinematischen Grundtypen (nach Varnes (1978) und Highland und Bobrowsky (2008)) .....	6
Abbildung 2: Vektorparallelogramm der Hangspannungen (nach Ahnert (2009)).....	8
Abbildung 3: Stabilitätszustände und destabilisierende Faktoren (nach Crozier (1986)).....	9
Abbildung 4: Auswirkungen von Rutschungen auf den Baumbestand (Zaruba and Mencl, 1982) .....	12
Abbildung 5: Messprinzip des Impulsmessverfahrens, eigene Darstellung.....	14
Abbildung 6: Ausgesandte und empfangene Signale eines Full-Waveform Laserscanners auf einer bewaldeten Fläche (Mallet and Bretar, 2009) .....	16
Abbildung 7: Vorgehensweise bei der Aufnahme, Aufbereitung und Analyse der TLS-Daten	18
Abbildung 8: Laserscanner RIEGL VZ-6000.....	20
Abbildung 9: Helmert Transformation (Hashemi et al., 2013).....	23
Abbildung 10: Schema des Octree, würfelförmige Unterteilung des Volumens (nach Chávez und Karstoft (2012)).....	26
Abbildung 11: Lokalisierung des Untersuchungsgebiets in Niederösterreich .....	31
Abbildung 12: Klimadiagramm der ZAMG Messstation in Waidhofen an der Ybbs, 30-jährige Mittelwerte (1981-2010) .....	32
Abbildung 13: Landnutzung in Waidhofen an der Ybbs, Stand 2012 (Quelle: Amt der NÖ Landesregierung 2015) .....	35
Abbildung 14: Standort der Gebäude 1 und 2 .....	39
Abbildung 15: wellige Morphologie und Risse in der Vegetationsdecke oberhalb der Abrisskante der Rutschung, Foto: K. Fila .....	40
Abbildung 16: Beobachtungen auf der Abrisskante: aufgerissene Vegetation an der Abrisskante (A), Wassertümpel auf der Rutschmasse (B), abgesetzter Boden mit freigelegten Wurzeln (C), umgekippte Bäume auf der Rutschmasse (D) Fotos: K. Fila .....	41
Abbildung 17: Abgrenzung des Untersuchungsgebiets an der Hofermühl-Rutschung .....	43
Abbildung 18: Lokalisierung und schematischer Abdeckungsbereich der Scanpositionen 1 und 2 .....	45
Abbildung 19: Überblickscan (C) und Detailscan (D) vom 20.07.2016 aus SP 1, Detailansicht von Abrisskante und Gebäude im oberen Hangbereich (A, B).....	47
Abbildung 20: Photorealistische Abbildung des UG, SP 1 und SP 2 08.08.2016.....	48

Abbildung 21: Detailscan des UG von SP 1 und SP 2 mit markierter Abrisskante der Hofermühl-Rutschung, 20.07.2016 .....	49
Abbildung 22: Vergleich der Punktdichte aus SP 1 und SP 2, 20.07.2016 .....	50
Abbildung 23: Vergleich der Punktdichte aus SP 1 und SP 2, 10.11.2016 .....	51
Abbildung 24: Verknüpfungspunkte zur Registrierung der Punktwolken von SP 1 und SP 2, 10.11.2016.....	53
Abbildung 25: manuell definierte Ebenen zur Durchführung des MSA, Scankombination 10.11.2016.....	54
Abbildung 26: Scankombination von SP 1 und SP 2, 10.11.2016 .....	56
Abbildung 27: Zur Datenbereinigung eingeschränktes Untersuchungsgebiet, Scankombination 10.11.2016.....	57
Abbildung 28: Auswirkung des Octree-Filters – Klimastation im oberen Hangbereich, Scankombination 10.11.2016.....	58
Abbildung 29: Anwendung des "weichen" Filters auf das UG, Scankombination 10.11.2016	60
Abbildung 30: Detailansicht der durch den „weichen“ Filter identifizierten Flächen, Scankombination 10.11.2016.....	61
Abbildung 31: Vegetationsreste nach Anwendung des „weichen“ Filters, Scankombination 10.11.2016.....	62
Abbildung 32: Anwendung des „harten" Filters auf das UG, Scankombination 10.11.2016 ..	63
Abbildung 33: Punktwolke nach der Datenbereinigung, Scankombination 10.11.2016.....	64
Abbildung 34: Visualisierung der getesteten Triangulierungsparameter, Scankombination 20.07.2016.....	66
Abbildung 35: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Triangulierung der Termine 08.08.2016 (A, C) sowie 19.11.2015 (B, D).....	67
Abbildung 36: Oberflächenveränderung innerhalb eines Jahres (RiSCAN PRO), Differenz zwischen 19.11.2015 und 10.11.2016.....	68
Abbildung 37: Oberflächenveränderungen innerhalb eines Jahres (ArcMap), Differenz zwischen 19.11.2015 und 10.11.2016.....	70

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifikation gravitativer Massenbewegungen nach Prozess und Material (nach Cruden und Varnes (1996), Dikau et al. (1996)) .....	7
Tabelle 2: Auswahl vorbereitender, auslösender und kontrollierender Faktoren gravitativer Massenbewegungen (nach Dikau und Glade (2002)).....	11
Tabelle 3: Technische Spezifikationen des RIEGL VZ-6000 .....	20
Tabelle 4: Standortinformation Bodenprofil A, westlich von Konradsheim .....	36
Tabelle 5: Standortinformation Bodenprofil B, nordöstlich von Konradsheim .....	36
Tabelle 6: Standortinformation Bodenprofil C, südwestlich von Konradsheim.....	37
Tabelle 7: Informationen über die Geländetage und durchgeführten Scans .....	46
Tabelle 8: Standardabweichung der Grob- und Feinregistrierung.....	55
Tabelle 9: Parameterwerte der Terrain Filter .....	59
Tabelle 10: Getestete Parameter der Triangulierung (Test 4: angewendete Parameterkombination) .....	65

## Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren hat sich terrestrisches Laserscanning zu einer bewährten Methode bei der Untersuchung gravitativer Massenbewegungen entwickelt. TLS ermöglicht zeitnahe, detaillierte Aufnahmen in Form von 3D-Punktwolken der Hangoberfläche.

Im Rahmen der Arbeit wird TLS zur Untersuchung der Hofermühl-Rutschung in Niederösterreich angewendet. Dabei wird erörtert, ob anhand der Daten eine Abgrenzung des Ereignisses durchgeführt werden kann. Weiters werden Oberflächenveränderungen mittels multi-temporalen Scans analysiert. Zudem wird auf Herausforderungen in Bezug auf die Datenaufnahme, -bereinigung und -analyse eingegangen.

Am Standort werden innerhalb eines Jahres mehrere Scans aufgenommen. Die 3D-Punktwolken aller Geländeterminale werden zunächst in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt. Im Anschluss wird der Vegetationsbewuchs gefiltert, um die Geländeoberfläche zu erhalten. Schließlich werden aus den Scans Differenzmodelle abgeleitet, um die Veränderung der Hangoberfläche im Zeitverlauf zu analysieren.

Die Ergebnisse liefern 3D-Punktwolken anhand derer einige Merkmale der Rutschung identifiziert werden können. Die Oberflächenvergleiche weisen jedoch hohe Ungenauigkeiten auf, sodass keine Rückschlüsse auf Veränderungen am Standort gezogen werden können.

Geländefaktoren, Geräteeigenschaften sowie Analysemethoden haben einen hohen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse. So führen dichte Vegetationsbedeckung sowie variierende Geländemorphologie zu hohen Datenverlusten im Untersuchungsgebiet.

Trotz aktueller Limitierungen bietet TLS ein hohes Anwendungspotenzial zur Untersuchung gravitativer Massenbewegungen. In Kombination mit Methoden wie 3D-Photogrammetrie kann zukünftig ein besseres Verständnis der Prozessabläufe erreicht werden.

## **Abstract**

In recent years terrestrial laser scanning has developed into an established method in the area of landslide research. TLS allows a fast and efficient survey of the affected slope. The generated 3D point clouds provide a detailed model of the surface structure of the observed processes.

This thesis explores the potentials of TLS for the study and monitoring of landslides. At the Hofermühl-Landslide in Lower Austria several 3D point clouds are recorded during the course of a year. It is examined whether characteristics of the landslide can be identified on the generated scans. Furthermore, multitemporal scans are analysed to detect surface changes on the landslide mass.

The recorded 3D point clouds are transferred into a common coordinate system. Furthermore the vegetation is filtered out of the data to preserve only the ground surface. Finally, digital terrain models are generated. Subsequently, temporal changes in the surface of the landslide mass are analysed.

The results provide high-resolution point clouds of the study area. Several features of the landslide can be identified on the scans. However, the surface comparisons exhibit high inaccuracies. Consequently, no conclusions referring to actual surface changes in the study area can be deduced.

Inaccuracies in the data result from terrain factors, device properties and analysis methods. Dense vegetation cover and varying terrain morphology lead to high data losses that influence the subsequent analyses.

Despite current challenges, TLS offers a high potential for the investigation of landslides. By combining TLS with methods such as 3D photogrammetry a better understanding of the examined processes can be achieved.

## Abkürzungen

C2C	Cloud to Cloud
DEM	Digital Elevation Model
DGM	Digitales Geländemodell
GLCS	Global Coordinate System
GNSS	Globales Navigations satellitensystem
DoD	DEM of Difference
DOM	Digitales Oberflächenmodell
GPS	Global Positioning System
ICP	Iterative Closest Point
LiDAR	Light Detection and Ranging
MSA	Multi Station Adjustment
M3C2	Multiscale Model to Model Cloud Comparison
OPALS	Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning
PRCS	Project Coordinate System
SOCS	Scanner Own Coordinate System
SP	Scanposition
TIN	Triangulated Irregular Network
TLS	Terrestrisches Laserscanning
UAV	Unmanned Aired Vehicle
UG	Untersuchungsgebiet
USD	US Dollar
WLV	Wildbach- und Lawinenverbauung
3D	3-Dimensional

## 1. Einleitung

In diesem Kapitel wird eine Einführung in den thematischen Hintergrund der Arbeit geliefert. Dabei wird aktuelle Forschungsarbeit im Themenbereich vorgestellt. In einem weiteren Schritt werden Hypothesen und Fragestellungen, die im Rahmen der Arbeit behandelt werden, präsentiert.

### 1.1. Hintergrund

Laut dem World Disaster Report 2016 kommt es zu einem immer größeren Anstieg an Naturkatastrophen (Sanderson and Sharma, 2016). Aufgrund steigender Bevölkerungszahlen, dichter werdender Besiedlung sowie den Effekten des Klimawandels werden in Zukunft noch mehr Menschen größeren Risiken ausgesetzt sein (Huppert and Sparks, 2006). Im Jahr 2015 kam es zu rund 600 berichteten Katastrophenereignissen, die durch Erdbeben, Hochwasserereignisse, Hitzewellen und gravitative Massenbewegungen verursacht wurden. In der Folge waren 108 Millionen Menschen betroffen und es kam zu Schäden von 70,3 Mrd. USD. (Sanderson and Sharma, 2016) Jedes Jahr führen gravitative Massenbewegungen zu globalen finanziellen Schäden von hunderten Millionen Dollar und fordern weltweit zahlreiche Menschenleben (Clague and Roberts, 2012). Gravitative Massenbewegungen sind komplexe Phänomene, die eine wesentliche Rolle in der Landschaftsentwicklung einnehmen. Indem sich im Laufe des Prozesses Sediment hangabwärts bewegt führen sie zu Veränderungen in der Hangmorphologie. (Regmi et al., 2014) Die Prozesse treten zum Großteil in gebirgigen Regionen auf. Sie können sich jedoch in allen Gebieten der Erde ereignen, wenn das lokale Relief den gravitativen Kräften nicht mehr standhalten kann und es zu Hangversagen kommt.

Aus der soeben beschriebenen Situation ergibt sich die Notwendigkeit, diese Prozesse zu untersuchen und zu analysieren. Dadurch können in weiterer Folge Voraussagen für zukünftige Ereignisse getroffen werden. Dabei werden verschiedene Analyseverfahren wie Fernerkundungsmethoden sowie geophysikalische und geotechnische Methoden zur Untersuchung des Untergrundzustandes und der Dynamik der Bewegung durchgeführt.

In dem Zusammenhang spielt die Anwendung dreidimensionaler Geodaten eine wichtige Rolle. Diese gewinnen in allen Bereichen der Geowissenschaften wie der Geomorphologie, Hydrologie oder Geologie immer mehr an Bedeutung (Haemmerle et al., 2016). Vor allem die Technologie des „Light detection and ranging“ (LiDAR) hat in den vergangenen Jahrzehnten neue technologische und wissenschaftliche Möglichkeiten eröffnet. Es ist anzunehmen, dass es in den kommenden Jahren zu einem starken Anstieg in Publikationen in Bezug auf Laserscanning kommen wird. (Abellán et al., 2016)

Jaboyedoff et al. (2012) liefern eine detaillierte Zusammenfassung über die Anwendungsbereiche von LiDAR bei der Erforschung gravitativer Massenbewegungen. Dabei sticht die Methode des terrestrischen Laserscanning (TLS) besonders hervor, indem sie die Aufnahme gewaltiger Datenmengen innerhalb kürzester Zeit ermöglicht. Durch die hochauflösenden Aufnahmen wird eine präzise und detaillierte Darstellung der untersuchten Fläche geliefert. (Barbarella et al., 2013, Pirotti et al., 2013b) In Bezug auf gravitative Massenbewegungen findet TLS unter anderem Einsatz bei der erstmaligen Kartierung von Ereignisstandorten. Jaboyedoff et al. (2008) arbeiten an der Aufnahme und Volumsschätzung von Steinschlagstandorten mittels TLS in Quebec. Bei Armesto et al.(2009), Dunning et al.(2009) und Santana et al. (2012) finden sich weitere Publikationen über die Anwendung von TLS zur Identifikation und Analyse gravitativer Massenbewegungen.

TLS kann in einem weiterführenden Schritt auch beim Monitoring gravitativer Massenbewegungen angewendet werden. So erweist sich die Methode bei Deformationsmessungen, insbesondere in schwer zugänglichen Gebieten mit steilen Hängen, als vorteilhaft. Abellán et al. (2009) wenden TLS zur Messung von millimetrischen Deformationen in Zusammenhang mit einem Steinschlagereignis in Katalonien an. In Kampanien untersuchen Barbarella und Fiani (2012) eine großflächige gravitative Massenbewegung mittels TLS und GPS-Empfängern. Hämmerle et al. (2016) kombinieren TLS mit Photogrammetrie-Daten aus UAV-Befliegungen. Aus den so generierten Punktwolken werden anschließend 3D-Volumensmodelle erstellt, um Masseverluste festzustellen. Weitere Arbeiten zum Thema finden sich bei Monserrat et al. (2008), Oppikofer et al. (2009), Barbarella et al. (2013), Royán et al. (2014) sowie Carrea et al. (2015).

So erlauben terrestrische Laserscanner eine schnelle, effiziente und präzise Aufnahme gravitativer Massenbewegungen. Die resultierenden Modelle sind in der Lage, die untersuchten Objekte mit großer Detailtreue darzustellen. Dennoch bestehen bei der Analyse der Prozesse mittels TLS in Bezug auf Aufnahme und Weiterverarbeitung der Daten noch einige Herausforderungen. (Barbarella and Fiani, 2012)

## 1.2. Hypothesen und Fragestellungen

Die vorliegende Arbeit widmet sich dem Einsatz von TLS bei der Untersuchung einer gravitativen Massenbewegung im niederösterreichischen Bezirk Waidhofen an der Ybbs. Auf Basis mehrerer Scanaufnahmen im Zeitraum zwischen November 2015 und November 2016 wird die Hofermühl-Rutschung in Hinblick auf die folgenden Hypothesen und Fragestellungen untersucht. Grundlegend wird der Frage nachgegangen, welche Anwendungspotenziale TLS zur Untersuchung gravitativer Massenbewegungen bietet. Im Rahmen der Arbeit werden folgende Hypothesen untersucht:

### Hypothese 1:

*TLS stellt eine geeignete Methode zur Untersuchung und Analyse gravitativer Massenbewegungen dar.*

Zur Überprüfung der Hypothese werden folgende Fragestellungen erörtert:

- Kann die Hofermühl-Rutschung anhand der TLS-Daten lokalisiert und abgegrenzt werden?
- Können anhand der generierten 3D-Punktwolken grundlegende Merkmale wie Abrisskante und Rutschfläche identifiziert werden?

### Hypothese 2:

*Anhand der TLS-Daten können Veränderungen, die im Zeitverlauf an der Hofermühl-Rutschung stattfinden, festgestellt werden.*

Folgende Forschungsfragen werden im Rahmen dieser Hypothese bearbeitet:

- Welche Veränderungen können in und um die Rutschfläche im Verlauf eines Jahres festgestellt werden (Nov. 2015 - Nov. 2016)?
- Wie wirkt sich die Vegetationsbedeckung auf die Qualität der Daten aus?
- Welche Effekte haben klimatische Veränderungen im Jahresverlauf auf die Qualität der Daten?

In einem einleitenden Teil wird zunächst auf die Klassifizierung gravitativer Massenbewegungen sowie deren Prozesse und Einflussfaktoren eingegangen. Weiters werden Möglichkeiten zur Analyse gravitativer Massenbewegungen behandelt. Dabei werden sowohl terrestrische Methoden wie TLS als auch Fernerkundungsmethoden wie Satellitenbildanalysen und ALS beschrieben.

## 1. Einleitung

---

Anschließend wird auf die, in der Arbeit verwendete Methodik eingegangen. Die Aufnahme der Daten im Untersuchungsgebiet wird erläutert. Ebenso wird dargestellt, wie die aufgenommenen TLS-Daten mithilfe der Software RiSCAN PRO generiert und ausgewertet werden. Weiters wird die Erstellung von Differenzmodellen mittels RiSCAN PRO, OPALS sowie Arc-Map präsentiert.

Im Anschluss wird auf das konkrete Untersuchungsgebiet der Hofermühl-Rutschung in Waidhofen an der Ybbs eingegangen. Nach einer geographischen Lokalisierung des UG werden die Umweltfaktoren, die für die Analyse des Standortes eine wesentliche Rolle spielen, geschildert. Unter anderem wird dabei auf Klima, Geologie sowie Landnutzung und anthropogene Einflüsse eingegangen.

Der Hauptteil der Arbeit widmet sich der Darstellung der generierten 3D-Punktwolken sowie den Ergebnissen der anschließenden Auswertungen. Die mithilfe der Software RiSCAN PRO dargestellten Punktwolken werden visualisiert und beschrieben. Dabei werden Merkmale der Rutschung identifiziert sowie Unterschiede zwischen den einzelnen Scans festgestellt. Überdies wird anhand der Differenzmodelle untersucht, zu welchen Veränderungen es am Standort zwischen November 2015 und November 2016 gekommen ist.

In einer Diskussion werden die zuvor präsentierten Ergebnisse in Hinblick auf die Hypothesen und Fragestellungen interpretiert. Dabei werden unterschiedliche methodische Aspekte der Aufnahme, Analyse sowie Interpretation der 3D-Punktwolken erläutert. Weiters wird darauf eingegangen, welche Erkenntnisse in Bezug auf den Standort aus den Ergebnissen abgeleitet werden können.

Abschließend werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst. Zudem werden Perspektiven in Bezug auf das Anwendungspotenzial von TLS zur Untersuchung gravitativer Massenbewegungen präsentiert.

## 2. Gravitative Massenbewegungen

Das folgende Kapitel widmet sich dem theoretischen Hintergrund von gravitativen Massenbewegungen. Dabei wird auf unterschiedliche Definitionen sowie Klassifikationsmethoden der Phänomene eingegangen. Weiters werden Prozessstypen und Einflussfaktoren beschrieben.

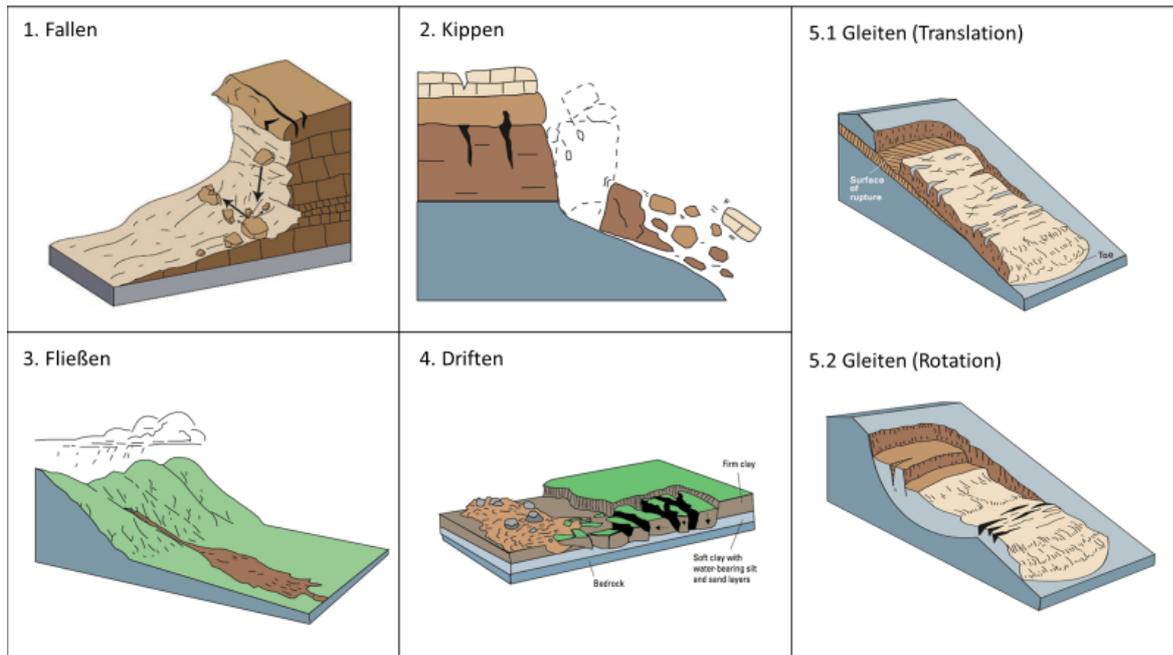
### 2.1. Klassifikation gravitativer Massenbewegungen

Es gibt verschiedene, parallel existierende Definitionen um den Begriff der gravitativen Massenbewegung zu beschreiben (Glade and Stoetter, 2008). Die variierende Terminologie im deutsch- und englischsprachigen Raum stellt dabei einen erschwerenden Faktor dar. Im deutschsprachigen Raum hat sich der Begriff „gravitative Massenbewegung“ durchgesetzt. Im englischen Sprachraum hingegen wird der Begriff „landslide“ für die gesamte Prozessgruppe angewendet. (Glade and Dikau, 2001)

Cruden (1991, p.27) liefert eine einfache, klare Definition und unterteilt in drei Materialgruppen, die im Verlauf des Prozesses bewegt werden können: *„A landslide is a movement of a mass of rock, earth or debris down a slope.“* Dikau und Glade (2002, p.38) definieren den Begriff wie folgt: *„Massenbewegungen sind bruchlose und bruchhafte hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Fels- und/oder Lockergestein unter Wirkung der Schwerkraft.“* Clague (2013, p.595) formuliert gravitative Massenbewegungen als *„... the failure and movement of a mass of rock, sediment, soil, or artificial fill under the influence of gravity.“* Dabei wird der menschliche Einfluss betont, der ebenfalls zur Bewegung von Hängen beitragen kann. So können auch künstliche, vom Menschen geschaffene Materialien, in Form einer gravitativen Massenbewegung auftreten.

Der Begriff beinhaltet eine Vielzahl an gravitativen Prozessen, die in unterschiedlichen geologischen, topographischen und klimatischen Umgebungen stattfinden können und folglich in sehr diverser Form auftreten (Clague and Roberts, 2012). Erste Klassifikationen gravitativer Massenbewegungen wurden von Varnes (1978), Hutchinson (1988) sowie Crozier (1986) erstellt. Varnes (1978) fasst unterschiedliche Klassifikationskriterien zusammen, die bereits in früheren Klassifikationen verwendet wurden. Dabei wird unter anderem nach Alter, Aktivitätsgrad, geotechnischen Kriterien sowie Bewegungsrate unterschieden. Eine weitere Möglichkeit stellt die Klassifikation anhand des Versagensmechanismus dar. Dabei wird zwischen den fünf kinematischen Grundtypen Fallen, Kippen, Fließen, Driften und Gleiten unterschieden, wie in Abbildung 1 dargestellt ist.

## 2. Gravitative Massenbewegungen



**Abbildung 1: Klassifizierung gravitativer Massenbewegungen nach den kinematischen Grundtypen (nach Varnes (1978) und Highland und Bobrowsky (2008))**

Um die verschiedenen Prozesse terminologisch weiter abzugrenzen, wird 1988 von der UNESCO Arbeitsgruppe der Internationalen Geotechnischen Gesellschaft erstmals eine Vereinheitlichung und Standardisierung der Begriffe angestrebt. Die UNESCO Working Party on World Landslide Inventory klassifiziert gravitative Massenbewegungen unter anderem basierend auf Kinematik, Aktivität, Wassergehalt, Bewegungsrate sowie Materialzusammensetzung. (WP/WLI, 1993) Basierend darauf werden Klassifikationen gravitativer Massenbewegungen von Cruden und Varnes (1996) sowie Dikau et al. (1996) erstellt, die in Tabelle 1 dargestellt sind. Diesen Klassifikationen liegen die unterschiedlichen Material- und Prozesstypen zugrunde (Dikau and Glade, 2002). Zahlreiche Ereignisse treten jedoch in Form von Mischtypen auf und lassen sich nicht eindeutig einordnen. Sie fallen in die Kategorie „Komplex“. (Varnes, 1978) Bei diesen Ereignissen ist es wichtig, Geometrie, Bewegungsmechanismus und Aktivität im Detail zu beschreiben (Zangerl et al., 2008).

**Tabelle 1: Klassifikation gravitativer Massenbewegungen nach Prozess und Material (nach Cruden und Varnes (1996), Dikau et al. (1996))**

Process Prozess	Material		
	Rock Festgestein	Debris Schutt	Earth Erde/Boden
<i>Fall</i> Fallen	<i>Rock fall</i> Bergsturz, Felssturz, Steinschlag	<i>Debris fall</i> Schuttsturz	<i>Earth fall</i> Erdsturz
<i>Topple</i> Kippen	<i>Rock topple</i> Felskipfung	<i>Debris topple</i> Schuttkipfung	<i>Earth topple</i> Erddkipfung
<i>Slide (rotational)</i> Gleiten (rotationsförmig)	<i>Rock slide</i> Bergrutschung, Felsrutschung	<i>Debris slide</i> Schuttrutschung	<i>Earth slide</i> Erdrutschung
<i>Slide (translational)</i> Gleiten (translatorisch)	<i>Rock block slide</i> Felsblockgleitung <i>Rock slide</i> Felsgleitung	<i>Debris block slide</i> Schuttblockgleitung <i>Debris slide</i> Schuttgleitung	<i>Earth block slide</i> Erdblockgleitung <i>Earth slide</i> Erddgleitung
<i>Spread</i> Driften	<i>Rock spreading</i> Felsdriften	<i>Debris spreading</i> Schuttdriften	<i>Earth spreading</i> Erddriften
<i>Flow</i> Fließen	Rock flow Sackung, Talzus Schub	<i>Debris flow</i> Schuttfließen, Mure, Murgang	<i>Earth flow</i> Erdfließen, Mure, Murgang
<i>Complex</i> Komplex	<i>e.g. Rock avalanche</i> z.B. Sturzstrom, Steinlawine	<i>e.g. flow slide</i> z.B. plötzliche und schnelle Fließbewegung in kohäsionslosem Lockergestein	<i>e.g. rotational slide-earthflow</i> z.B. kombinierte Rotationsrutschung mit Erdfließen

Wie in diesem Kapitel erläutert wird, sind gravitative Massenbewegungen komplexe Phänomene, die oftmals schwer in eine Kategorie einer Klassifikation eingeordnet werden können. Zur einheitlichen Bezeichnung im Rahmen der Arbeit wird die gravitative Massenbewegung am Standort Hofermühle von nun an als Rutschung („Hofermühl-Rutschung“) bezeichnet.

### 2.2. Prozesse und Einflussfaktoren

Hänge sind stabil, wenn ein Kräftegleichgewicht zwischen den einzelnen Bodenpartikeln, die im Hang wirken besteht (Zepp, 2011). Dabei stehen sich Kräfte, die eine Hangabwärtsbewegung anstreben, jenen, die ebendieser Bewegung entgegenwirken gegenüber. Sind beide Kräfte ausgeglichen, befindet sich der Hang in stabilem Zustand. (de Vallejo and Ferrer, 2011)

Der sogenannte Sicherheitsfaktor  $F$  oder „Factor of Safety“  $S$  ergibt sich aus dem Quotienten zwischen der zurückhaltenden und der vorantreibenden Kraft.

$$F = \frac{\text{Summe der rückhaltenden Momente}}{\text{Summe der abschiebenden Momente}}$$

Die auf den Hang wirkenden Kräfte können in vier Gruppen eingeteilt und in Form von Kraftvektoren dargestellt werden (Abbildung 2). Prinzipiell sind alle Objekte der Erde der Schwerkraft, oder auch Fallbeschleunigung  $g$ , ausgesetzt. Die Wirkung der Scherkraft auf den Hang ist eine Funktion der Hangneigung  $\alpha$ . Die nach unten gerichtete Fallbeschleunigung  $g$  zerlegt sich in zwei Vektoren. Der Vektor  $\tau$  ist parallel zur Oberfläche hangabwärts gerichtet und führt ab einer gewissen Größe zum Abscheren und somit zu einer Mobilisierung des Materials. Auf eine Flächen- und Masseinheit bezogen wird der Vektor  $\tau$  auch als Scherspannung oder Schubspannung bezeichnet. Der Vektor  $\sigma$  ist im rechten Winkel zur Oberfläche nach unten hin orientiert. Der Vektor bewirkt den Auflagedruck der Masse  $m$  auf die Hangfläche. Hierbei handelt es sich um die Schwerebeschleunigung. Bezogen auf Flächen- und Masseinheit handelt es sich um die Druckspannung. (Ahnert, 2009)

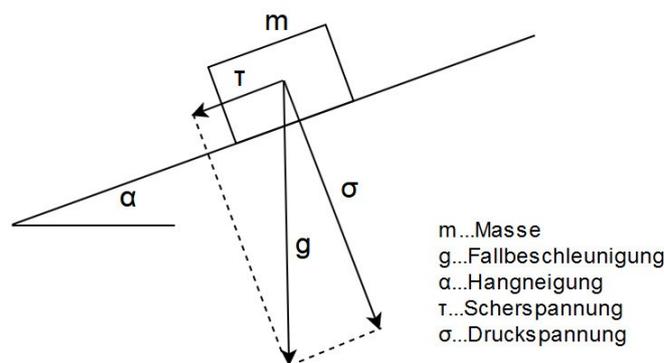


Abbildung 2: Vektorparallelogramm der Hangspannungen (nach Ahnert (2009))

Gravitative Massenbewegungen auf Hängen setzen erst ein, wenn die Scherfestigkeit eines Bodens oder Festgesteins überschritten wird. Diese Grenze wird als Grenzscherbspannung oder Grenzscherspannung  $s$  bezeichnet.

Diese ist ein Produkt aus Normalspannung  $\sigma$ , Reibungswinkel  $\tan \phi$  und Kohäsion  $c$ . Das Coulombsche Gesetz definiert die Grenzscherspannung wie folgt:

$$s = c + \sigma * \tan \phi$$

Daraus lässt sich schließen, dass die Grenzscherspannung  $s$  bei konstantem Reibungswinkel  $\phi$  und bei konstanter Kohäsion  $c$  eine lineare Funktion der Normalspannung  $\sigma$  ist. Die Normalspannung wiederum ist eine Funktion der Hangneigung  $\alpha$ . Daher ist  $\sigma$  geringer, je steiler der Hang ist. Folglich sinkt mit steigender Hangneigung auch die, für die Mobilisierung des Hanges benötigte Grenzspannung. (Ahnert, 2009, Prinz and Strauß, 2012)

Crozier (1986) unterteilt die Hangstabilität grundlegend in die drei Zustände stabil, marginal stabil und aktiv instabil (Abbildung 3). Das Modell geht zunächst von einem stabilen Zustand des Hanges aus. Verschiedene Dispositions-faktoren sind dafür verantwortlich, dass der Hang von einem stabilen in einen marginal stabilen und in weiterer Folge in einen instabilen Zustand übergeht. Diese Faktoren sind in vorbereitende, auslösende und bewegungskontrollierende Faktoren unterteilt.

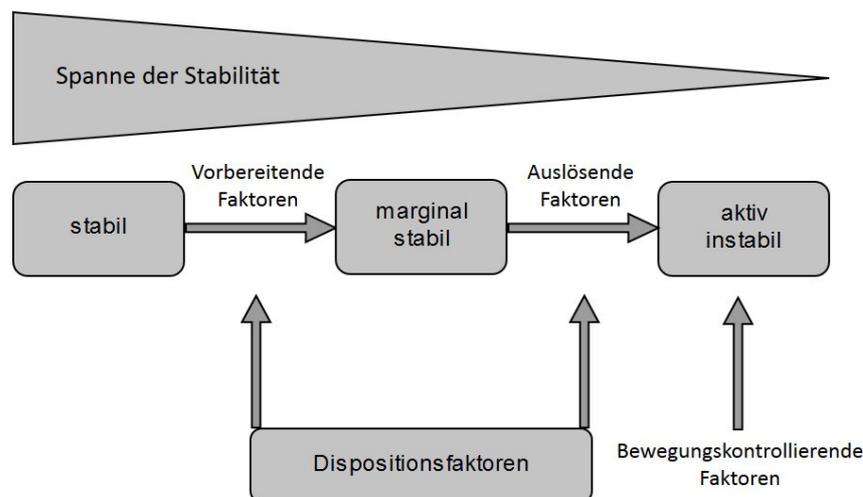


Abbildung 3: Stabilitätszustände und destabilisierende Faktoren (nach Crozier (1986))

Die vorbereitenden Faktoren weisen eine hohe Dynamik auf und machen den Hang anfällig gegenüber Bewegung. Durch diese Faktoren kommt es zwar noch zu keiner Mobilisierung jedoch befindet sich der Hang nun in einem marginal stabilen Zustand. Die auslösenden Faktoren führen schließlich dazu, dass sich der Hang in Bewegung setzt und ein aktiv instabiler Zustand eintritt. Ab dem Übergang in den instabilen Zustand werden die bewegungskontrollierenden Faktoren wirksam. Sie bestimmen Form, Dauer und Bewegungsrate der gravitativen Massenbewegung.

## 2. Gravitative Massenbewegungen

---

Glade und Crozier (2005) ergänzen das Modell überdies durch prädisponierende Faktoren. Diese führen zum Entstehen weiterer destabilisierender Faktoren, wodurch sich die bewegungskontrollierenden Faktoren weiter verändern können.

Das Entstehen gravitativer Massenbewegungen ist stets in der Entwicklung eines Hangungleichgewichts begründet und wird von einer Kombination verschiedener Faktoren beeinflusst. Fast immer wirken zwei Hauptfaktoren beim Versagen des Hanges. Dabei handelt es sich um die Änderung der Hangneigung sowie die Wirkung des Wassers. (Prinz and Strauß, 2012) Weiters werden die Faktoren in natürliche oder anthropogene Auslöser unterteilt. Oftmals werden Ereignisse durch eine Kombination beider Faktoren ausgelöst oder verstärkt. (Highland and Bobrowsky, 2008) In Tabelle 2 sind mögliche vorbereitende, auslösende sowie bewegungskontrollierende Faktoren dargestellt. Anhand der unterschiedlichen Ursachenkategorien wie Geologie, Vegetation oder anthropogener Einfluss wird die hohe Komplexität der Prozesse deutlich.

Tabelle 2: Auswahl vorbereitender, auslösender und kontrollierender Faktoren gravitativer Massenbewegungen (nach Dikau und Glade (2002))

Ursache	Vorbereitende Faktoren (Disposition)	Auslösende Faktoren (Trigger)	Bewegungskontrollierende Faktoren
<b>Geologie</b>	Diskontinuität <sup>1</sup> (Schichtung, Schieferung, etc.) strukturelle Diskontinuität <sup>1</sup> (z.B. streichen/fallen, tektonische Störungen) Verwitterung, Isostasie	Erdbeben, Vulkane	Gesteinstypen Diskontinuität <sup>1</sup> (Schichtung, Schieferung, etc.) Strukturelle Diskontinuität <sup>1</sup> (z.B. streichen/fallen, tektonische Störungen)
<b>Klima</b>	Lang anhaltender Vorregen Schneesmelze Frost-Tau Zyklen	Niederschlag <sup>1</sup> (Intensität, Menge) Schnelle Schneesmelze	Niederschlag (Intensität, Menge)
<b>Boden</b>	Verwitterung Geotechnische Materialeigenschaften Bodenart und -typ Schrumpf-Schwell Zyklen Subterrane Erosion (z.B. Tunnel Erosion)	Nicht zutreffend	Wassersättigung Mächtigkeit des Bodens
<b>Vegetation</b>	Natürliche Vegetationsänderung <sup>1</sup> (z.B. Waldbrand, Trockenheit)	Nicht zutreffend	Vegetation
<b>Hydrologie</b>	Schmelzender Permafrost	Schnelle Schwankungen des Grundwasserspiegels, Porenwasserdrucks	Gerinnerauigkeit Weitertransport bewegter Massen
<b>Topographie</b>	Hangexposition <sup>1</sup> Hanghöhe <sup>1</sup>	Nicht zutreffend	Hangneigung <sup>1</sup> Hangwölbung <sup>1</sup> Tiefenlinien <sup>1</sup>
<b>Anthropogen</b>	Entwaldung Staudambau Entfernung des Hangfußes Belastung des Oberhangs Bewässerung Bergbau Künstliche Bewegung (z.B. Sprengung) Undichte Wasserversorgung	Hanganschnitte <sup>1</sup> Hangunterschneidung <sup>1</sup> Auflast <sup>1</sup>	Künstliche Verbauungen Dämme Gerinnebegradigung, -verkleinerung, -vergrößerung
<sup>1</sup> : diese Faktoren können, je nach Stabilitätszustand des Hanges, sowohl vorbereitend, auslösend als auch kontrollierend wirken			

### 2.3. Methoden zur Untersuchung gravitativer Massenbewegungen

Um gravitative Massenbewegungen beurteilen und deren weitere Entwicklung voraussagen zu können, ist es notwendig, die Bedingungen und Prozesse, die zur Instabilität beitragen, zu identifizieren. Außerdem muss deren relativer Beitrag zur Mobilisierung des Hanges eruiert werden. (Highland and Bobrowsky, 2008) Im folgenden Kapitel wird ein Überblick über Methoden zur Identifikation und Analyse gravitativer Massenbewegungen geliefert. Zur Erfassung von Geologie und Geometrie der Prozesse werden sowohl Oberflächenkartierungen als auch Tiefenerkundungen durchgeführt. Kenntnis über die Strukturen und Charakteristika der Hangoberfläche sowie ein Verständnis der internen Hangstrukturen sind eine Grundvoraussetzung zur Identifikation der Abläufe, die zum Hangversagen beitragen. (Merritt et al., 2014) Die dafür angewendeten Methoden der Fernerkundung werden in der Folge ebenfalls erläutert.

#### 2.3.1. Oberflächenbeobachtungen

Viele Merkmale gravitativer Massenbewegungen sind auf Karten oder auf Luftbildern nicht erkennbar und können nur im Gelände identifiziert werden. Überdies ändern sich die Eigenschaften von aktiven Standorten im Zeitverlauf. Daher ist Feldarbeit notwendig, um die potenzielle Instabilität von Hängen beurteilen zu können. (Highland and Bobrowsky, 2008)

Im Rahmen von geomorphologische Kartierungen wird eine räumliche Abgrenzung von Anriss-, Transit- und Ablagerungsbereichen durchgeführt. Überdies werden Indikatoren für Hangbewegung aufgenommen. Dabei werden unter anderem Stauchwülste in Kompressionsbereichen, gerissene Vegetationsdecken oder Schiefstellungen von Bäumen aufgenommen (Abbildung 4). (Leser, 1977, Zangerl et al., 2008, Coldewey and Goebel, 2014)



Abbildung 4: Auswirkungen von Rutschungen auf den Baumbestand (Zaruba and Mencl, 1982)

Die geologische Kartierung legt einen Fokus auf Parameter wie die Lithologie der Fest- und Lockergesteine. Weiters werden geologische Strukturen wie Schieferung, Schichtung, Störungszonen und Klüfte aufgenommen. In Bezug auf hydrologische Merkmale werden Aufnahmen von Quellen, Quellhorizonten und Gerinnen sowie von deren zeitlichem Verlauf durchgeführt. Dabei werden auch Parameter wie Quellschüttung, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit des Wassers gemessen. (Zangerl et al., 2008)

Die im Gelände erhobenen Informationen werden oftmals durch Fernerkundungsdaten ergänzt. Zu weiteren Methoden zählen Tachymetrie, elektronische Distanzmessung sowie Distanzmessung mittels Lasertechniken. Die Methoden werden in Dunicliff (1993) sowie Keaton und Degraff (1996) näher beschrieben.

Methoden der Fernerkundung spielen bei der Untersuchung gravitativer Massenbewegungen eine tragende Rolle. Analysen von Luftbilddaten sind eine effiziente Technik um Rutschungen zu identifizieren. Zugleich ermöglichen sie einen unmittelbaren Überblick über das Untersuchungsgebiet sowie Informationen über menschliche Aktivitäten. (Highland and Bobrowsky, 2008) Hochauflösende Satellitenbilder ermöglichen es, Strukturmerkmale der Landschaft auszumachen und in weiterer Folge Relief, Vegetation, Gewässer und Gebäude zu identifizieren. Bei hoher Auflösung der Daten können Rutschfläche inklusive Abrisskante und Rutschungsfuß gravitativer Massenbewegungen identifiziert werden. (Zaruba and Mencl, 1982, Zangerl et al., 2008) Die verschiedenen Arten von verfügbaren Luftbildern wie Satelliten-, Infrarot und Radarbilder ermöglichen vielfältige, ergänzende Anwendungen. (Highland and Bobrowsky, 2008)

Auf den Einsatz von Light Detection and Ranging (LiDAR), im Speziellen dessen Einsatz in terrestrischem Laserscanning, wird an dieser Stelle ausführlicher eingegangen, da diese Methode im Rahmen der Arbeit eine wesentliche Rolle einnimmt. Bei LiDAR handelt es sich um einen Überbegriff für Fernerkundungstechniken, die Distanzmessungen mittels elektromagnetischer Strahlung durchführen. Dabei werden mithilfe eines automatischen, berührungslosen Messverfahrens räumliche Objektinformationen generiert. (Loeffler et al., 2005) Die Methode ist ein aktives Fernerkundungssystem mit dem Ziel, die Erdoberfläche und deren Objekte wie Vegetation und menschliche Infrastrukturen abzubilden (Petzold et al., 1999).

Bei TLS im Speziellen wird die LiDAR-Technologie für die Charakterisierung und das Monitoring gravitativer Massenbewegungen angewendet (Jaboyedoff et al., 2012). Zur Datenaufnahme tastet der Laserscanner die Oberfläche des Untersuchungsobjektes punktuell ab. Dabei erzeugt der Sender eine elektromagnetische Welle im Bereich des sichtbaren Lichts oder nahen Infrarots, um die Distanz zum Objekt zu messen. Die Welle wird über die Messdistanz  $D$  zu einem Objekt gesendet. Die Welle wird am Objekt reflektiert und von einem Empfänger am Scanner aufgenommen.

Bei der Messung wird im Wesentlichen zwischen Phasendifferenzverfahren und Pulsmessverfahren unterschieden (Wehr and Lohr, 1999). Das Phasendifferenzverfahren ermöglicht eine exaktere Bestimmung der Reichweite, weist jedoch eine limitierte Reichweite auf (Petrie and Toth, 2008).

## 2. Gravitative Massenbewegungen

---

Das Pulsmessverfahren hingegen hat eine besonders hohe Reichweite, was bei der Vermessung großer Flächen wie bei gravitativen Massenbewegungen, ein deutlicher Vorteil ist. Überdies wird das Verfahren bevorzugt bei der Erdbeobachtung mittels Airborne Laserscanning (ALS) angewendet. (Wehr and Lohr, 1999)

Der im Rahmen der Arbeit verwendete Laserscanner RIEGL VZ-6000 (3.1.2) misst nach dem Impulsmessverfahren, das nun genauer beschrieben wird (Abbildung 5). Dem Messverfahren liegt die Messung der Laufzeit eines Laserimpulses zugrunde. Dabei wird die Laufzeit  $t$  eines Impulses gemessen, der mit bekannter Fortpflanzungsgeschwindigkeit  $c$  ausgesendet wird. Der Impuls läuft vom Sender zum Objekt und wieder zum Empfänger zurück. (Heritage and Large, 2009, Vosselman and Maas, 2010)



Abbildung 5: Messprinzip des Impulsmessverfahrens, eigene Darstellung

Die Distanz des gescannten Objektes lässt sich anschließend direkt aus der Laufzeit  $t$  ableiten.

$$D = \left( \frac{c_0}{2n} \right) * t$$

$c_0$ ...Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (299.792.458 m/s)

$n$ ...Brechungszahl in der Atmosphäre

$$c = \frac{c_0}{n}$$

$c$ ...Signalgeschwindigkeit

Daraus berechnet sich die Distanz wie folgt:

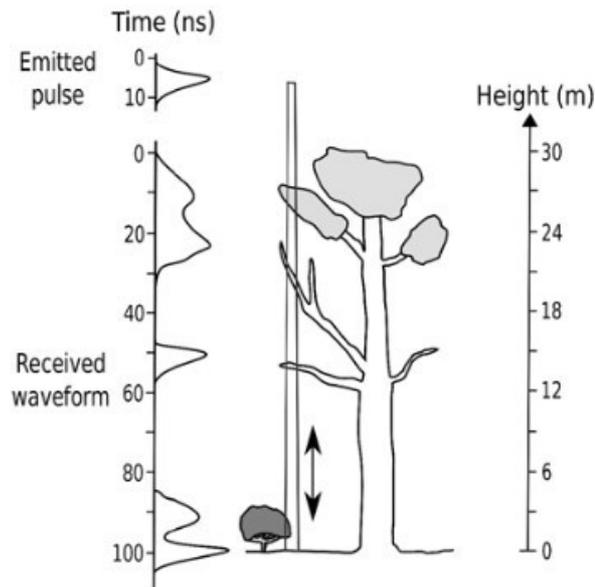
$$D = \frac{c * t}{2}$$

(Joeckel and Stober, 1991)

Das Impulsmessverfahren hat eine durchschnittliche Messrate von 50.000 Punkten pro Sekunde. Mit dem Verfahren werden Reichweiten von bis zu 6 km erreicht. Beim Phasenvergleichsverfahren hingegen sendet der Scanner elektromagnetische Wellen unterschiedlicher Wellenlänge aus, die anschließend miteinander verglichen werden. Durch Messung der Phasenverschiebung kann die Distanz zum Objekt berechnet werden. Das Messverfahren weist hohe Genauigkeit, hohe Messgeschwindigkeit (500.000 Punkte/s) sowie hohe Auflösung auf. Allerdings ist die Reichweite mit ca. 150 m nicht so hoch wie beim Impulsmessverfahren. (Heritage and Large, 2009, Vosselman and Maas, 2010)

Eine weitere, geometrische Methode stellt das Triangulationsverfahren dar. Dabei werden Laserstrahlen von einer Basis mit bekannter Länge aus emittiert. Das vom Zielobjekt reflektierte Licht wird von einer Photodiode aufgenommen. Je nach Entfernung des Objektes ergibt sich eine Verschiebung des Lichtimpulses, anhand dessen die Distanz berechnet werden kann. Der Scanner sendet moduliertes Laserlicht aus und vergleicht dieses mit dem am Objekt reflektierten Licht, das zum Scanner zurückgesandt wird. In weiterer Folge wird aus der Phasendifferenz des Lichts die Entfernung des Objekts vom Scanner sowie die Intensität des reflektierten Signals berechnet. Im Scangerät befindet sich ein rotierender Ablenkspiegel. Dieser bewegt sich langsam in der horizontalen und schnell in der vertikalen Ebene und erfasst so den gesamten Messraum. (Luhmann and Mueller, 2011)

Als Resultat des Scans entsteht ein gleichmäßiges Raster aus zufälligen Objektpunkten. Laserscanner messen neben der Distanz auch die Intensität der reflektierten Welle sowie Informationen über die Form des zurückgeworfenen Echos. Full-Waveform Laserscanner können zusätzlich zur Distanz des Scanobjektes Weite und Amplitude, also die gesamte Wellenform des reflektierten Echos aufnehmen (Abbildung 6). So erhält man, zusätzlich zur 3D Position des Objektes, die Amplitude des reflektierten Signals, das Auskunft über die Reflektanz der gescannten Oberfläche liefert. Weiters wird die Breite des zurückgeworfenen Echos gemessen, die Informationen über die genauere Struktur des gescannten Objekts liefert. (Wagner et al., 2004, Hollaus and Hoefle, 2010, Deems et al., 2013)



**Abbildung 6: Ausgesandte und empfangene Signale eines Full-Waveform Laserscanners auf einer bewaldeten Fläche (Mallet and Bretar, 2009)**

Zur vollständigen Erfassung eines Objektes ist es meist notwendig, das Objekt von mehreren Scanpositionen (SP) aus aufzunehmen. Da sich jeder einzelne Scan in einem eigenen, lokalen Koordinatensystem befindet, müssen anschließend alle Einzelscans in einem übergeordneten Koordinatensystem verknüpft werden. In weiterer Folge kann die übergeordnete Punktwolke zur Modellierung und Analyse verwendet werden. Dabei wird jeder Punkt durch dreidimensionale Koordinaten, die sich auf den Standpunkt des Scanners beziehen, beschrieben. So wird das Untersuchungsobjekt in Form einer Punktwolke dargestellt, die anschließend visualisiert und analysiert werden kann. (Heritage and Large, 2009) Weitere Methoden zur Untersuchung gravitativer Massenbewegungen sind Globale Positionsbestimmungssysteme (GPS) sowie Differentielle Radar-Interferometrie (DInSAR) (Tseng et al., 2013).

### 2.3.2. Untergrunduntersuchungen

Zur Untersuchung des Zustandes des Untergrundes werden meist geophysikalische und geotechnische Methoden angewendet. Geophysikalische Methoden werden zur Betrachtung der internen Beschaffenheit des Hanges genutzt. Dabei werden Methoden wie Geoelektrik, -seismik, -radar oder -magnetik eingesetzt. Dadurch werden Charakteristika des Untergrundes wie die Tiefe des anstehenden Gesteins, stratigrafische Schichten oder wassergesättigte Flächen identifiziert. Außerdem können Aufbau, Porosität und Dichte des Untergrundmaterials untersucht werden. (Highland and Bobrowsky, 2008, Zangerl et al., 2008)

Bei seismischen Verfahren werden auf Basis der Ausbreitung von elastischen Wellen Rückschlüsse auf das Untergrundmaterial gezogen. Mittels Georadar können Untergrunduntersuchungen bis zu einigen Zehnermetern im Untergrund durchgeführt werden. Dabei sendet eine Antenne einen Impuls im Radiofrequenzbereich aus, der wiederum von einer weiteren Antenne empfangen wird. Bei Materialgrenzen im Untergrund wird das Material durchgelassen oder reflektiert. (Zangerl et al., 2008) Unter anderem wenden Prager et al. (2006) Georadar zur Untersuchung von Ablagerungsgebieten gravitativer Massenbewegungen an. Die Methode wird dabei eingesetzt um Mächtigkeiten abzuschätzen sowie innere Strukturen zu identifizieren.

Die Anwendung von Geoelektrik ist eine weitere geophysikalische Methode. Dabei wird der spezifische Widerstand der Untergrundschichten gemessen. Je nach aufgenommenem Wert können Rückschlüsse auf das Untergrundmaterial gezogen werden. Hänge werden dabei in Hinblick auf Bodenschichten, Scherflächen, interne Strukturen sowie hydrologische Eigenschaften untersucht (Perrone et al., 2014).

Eine weitere Möglichkeit zur Untersuchung des Untergrundes stellen Bohrungen dar. Mithilfe der Methode werden Eigenschaften gravitativer Massenbewegungen wie die interne Struktur, Volumen und Mächtigkeit oder hydrogeologische Verhältnisse im Untergrund untersucht. Bohrungen werden häufig mit hochentwickelten Messinstrumenten kombiniert. Bewegungen und Deformationen werden mit Inklinometern und Extensometern gemessen. Weiters werden Kluft- und Porenwasserdruck in den betroffenen Hängen mithilfe von Piezometern untersucht. Zusätzlich werden mikroseismische Aktivitäten durch Bohrlochgeophone überwacht. (Zangerl et al., 2008)

### 3. Methodik

Dieses Kapitel befasst sich mit der methodischen Herangehensweise, die in Abbildung 7 dargestellt ist. Zunächst wird auf die Arbeit im Gelände eingegangen. Dabei werden die Planung der Vorgehensweise sowie die Datenaufnahme beschrieben. In einem nächsten Schritt wird die Datenaufbereitung erläutert. Schließlich wird die Durchführung der Datenanalysen dargestellt. Zur Auswertung der Daten werden die Software RiSCAN PRO, OPALS sowie ArcMap verwendet. Da die innerhalb der Programme verwendeten Tools nur in englischer Sprache definiert sind, werden deren Bezeichnungen im Lauf der folgenden Kapitel in der Originalsprache belassen.

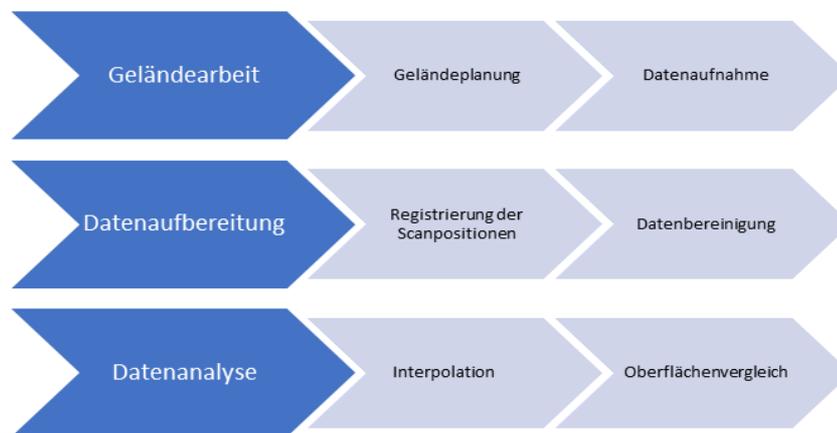


Abbildung 7: Vorgehensweise bei der Aufnahme, Aufbereitung und Analyse der TLS-Daten

#### 3.1. Geländearbeit

In folgendem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Planung der Geländeaufenthalte sowie die Durchführung der Aufnahmen im Untersuchungsgebiet beschrieben.

##### 3.1.1. Geländeplanung

Um einen Überblick über das Untersuchungsgebiet zu erhalten, werden im Vorfeld Satellitenbilder aus Basiskarten des Programmes ArcGIS sowie das Programm Google Earth herangezogen. Überdies werden vorhandene Kartierungen und Gutachten der WLV analysiert, um die ungefähre Abgrenzung der Rutschung sowie die allgemeinen Standortbedingungen einschätzen zu können. Weiters wird eine Geländebegehung vor Ort durchgeführt, um detaillierte Informationen über die aktuelle Lage vor Ort zu erhalten.

Bei der Planung der TLS-Aufnahmen werden zunächst die genauen Abgrenzungen des Untersuchungsgebietes, das durch die Scans abgedeckt werden soll, ausgewählt. Dabei sollen die Scans nicht nur die Rutschfläche, sondern auch einen Teil der Umgebung abdecken.

Allerdings wird bei der Auswahl des Untersuchungsgebietes darauf geachtet, dass die Fläche so groß wie nötig, jedoch so klein wie möglich ist. Denn je größer die aufzunehmende Fläche ist, desto länger dauert die Datenaufnahme und desto größere Datenmengen entstehen. Folglich erhöht sich mit zunehmender Aufnahme­fläche der Zeitaufwand.

Nachdem die Abgrenzung des Untersuchungsgebietes definiert ist, werden Anzahl und Platzierung der Scanpositionen festgelegt. Durch die Wahl des Standortes und der Anzahl der SPs soll maximale Genauigkeit und Auflösung der 3D-Punktwolken erreicht werden. Eine Grundvoraussetzung ist, dass sich die Aufstellungsstandorte auf frei zugänglichen Grundstücken befinden. Bei der Auswahl der Scanpositionen wird darauf geachtet, dass jede Position einen maximalen Abdeckungsbereich liefert. Überdies werden Hindernisse im Sichtfeld des Scanners vermieden, damit Abschattungen in den anschließenden Aufnahmen minimiert werden. Außerdem ist die minimale und maximale Entfernungsbeschränkung des Scanners in Betracht zu ziehen. Es wird darauf geachtet, dass die Scanpositionen weit voneinander entfernt sind, um das Untersuchungsgebiet aus verschiedenen Winkeln aufnehmen zu können. Im Sinne der Effizienz wird eine minimale Anzahl an Scanpositionen angestrebt. Dabei soll dennoch eine optimale Abdeckung des Untersuchungsgebietes sichergestellt werden.

Bei der Festlegung der Geländetage wird darauf geachtet, dass ein zeitlicher Abstand von einigen Wochen zwischen den Terminen besteht, um eventuelle Bewegungen am Hang zu verdeutlichen. Um optimale Aufnahmebedingungen zu gewährleisten, werden Aufnahmetage vermieden an denen Regen, Nebel oder Schnee anhand des Wetterberichts vorausgesagt wird. Falls die Wetterverhältnisse im Untersuchungsgebiet nicht optimal sind, werden Geländetage daher spontan angesetzt oder verschoben.

### 3.1.2. Datenaufnahme

Zur Aufnahme der Daten wird der Laserscanner RIEGL VZ-6000 verwendet (Abbildung 8). Dabei handelt es sich um einen hochauflösenden terrestrischen 3D-Scanner.



Abbildung 8: Laserscanner RIEGL VZ-6000

In Tabelle 3 sind die technischen Details des verwendeten Gerätes aufgelistet. Der Scanner ist in die Laserklasse 3B einzuordnen. Der VZ-6000 sendet Wellenlängen im Bereich von bis zu 1064 nm aus und kann Objekte bis zu einer Reichweite von bis zu 6 km aufnehmen.

Tabelle 3: Technische Spezifikationen des RIEGL VZ-6000

RIEGL VZ-6000	
Laserklasse	3B
Maximale durchschnittliche Leistung	35 mW
Ungefähre Pulsdauer	3 ns
Wellenlänge	1064 nm
Maximale Reichweite	6000 m
Sichtfeld	60°x360°

Der RIEGL VZ-6000 weist einen Full-Waveform Sensor auf. Dieser registriert die gesamte Variation der empfangenen, zeitabhängigen Signalstärke. Daraus lassen sich zusätzliche Parameter wie die Echobreite oder die Signalamplitude ableiten. Die eingebaute, kalibrierte 3 Megapixel Kamera ermöglicht es, ein fotorealistisches virtuelles Modell des gescannten Gebietes zu erstellen.

Zur Datenaufnahme wird die Software RiSCAN PRO (2.1.1) verwendet. Dabei handelt es sich um eine Software zur Aufnahme, Darstellung, Verarbeitung und Analyse von 3D-Punktwolken, die mittels terrestrischem Laserscanner aufgenommen werden. Die Software ist ebenfalls von der Firma RIEGL entwickelt und auf den Laserscanner VZ-6000 abgestimmt. RiSCAN PRO weist eine projektorientierte Struktur auf. Dabei werden alle Daten eines Projektes in einem Verzeichnis gespeichert. Dieses enthält alle Scandaten, Fotos, Informationen zur Registrierung sowie Ergebnisse weiterführender Berechnungen und Analysen. (RIEGL, 2005)

Zur Datenaufnahme wird der Scanner auf einem Stativ in Augenhöhe befestigt. Das Stativ wird auf stabilem Untergrund aufgestellt, um eine ungestörte Aufnahme zu ermöglichen. Von jeder Scanposition aus wird zunächst ein zweidimensionaler Überblickscan gemacht um sicherzustellen, dass die gesamte Fläche des Untersuchungsgebietes aufgenommen wird. Anschließend werden ein oder mehrere Detailscans durchgeführt. Nach jeder Aufnahme wird direkt am Laserscanner oder mittels eines Laptops überprüft, ob der Scan erfolgreich durchgeführt und der gewünschte Ausschnitt gescannt wurde. Die Einstellungen der Scanparameter werden dabei als Kompromiss zwischen höchstmöglicher Auflösung im UG und minimaler Aufnahmezeit gewählt (Fischer et al., 2016).

Zusätzlich werden bei einigen Scans Fotos mithilfe der eingebauten, kalibrierten Kamera gemacht. Durch das im Rahmen der Datenaufbereitung erstellte fotorealistische Modell wird die Orientierung im Untersuchungsgebiet sowie die Identifizierung von Landschaftsmerkmalen erleichtert. Weiters werden mit einer Kamera (Nikon Coolpix) an den einzelnen Geländetagen Fotos des gescannten Gebietes aufgenommen. Dabei wird die Veränderung der Vegetation im Jahresverlauf dokumentiert. Außerdem wird das Wetter und dessen Entwicklung im Verlauf der Scandurchführung dokumentiert.

### **3.2. Datenverarbeitung**

Nachdem die Datenaufnahme im Gelände stattgefunden hat, werden die einzelnen Scans untersucht. Dabei liefert eine Visualisierung der Punktwolken eine einfache, effiziente Möglichkeit, um festzustellen, ob das gesamte UG aufgenommen wurde. Weiters kann so eine erste Einschätzung der Qualität der Daten vorgenommen werden. (Vosselman and Klein, 2010) Im Anschluss an die erste Sichtung und Auswahl der Daten müssen die Punktwolken aufbereitet werden, um weitere Informationen zu erhalten. Die im Rahmen der Datenaufbereitung notwendigen Schritte, wie Registrierung und Filterung, werden in diesem Kapitel erläutert. Für die Sichtung sowie Aufbereitung der Daten wird wiederum die Software RiSCAN PRO in der PC-Desktop Version verwendet.

#### **3.2.1. Sichtung der Scans**

Als Ergebnis der Aufnahmen entstehen 3D-Punktwolken, die das UG in Form von Digitalen Oberflächenmodellen abbilden. Diese stellen die gesamte Oberfläche des UG inklusive Vegetation und Objekten, wie Gebäuden und Autos, dar. Im Vorfeld der Bearbeitung der Daten müssen die geeigneten Scans ausgewählt werden. Um sich einen ersten Überblick über die Daten zu verschaffen, werden die aufgenommenen 3D-Punktwolken in RiSCAN PRO visualisiert. Jede Punktwolke wird aus verschiedenen Blickwinkeln untersucht. Dabei können Punktwolken anhand von Parameterwerten, wie Reflektanz oder Höhe der Punkte, über einer definierten Ebene eingefärbt werden. Infolgedessen werden lokale Unterschiede betont, was die Interpretation vereinfacht (Vosselman and Klein, 2010).

Für jeden Geländetermin wird pro Scanposition ein Scan ausgewählt, der im Anschluss zur weiteren Bearbeitung und Auswertung verwendet wird. Dabei wird anhand mehrerer Kriterien entschieden, welche Scans im Rahmen der weiteren Arbeitsschritte aussagekräftige Ergebnisse liefern. Die Grundvoraussetzung ist, dass der aufgenommene Scan das zuvor definierte Untersuchungsgebiet abbildet. Weiters soll sich die Punktwolke nicht zu weit über das Untersuchungsgebiet hinaus erstrecken. Durch einen bereits gut abgegrenzten Scan kann die Datenmenge so gering wie möglich gehalten werden. Dadurch wird ein geringerer Zeitaufwand bei der anschließenden Datenbereinigung erzielt. Zudem sind Scans von Vorteil, die wenige Störfaktoren wie Luftpartikel oder Regen aufweisen. Ein weiterer, wesentlicher Faktor ist, dass die Scans die Rutschfläche und deren Umgebung deutlich darstellen. Dabei wird vor allem auf eine hohe Punktdichte im Bereich der Abrisskante geachtet.

#### **3.2.2. Scan Position Registrierung**

Nach der Auswahl der geeigneten Punktwolken werden die Scans in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt. Das geschieht durch den Vorgang der Registrierung. Die Qualität der Registrierung spielt eine tragende Rolle in Bezug auf die Aussagekraft der Ergebnisse der anschließenden Analysen. Bei der Registrierung werden die aufgenommenen Daten aus einem Koordinatensystem, das für jeden Scan individuell ist, in ein gemeinsames, übergeordnetes Koordinatensystem überführt. (Straub et al., 2009, Vosselman and Klein, 2010)

Zunächst werden die Punkte eines jeden Scans im sogenannten Standpunktkoordinatensystem oder Scanner Own Coordinate System (SOCS) dargestellt. Diese Daten haben noch keinen räumlichen Bezug und die einzelnen Scans stehen in einer beliebigen Beziehung zum Scanner. Bei der Registrierung werden die einzelnen Scans vom SOCS in ein gemeinsames Projektkoordinatensystem (PRCS) überführt. Dadurch weisen alle Scans dieselbe relative Orientierung auf.

Die der Registrierung zugrundeliegende Methode ist die Helmert-Transformation. Dabei handelt es sich um eine räumliche Ähnlichkeitstransformation. Der Vorgang dient der Überführung von dreidimensionalen, kartesischen Koordinaten. Der Prozess wird auch als Sieben Parameter Transformation bezeichnet. Wie der Name bereits andeutet werden dabei sieben Parameter transformiert.

- 3 Verschiebungen  $T_x, T_y, T_z$
- 3 Drehungen ( $\omega, \varphi, \kappa$ )
- Maßstabsfaktor  $\lambda$

Mithilfe dieser 7 Parameter kann eine Punktwolke an die andere angeglichen werden. In Abbildung 9 wird eine Punktwolke aus dem SOCS ( $X_2, Y_2, Z_2$ ) mithilfe der sieben Parameter in das PRCS ( $X_1, Y_1, Z_1$ ) überführt. (Hashemi et al., 2013)

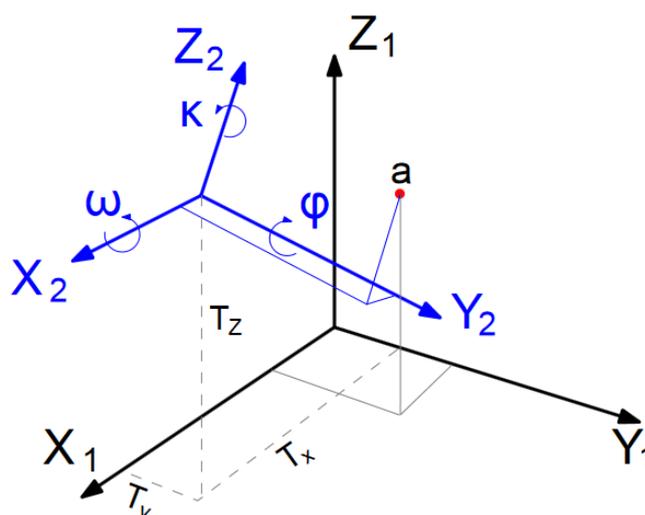


Abbildung 9: Helmert Transformation (Hashemi et al., 2013)

In der Praxis findet die Registrierung von 3D-Punktwolken zielmarken- oder oberflächenbasiert statt. Bei der ersten Variante werden hochreflektierende Zielmarken im UG angebracht. Diese können aufgrund ihrer hohen Reflektanz in allen Scans identifiziert werden und ermöglichen so die Registrierung. (Alba et al., 2006, Milan et al., 2007) Bei der oberflächenbasierten Registrierung werden Geometrien verwendet, die aus den Scans abgeleitet werden. Dabei werden bereits im Scan vorhandene ebene Geometrien wie Gebäudekanten oder Hauswände verwendet. Alternativ können Geometrien mittels mathematischer Berechnungen aus den Scans abgeleitet werden. (Bae and Lichti, 2008, Olsen et al., 2010, Schuerch et al., 2011, Brodu and Lague, 2012, Theiler and Schindler, 2012)

Um ebendiese Transformation bei den 3D-Punktwolken der Hofermühl-Rutschung durchzuführen, wird in RiSCAN PRO das „Coarse Registration“ Tool verwendet. Dadurch wird eine erste Grobregistrierung durchgeführt. So werden alle vorhandenen Punktwolken in dasselbe Koordinatensystem (PRCS) überführt. Dazu werden korrespondierende Punkte ausgewählt, die in allen Scans eindeutig identifiziert werden können. Diese Verknüpfungspunkte müssen sowohl im bereits registrierten Scan (Referenzscan) als auch im zu registrierenden Scan vorhanden sein. Als korrespondierende Punkte sind Hausecken, Zäune oder generell Punkte mit hoher Reflexion gut geeignet. Die Punkte sind möglichst gleichmäßig auf den Scans zu verteilen. In RiSCAN PRO werden die beiden Punktwolken vergleichend nebeneinandergestellt. In der Folge werden die korrespondierenden Punkte manuell in beiden Scans ausgewählt. Nachdem mindestens vier korrespondierende Punktpaare gesetzt sind, kann die Registrierung abgeschlossen werden. (RIEGL, 2005)

Durch diese Variante der Grobregistrierung kann bereits eine hohe Genauigkeit der Anpassung erreicht werden. Dennoch können Fehler entstehen, die durch Ungenauigkeiten in der manuellen Definition der korrespondierenden Punkte begründet ist. Eine Feinregistrierung der grobregistrierten Punktwolken ist an dieser Stelle ein wichtiger Schritt der Datenaufbereitung. Dieser kann die Qualität der anschließenden Ergebnisse der Oberflächenanalyse steigern. (Prokop and Panholzer, 2009)

Zur Feinregistrierung wird das „Multi Station Adjustment“ (MSA) von RiSCAN PRO angewendet. Der Algorithmus minimiert Abweichungen in den Oberflächen der zu registrierenden Punktwolken. Der Vorgang basiert auf dem mathematischen Verfahren der „Methode der kleinsten Quadrate“. Grundlegend wird dabei in einer Punktwolke eine Kurve gesucht, die so nahe wie möglich entlang aller Punkte einer Punktmenge verläuft. Die Kurvenparameter werden numerisch definiert, indem die Summe der Quadrate aller vertikalen Abstände dieser Punkte von der Geraden minimiert wird. (Schwarz and Köckler, 2013)

Auf Basis dieses Verfahrens wird beim MSA die Orientierung und Position jeder Scanposition im Laufe mehrerer Wiederholungen modifiziert. Im Verlauf der Berechnungen wird hiermit die beste Übereinstimmung identifiziert. Dabei werden Ebenen definiert, die auf beiden untersuchten Scanpositionen vorhanden sind. Zunächst müssen mehrere korrespondierende Ebenen manuell definiert werden, die möglichst ausgeglichen auf der untersuchten Fläche verteilt sind. In der Natur sind kaum glatte Oberflächen vorzufinden, anhand derer das MSA durchgeführt werden kann. Allerdings stellen anthropogene Strukturen, wie Gebäude, geeignete Formen dar. Je mehr Ebenen definiert werden, desto höher wird die Genauigkeit der Registrierung. (RIEGL, 2005, Bremer and Sass, 2012)

Das MSA basiert auf dem „Iterative Closest Point“ Algorithmus (ICP). Dieser wurde von Besl und McKay (1992), Chen und Medioni (1992) sowie Zhang (1994) entwickelt. Das grundlegende Prinzip basiert auf drei Phasen. Zunächst wird nach Punktpaaren in zwei Datensätzen gesucht, die den jeweils geringsten Abstand zueinander aufweisen. Der Algorithmus berechnet anschließend die Transformationsparameter mithilfe derer eine Punktwolke an eine vorhandene angepasst werden kann. Schließlich werden die Parameter iterativ angepasst, bis die Summe der Quadrate der Abstände minimiert ist. (Besl and McKay, 1992, Gruen and Akca, 2005, Prokop and Panholzer, 2009)

Im Verlauf des MSA bleibt ein Scan „gesperrt“, also unverändert, während der andere so modifiziert wird, dass die Distanz und somit der Fehler zwischen den beiden korrespondierenden Ebenen minimiert wird. Im Verlauf der Arbeit wird ein sogenannter „Referenzscan“ definiert. Dieser Scan definiert die Ausrichtung des Koordinatensystems aller Scans (PRCS). Alle anderen Scans werden an diesen Scan angepasst und in Bezug zu diesem registriert.

Alternativ können hochreflektierende Passpunkte zur Registrierung dienen. Durch automatische Identifikation der Passpunkte kann in RiSCAN PRO die automatische Registrierung der Punktwolken durchgeführt werden. Aufgrund der hohen Reflexion der Passpunkte kann RiSCAN PRO die Objekte automatisiert in allen Scans identifizieren. Die Punkte dienen in weiterer Folge als Verknüpfungspunkte, die alle Scans übereinanderlegen können.

Nachdem die Grobregistrierung sowie das MSA abgeschlossen sind, werden die einzelnen Scanpositionen eines jeden Scantermins kombiniert. Die Analysen und Filter, die nachfolgend durchgeführt werden, werden auf die übereinandergelegten SPs eines Scantermins angewandt.

### **3.2.3. Datenbereinigung**

Im Anschluss an die Auswahl und Registrierung der Scans werden die digitalen Oberflächenmodelle in Digitale Geländemodelle (DGM) umgewandelt. Im Vergleich zum DOM reproduziert ein DGM die natürliche Oberfläche des UG exklusive der Vegetation und der Gebäude. Dadurch wird ein direkter Blick auf die Bodenoberfläche des untersuchten Hanges ermöglicht. Bei der Untersuchung gravitativer Massenbewegungen ist die Trennung von Bodenoberfläche und Vegetation essentiell, um Informationen über Prozessabläufe am Hang ableiten zu können. (Guarnieri et al., 2009) Zur Erstellung der DGMs werden die unerwünschten Punkte durch einen mehrstufigen Filterprozess entfernt. (Bitelli et al., 2004)

Den wichtigsten Aspekt in Bezug auf die Bereinigung der 3D-Punktwolken stellt die Filterung der Vegetation dar. Allerdings führen auch Faktoren wie Regen, Nebel oder sonstige Luftpartikel zu unerwünschten Punkten in den Punktwolken. (Charlton et al., 2009)

### 3. Methodik

---

Die Entfernung dieser Punkte aus den Scans ist eine Voraussetzung, um anschließend aussagekräftige Analyseergebnisse zu generieren. (Vosselman and Klein, 2010)

Vor der Durchführung der Vegetationsfilterung wird jedoch zunächst ein Octree-Filter angewendet. Die Punktdichte der 3D-Punktwolken ist aufgrund variierender Reflexionseigenschaften der untersuchten Objekte regional unterschiedlich. Der Octree-Filter bewirkt, dass Flächen mit besonders hoher Punktdichte entfernt werden, sodass über die gesamte Punktwolke hinweg eine ausgeglichene Punktdichte herrscht. Infolgedessen wird auch die Datenmenge weiter verringert, sodass die Rechenzeit für die weiteren Datenauswertungen minimiert werden kann. Überdies erhöht eine homogene Punkteverteilung die Genauigkeit der anschließenden Triangulierung (3.3.1).

Octrees sind Baumdatenstrukturen, die bei großen Mengen von Punktdaten verwendet werden. So finden sie auch bei der Verarbeitung von TLS-Punktwolken Anwendung. Deren Aufbau ist in Abbildung 10 dargestellt. Ein Octree basiert auf einem Würfel. Die Größe dieses Basiswürfels wird im Vorfeld durch Minimum- und Maximumwert der X-, Y-, Z- Koordinaten definiert. Der Würfel umfasst die gesamten Daten der 3D-Punktwolke. Der Würfel wird in 8 gleichgroße Würfel unterteilt. Dieser Würfel kann sich rekursiv wiederum in 8 kleinere Würfel unterteilen. Die Anzahl der Teilungen und die Größe des kleinsten Würfels werden im Vorfeld definiert. Nach dem Einsatz des Octree-Filters enthält jeder Würfel einen Punkt. Dieser ist jeweils der Schwerpunkt der gemittelten Punktmenge. Als Ergebnis des Filtervorganges entsteht eine Punktwolke, deren Punktdichte eine homogenere Verteilung aufweist. Dadurch werden Regionen mit sehr dichten Punktansammlungen aus dem Scan entfernt (RIEGL, 2005, Vosselman and Maas, 2010)

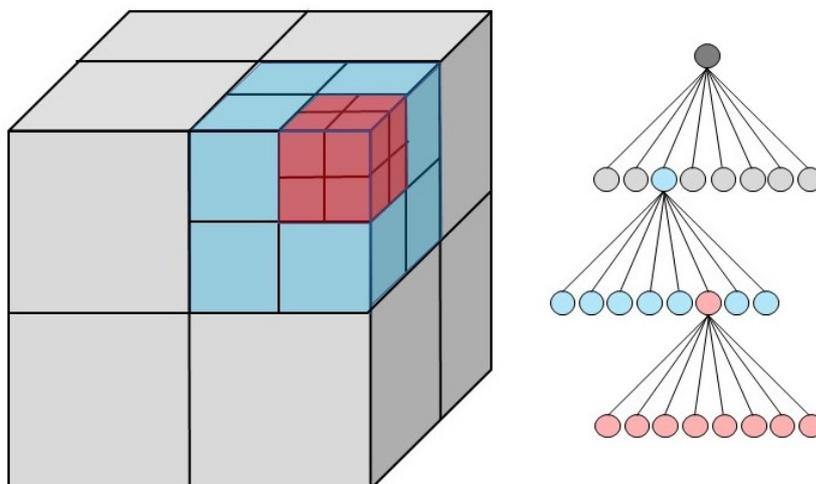


Abbildung 10: Schema des Octree, würfelförmige Unterteilung des Volumens (nach Chávez und Karstoft (2012))

Im Anschluss an den Octree-Filter wird schließlich der Vegetationsfilter auf die Punktwolken angewendet. Bei der Filterung wird prinzipiell eine Klassifikation in „Gelände“ und „Nicht-Gelände“ Punkte durchgeführt (Kraus and Pfeifer, 2001). Die Klassifizierung findet mithilfe des RiSCAN „Terrain Filters“ statt. Bei der Filterung werden die Distanzen der Punkte von einer geschätzten Bodenoberfläche berechnet. Je nach Entfernung werden die Punkte als „Gelände“ oder „Nicht-Gelände“ definiert. Der Filter arbeitet vom Groben ins Feine und wendet unterschiedliche Detaillevels in hierarchischer Form an.

Der Filterprozess findet auf Basis einer Gitterdarstellung der Daten auf verschiedenen Levels statt. Zunächst wird ein grobmaschiges Gitter über die Punktwolke gelegt. Für jede Gitterzelle wird, wenn Punkte vorhanden sind, ein repräsentativer Punkt definiert. Aus den repräsentativen Gitterpunkten wird im Anschluss in jeder Zelle eine Ebene durch den repräsentativen Punkt und dessen Nachbarn definiert. So wird eine lokale Oberfläche für jede besetzte Zelle erstellt. Jede Zelle besitzt einen definierten Toleranzbereich, in dem sich die neu generierte Ebene befindet. Alle Punkte, die sich außerhalb dieses Toleranzbereiches befinden, werden als „Nicht-Gelände“ definiert. Die so markierten Punkte werden beim nächsten, feineren Filterschritt nicht mehr beachtet. Über die restlichen Punkte wird ein feineres Raster gelegt. Die Zellen werden von einem Level zum nächsten durch den Faktor 2 dividiert. Innerhalb dieses Rasters werden wiederum repräsentative Punkte für jede Zelle definiert, aus denen wiederum Ebenen generiert werden. Diese Schritte werden wiederholt bis das, im Vorfeld definierte, feinste Level erreicht ist. Nach der Durchführung des hierarchischen Filters wird ein abschließender Filter mit einem finalen Toleranzwert durchgeführt. (RIEGL, 2005)

Bei der Anwendung des Terrain Filters werden zunächst die Werte verschiedener Parameter festgelegt. Dabei sind fünf Parameter von Bedeutung. Die Größe des Basisrasters bezieht sich auf das feinste Level der Analyse. Der Wert definiert die Seitenlänge (in m) einer quadratischen Zelle des Basisrasters. Weiters wird die Anzahl der Levels, die für den hierarchischen Filterprozess angewendet werden, definiert. Über die Angabe des Perzentils wird festgelegt, wie viel Prozent der Punkte einer Zelle unter dem repräsentativen Punkt einer Zelle liegen. Der Toleranzfaktor definiert den Toleranzwert oberhalb beziehungsweise unterhalb der Ebene. Dieser wird für eine Zelle bestimmter Größe geschätzt. Der Wert wird in Einheiten der Zellgröße des jeweiligen Levels angegeben. Alle Punkte, die sich im Level außerhalb des Toleranzbereichs befinden, werden als „Nicht-Gelände“ definiert. Durch den maximalen Neigungswinkel wird festgelegt, bis zu welchem Winkel der Geländeneigung (in °) ein Filter angewendet wird. Die Geländeneigung ist dabei die Neigung der geschätzten Fläche der einzelnen Zellen. So wird bei einem Wert von 90° der Filter überall angewendet. Ein Wert unter 90° legt fest, dass steile Gebiete nicht gefiltert werden. (RIEGL, 2005)

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Punktwolken in einem zweistufigen Prozess gefiltert. Ein erster Filter dient dazu, hohe Objekte zu filtern, unter denen sich unmittelbar nur wenige Geländepunkte befinden. Dadurch können unter anderem Baumkronen entfernt werden. Dieser erste grobe Filter klassifiziert tendenziell einen geringeren Teil der Punktwolke als Vegetation („weicher Filter“). Anschließend daran wird ein Filter mit Parametern gewählt, die einen größeren Anteil der Punktwolke als „Nicht Gelände“-Punkte identifizieren („harter Filter“). Da dieser „harte“ Filter jedoch tendenziell zu viele Punkte als „Nicht-Gelände“ definiert, wird die Klassifikation dieses Filters manuell überprüft und gegebenenfalls korrigiert. Durch diese Kombination von automatisiertem Filter mit manueller Korrektur einzelner Punkte kann ein optimales Ergebnis der Vegetationsfilterung erreicht werden.

### **3.3. Datenanalyse**

Nach der Bereinigung der Daten können nun Analysen durchgeführt werden. Dabei ist es das Ziel Veränderungen festzustellen, die im Lauf der Zeit im UG, vor allem auf der Rutschfläche stattgefunden haben.

#### **3.3.1. Oberflächenvergleich in RiSCAN PRO**

Um einen Oberflächenvergleich durchführen zu können müssen die Punktwolken zunächst einer Interpolation unterzogen werden. Dadurch können die Daten in DGMs umgewandelt werden. Die Punktwolken werden in einen Triangulierungsalgorithmus eingefügt. Infolgedessen wird ein Trianguliertes unregelmäßiges Netz (Triangulated Irregular Network) generiert. Dabei handelt es sich um ein geschlossenes Polygonnetz, das auch als „Mesh“ bezeichnet wird.

Die Triangulierung basiert auf einer simplen, geometrischen Datenstruktur. Durch den Prozess werden Oberflächen generiert, indem die Punkte in Form von Dreiecken miteinander verbunden werden. Dadurch wird die gesamte, untersuchte Punktmenge in ein Dreiecksnetz umgewandelt. Bei der Triangulierung wird eine Menge von Punkten durch eine maximale Anzahl an Strecken miteinander verbunden. Dabei bedeutet maximal, dass keine weitere Strecke mehr hinzugefügt werden kann ohne dass sich Strecken kreuzen. Triangulierungen eignen sich ideal zur Modellierung der Oberfläche von dreidimensionalen Objekten. (Aichholzer and Juettler, 2014)

Um die Oberfläche der 3D-Punktwolken des UG zu modellieren wird der 2D-Delaunay Triangulierungsalgorithmus angewendet. Diesem liegt das Triangulierungstool von RiSCAN zugrunde. Im Verlauf der Delaunay-Triangulierung werden Punkte zu Dreiecken vernetzt. Dabei gilt die sogenannte „Umkreisbedingung“:

*„Die Delaunay-Triangulierung einer Punktmenge ist jene Triangulierung, bei der für jedes Dreieck gilt, dass sein Umkreis keine weiteren Punkte der Punktmenge enthält.“* (Aichholzer and Juettler, 2014, p.49)

Mittels RiSCAN PRO kann die Triangulierung auf zwei Wegen durchgeführt werden. Dabei können die „Plane Triangulation“ sowie die „Polar Triangulation“ angewendet werden. Im Lauf der Arbeit wird die „Plane Triangulation“ verwendet. Dabei wird der maximale und minimale Winkel der Dreiecke, die maximale Kantenlänge sowie der maximale Neigungswinkel der Oberfläche bis zu dem ein Dreieck generiert wird festgelegt. Die Triangulierung wird für alle Scantermine durchgeführt. Als Ergebnis der Triangulierung entsteht eine Menge von Dreiecken, die sich über den Bereich der Punktwolke erstrecken. Die Neigung, Höhenlage und Ausdehnung jedes Dreiecks wird dabei durch die drei ursprünglichen Punkte der Punktwolke bestimmt, die das Dreieck definieren.

Nach Erstellung der TINs wird schließlich der Oberflächenvergleich mittels RiSCAN PRO durchgeführt. Das „Surface Comparison“ Tool ermöglicht einen Vergleich der Oberflächen der generierten DEMs. Dabei wird die Oberfläche eines Scans („Basisscan“) der eines anderen Scans („Referenzscan“) gegenübergestellt. Dabei muss der Referenzscan ein trianguliertes Mesh sein. Für jeden Datenpunkt des Basisscans wird die Distanz zum Differenzscan berechnet. Als Ergebnis entsteht eine Visualisierung der Oberflächendifferenzen, aus der Entwicklungen des UG im Zeitverlauf abgeleitet werden können.

### **3.3.2. Oberflächenvergleich in ArcMap**

Alternativ zur „Surface Comparison“ mittels RiSCAN PRO wird ein Vergleich der Punktwolken in Form von DEMs of Difference (DoD) durchgeführt. DEM steht für Digital Elevation Model und ist die englische Bezeichnung des Begriffes Digitales Geländemodell (DGM). Die Anwendung von DoDs zum Vergleich von Punktwolken ist eine weit verbreitete Methode in den Geowissenschaften. (Lague et al., 2013)

Zur Erstellung von DoDs werden die 3D-Punktwolken zunächst in Rasterdaten umgewandelt. Für die Bearbeitung der Daten wird OPALS (Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning) in der Version 2.6.1 verwendet. Das System wurde am Institut für Geodäsie und Geoinformation der Technischen Universität Wien entwickelt. OPALS dient der Verarbeitung von 3D-Punktwolken von verschiedenen Arten von Laserscannern. Dabei wird eine schnelle, effiziente Datenverarbeitung sehr großer Punktwolken ( $>10^9$  Punkte) gewährleistet. Es handelt sich um ein modulares Programmsystem im Rahmen dessen man auf einzelne Komponenten zugreifen kann. Diese werden in Form von Paketen zur Verfügung gestellt. (Pfeifer et al., 2014)

Das Ziel der Arbeit mit OPALS ist es aus den Punktwolken GIS Raster Layer zu generieren. Dabei werden DGMs auf Basis der gefilterten Daten erstellt. Dazu werden die Daten zunächst mithilfe des Moduls `opalsImport` importiert. Anschließend werden mittels `opalsCell` Rastermodelle generiert. Dabei wird zunächst eine Pixelgröße für alle Raster definiert. Der Wert der einzelnen Pixel wird aus den Höhenwerten der Punkte, die sich innerhalb des Pixels befinden, abgeleitet. Im Anschluss werden die Raster geglättet, sodass kleine Unregelmäßigkeiten der Oberfläche ausgeglichen werden können. Überdies werden Datenlücken im erstellten Raster gefüllt (`opalsStatFilter`, `opalsAlgebra`). Die umgewandelten Rasterdaten werden alle in demselben Referenzsystem gerahmt werden, sodass alle Raster exakt denselben Ausschnitt darstellen (Barbarella et al., 2017). Nur so kann ein anschließender Vergleich der DGMs durchgeführt werden.

Schließlich werden die generierten Rasterdaten aus OPALS exportiert, um in der Software ArcMap (10.4.1) die DoDs zu erstellen. Bei ArcMap handelt es sich um ein Produkt der Firma ESRI, das der Visualisierung und Analyse verschiedener Arten von raumbezogenen Daten dient. Mithilfe von ArcMap werden DoDs generiert, anhand derer Rückschlüsse auf Veränderungen der Hangoberfläche im UG gezogen werden können. Dazu werden Rasterdatensätze jeweils zwei verschiedener Zeitpunkte miteinander verglichen. Die Raster werden Pixel für Pixel miteinander verglichen. Als Ergebnis erhält man pro Pixel einen Distanzwert. Dieser liefert eine Information über die vertikale Veränderung des jeweiligen Pixels. Die Informationen werden anschließend visualisiert und liefern so ein Modell der Oberflächenveränderungen am untersuchten Hang. (Wheaton et al., 2010, Lague et al., 2013)

## 4. Untersuchungsgebiet

Das folgende Kapitel liefert eine Beschreibung des Untersuchungsgebietes. Im Anschluss an eine geographische Lokalisierung wird auf ausgewählte Umweltfaktoren sowie den Einfluss des Menschen im Gebiet eingegangen.

### 4.1. Lage

Der Standort der Hofermühl-Rutschung befindet sich in Konradsheim, einem Stadtteil der niederösterreichischen Statuarstadt Waidhofen an der Ybbs (Abbildung 11). Der Bezirk hat eine Fläche von 131,2 km<sup>2</sup>, besitzt eine Bevölkerungsdichte von 86 Einwohnern pro km<sup>2</sup> und weist eine Bevölkerungszahl von 11.306 auf. (LandNOE, 2015) Die Rutschung befindet sich circa 5 km südwestlich des Stadtzentrums von Waidhofen an der Ybbs.

### Untersuchungsgebiet Hofermühlrutschung Waidhofen an der Ybbs/NÖ

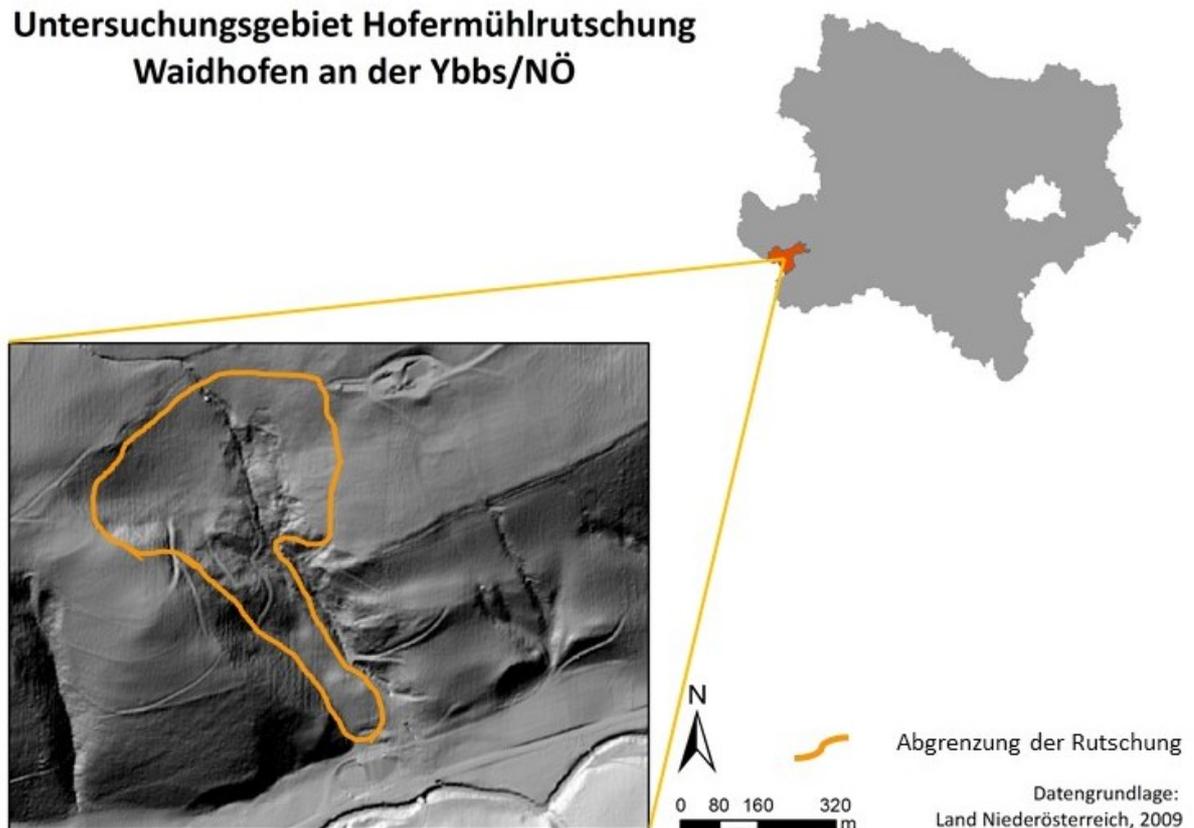


Abbildung 11: Lokalisierung des Untersuchungsgebietes in Niederösterreich

## 4.2. Umweltfaktoren

Das Kapitel behandelt die Gegebenheiten der Umwelt, die das Untersuchungsgebiet großflächig prägen.

### 4.2.1. Klima

In folgendem Absatz wird das Klima im Untersuchungsgebiet anhand von Daten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) beschrieben. Auf der Homepage der ZAMG werden Klimamittelwerte für den Zeitraum von 1981-2010 von circa 160 österreichischen Messstationen öffentlich zur Verfügung gestellt. Die für das Untersuchungsgebiet repräsentative Messstation befindet sich in Waidhofen an der Ybbs ( $47^{\circ}57'28.08''N$ ,  $14^{\circ}47'3.84''O$ ) und ist circa 5,3 km von der Hofermühl-Rutschung entfernt. Die mittlere jährliche Lufttemperatur beträgt  $8,5^{\circ}C$ , wobei der durchschnittliche jährliche Tagestiefstwert  $4,4^{\circ}C$  und der Tageshöchstwert  $13,8^{\circ}C$  beträgt. Wie in Abbildung 12 zu erkennen, schwankt die mittlere monatliche Lufttemperatur zwischen  $-1,5^{\circ}C$  bis  $18,5^{\circ}C$ . Die niedrigsten Werte treten in den Monaten Dezember ( $-0,6^{\circ}C$ ), Jänner ( $-1,5^{\circ}C$ ) und Februar ( $-0,3^{\circ}C$ ) auf. Die höchsten Temperaturwerte finden sich in den Monaten Juni ( $16,7^{\circ}C$ ), Juli ( $18,5^{\circ}C$ ) und August ( $17,7^{\circ}$ ). Die mittleren monatlichen Niederschlagssummen weisen niedrige Werte in den Monaten Jänner (78 mm), Februar (72 mm), April (78 mm) und Oktober (75 mm) auf, während der Niederschlag im Juni (128 mm), Juli (136 mm) und August (122 mm) ansteigt. (ZAMG, 2016)

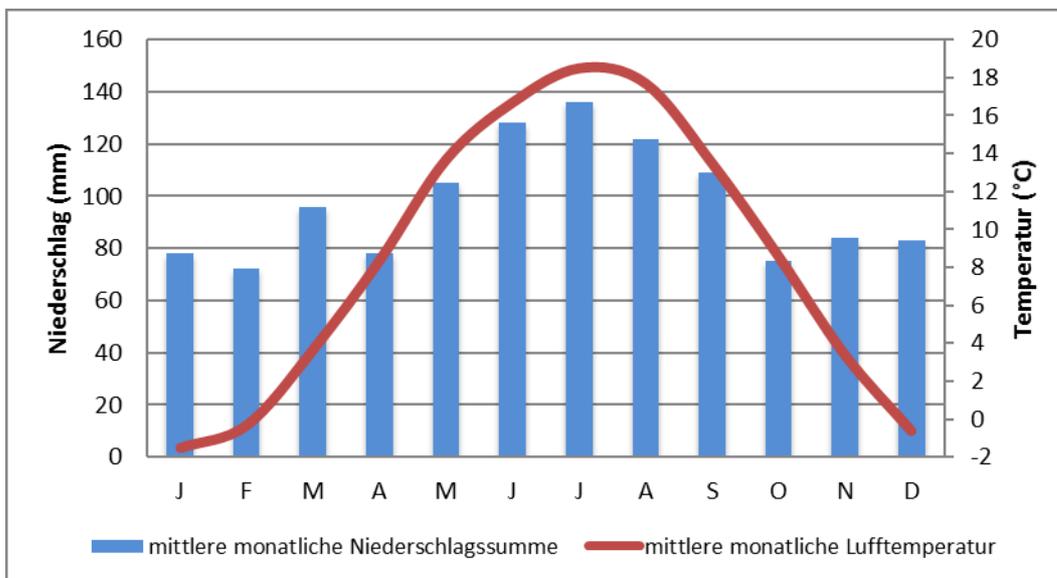


Abbildung 12: Klimadiagramm der ZAMG Messstation in Waidhofen an der Ybbs, 30-jährige Mittelwerte (1981-2010)

### 4.2.2. Geologie

Waidhofen an der Ybbs weist eine komplexe geologische Zusammensetzung auf. Die Fläche setzt sich aus vier tektonischen Großeinheiten zusammen (Schuster et al., 2013):

- Penninikum
- Molassezone
- Helvetikum
- Ostalpin

#### **Penninikum**

Das Penninikum tritt im Untersuchungsgebiet in Form der Rhenodanubischen Flyschzone auf. Der Ursprung dieser Gesteine liegt in einem langgestreckten Tiefseetrog, der vom Rheintal über die Donau bis in den Bisambergzug reichte. In der Unter-Kreide bis ins mittlere Eozän wurden in periodischen Abständen große Mengen an Lockermaterial in Form von Trübströmen vom Rand des Tiefseebeckens in tiefere Bereiche des Trogs verfrachtet. Dort entstanden Wechsellagerungen von Sand-, Ton- und Mergelgesteinen mit großer Mächtigkeit, sogenannte Turbidite. (Schnabel, 2002) Da die Gesteine nicht metamorph überprägt wurden, sind Sedimentstrukturen, wie sedimentäre Schichtung, Strömungsmarken und Spurenfossilien identifizierbar (Schuster et al., 2013). Generell handelt es sich bei der Flyschzone um eine waldreiche Mittelgebirgslandschaft, die meist tiefe Verwitterungsböden mit oberflächlichem Kriechen aufweist. Die Gesteine sind überwiegend wasserundurchlässig, wobei die mergelreichen Schichten anfällig gegenüber gravitativer Massenbewegungen sind. (Schnabel, 2002)

#### **Molassezone**

Das Penninikum in Waidhofen an der Ybbs weist Einschlüsse der „Inneralpinen Molasse“ auf. Diese befindet sich im Bereich der Grestner Klippenzone am Südrand der Flyschzone. Die Inneralpine Molasse beinhaltet die ältesten Gesteine des Molassetroges. Die Gesteine entstanden durch Sedimentation am Südrand der Molasse, von wo aus sie sich im Verlauf von anschließenden Deckenüberschiebungen Richtung Norden verschoben und in den Alpen Deckenbau inkludiert wurden. Im Vergleich zu den umliegenden Gesteinen der Grestner Klippenzone, die aus Eozän bis Oligozän stammen, ist die Schichtfolge sehr jung. An mehreren Stellen ist die Formation mit Buntmergelserien verschuppt. Die Morphologie zeichnet sich durch flache Geländeformen zwischen der nördlich gelegenen Flysch-Hauptdecke und den südlich gelegenen Klippengesteinen und dem Kalkalpennordrand aus. (Schnabel, 2002)

### **Helvetikum**

Der Ortsteil Konradsheim, in dem sich die Hofermühl-Rutschung befindet, liegt am Südrand der Flyschzone vor den Weyerer Bögen. Dort tritt das Ultrahelvetikum in Form der Grestner Klippenzone auf, die sich über Neustift, Konradsheim, Waidhofen an der Ybbs und Scheibbs bis Traisen erstreckt. Das Ultrahelvetikum ist ein Kontinentalschelf des Jura und mittleren Eozän, der sich zwischen dem Helvetischem Schelf im Norden und dem Penninischen Becken im Süden befand. Die Gesteine wurden durch die Hauptdecke des Rhenodanubischen Flysch zur Gänze überschoben und finden sich an dessen Südrand in Form der Klippenzone wieder. Im Bereich der Flyschzone existieren mehrere Klippenzonen, die großteils aus Kalk- und Mergelgesteinen aufgebaut sind. Diese sind dünn- bis mittelbankig und weisen helle, graue und bunte Färbung auf. Der Aufbau des Ultrahelvetikums in diesen schmalen, fensterförmigen Aufschlüssen weist eine intensive interne Tektonik mit zahlreichen Verschuppungen und Verschiebungen auf. Die Grestner Klippenzone setzt sich aus Arkosesandsteinen, dünnplattigen Schiefertonen mit Sandsteineinlagerungen, Grestner Schiefer sowie Kalksandsteinen zusammen. (Thenius, 1974, Tollmann, 1985, Schnabel, 2002, Wessely et al., 2006)

### **Ostalpin**

Waidhofen an der Ybbs befindet sich im Oberostalpin, das im Gegensatz zum Unterostalpin den Hauptanteil der ostalpinen Einheit ausmacht. Das Untersuchungsgebiet befindet sich in den nördlichen Kalkalpen, die den östlichsten Abschnitt des Oberostalpins bilden. Die Gesteine des Gebietes sind überwiegend ehemalige Meeresablagerungen. Sie entstanden, als die Flüsse Verwitterungsmaterial, Sand und Schlamm vom Megakontinent Pangäa an den Schelf der Tethys transportierten. Im tropisch warmen, seichten Meer der Trias bildeten kalkausscheidende Organismen großflächig Riffe und Lagunen, aus denen in weiterer Folge gewaltige Mengen an kalkhaltigem Sediment entstanden. Dieses Material vermischte sich mit den terrigenen Pangäa Sedimenten und lagerte sich in Form von mehreren tausend Meter dicken Schichtfolgen ab. Im anschließenden Prozess der Gebirgsbildung wurden die Schichten mehrfach verformt und überschoben. In Waidhofen an der Ybbs sind vor allem die Opponitz-Formation und der Hauptdolomit vorzufinden, die beide in warmen, seichten Gezeitenbereichen von Lagunen entstanden sind. Die Opponitz Formation gliedert sich in Idealprofilen in Opponitzer Liegendrauwanke, Opponitzer Kalk mit Anteilen von Zementmergel und Mergelkalk sowie Opponitzer Hangendrauwanke. Der Hauptdolomit wurde ebenfalls in Lagunenbereichen abgelagert. Dessen Mächtigkeit nimmt von Norden (100 m) nach Süden (1000-2000 m) zu und weist eine hohe Heterogenität in Farbe, Körnigkeit und Tongehalt auf. (Schnabel, 2002, Wessely et al., 2006, Egger and Wessely, 2014)

### 4.2.3. Landnutzung

Der Verwaltungsbezirk Waidhofen an der Ybbs weist eine Fläche von 13.118,4 ha auf. Davon entfällt der größte Anteil mit 49,05% (6.434,6 ha) auf landwirtschaftlich genutzte Flächen. Wälder machen mit 44,14% (5.790 ha) den zweitgrößten Flächenanteil aus. Der Bezirk weist 1,51% (198,4 ha) Gärten, 0,84% (109,7 ha) Baufläche, 0,7% (92 ha) Gewässer und 3,76% (493,7 ha) sonstige Flächen auf. (Abbildung 13) (LandNOE, 2015)

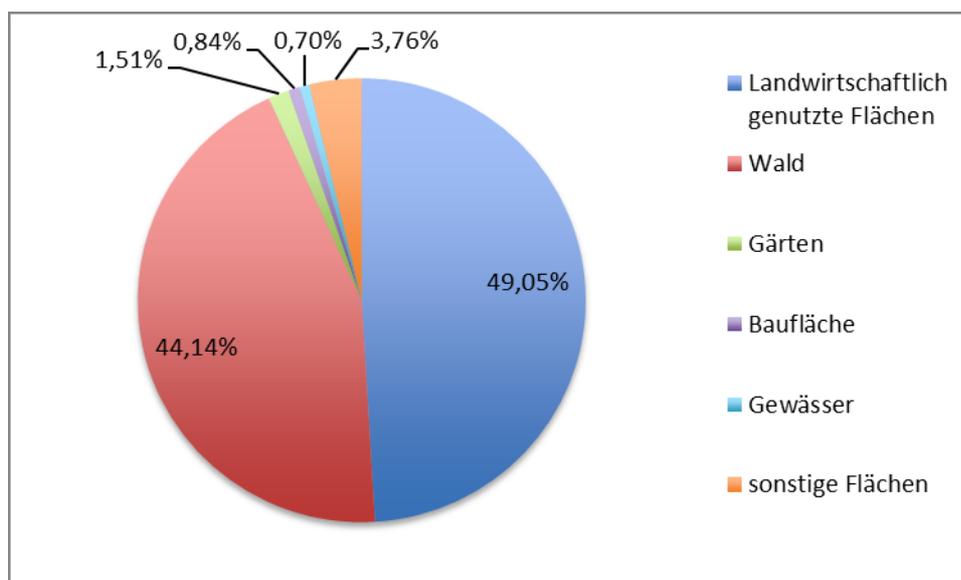


Abbildung 13: Landnutzung in Waidhofen an der Ybbs, Stand 2012 (Quelle: Amt der NÖ Landesregierung 2015)

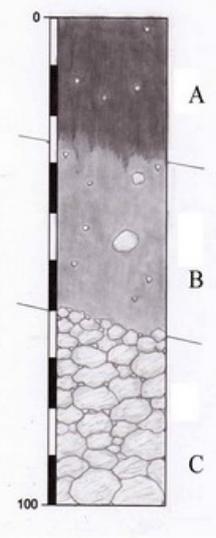
### 4.2.4. Böden

Im nördlichen Teil des Bezirks Waidhofen an der Ybbs befinden sich laut der Digitalen Bodenkarte für Österreich (eBOD) vorwiegend Braunerden sowie Gleye und Pseudogleye. In Waldgebieten weist die eBOD keine Bodentypen aus, daher ist im Süden des Bezirks nur wenige Information über Bodentypen vorhanden. Großteils kommen im Süden Braunerden und Rendzinen vor. (BFW, 2016)

Im westlichen Teil des Bezirkes, in dem sich die untersuchte Rutschung befindet, liegen vor allem Braunerden, Reliktböden und Pseudogleye vor. In Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6 sind Standortinformationen zu drei Bodenprofilen ausgewählt, die sich in unmittelbarer Nähe der Hofermühl-Rutschung befinden. Bei Profil A handelt es sich um Lockersediment-Braunerde mit drei Horizonten, deren Ausgangsgestein feines und grobes silikatisches Schwemmmaterial ist (Tabelle 4). Der Bodentyp des Profil B ist vergleyte Felsbraunerde mit vier Horizonten und dem Ausgangsgestein silikatischer Flysch mit aufgemürbtem Sandstein (Tabelle 5). In Tabelle 6 sind die vier Horizonte des Profil C dargestellt, bei der es sich ebenfalls um vergleyte Felsbraunerde handelt, die silikatischen Flysch und aufgemürbten Sandstein als Ausgangsgestein aufweist. (BFW, 2016)

#### 4. Untersuchungsgebiet

**Tabelle 4: Standortinformation Bodenprofil A, westlich von Konradsheim**

Profilnummer	Kulturart	Seehöhe (m)	Reliefart	Neigung	Ausrichtung	Wasserverhältnisse	Ausgangsmaterial	Bodentyp
218052 Westl. von Konradsheim	Grünland	815	Mittelhang	15°	S	mäßig trocken	feines und grobes silikatisches Schwemmmaterial	kalkfreie Lo- ckersediment- Braunerde
	Horizontabfolge	Horizont	Von [cm]	Bis [cm]	Bodenart	Grobanteil		
	1	A	0	25	lehmiger Sand	geringer Grobanteil (viel Grus, wenig Kies, 1-2 cm) mäßiger Grobanteil (viel Grus, wenig Kies, wenige Steine, 1-4 cm) vorherrschender Grobanteil (viele Steine, wenig Grus)		
	2	B	25	60	sandiger Lehm			
	3	C	60	100				

**Tabelle 5: Standortinformation Bodenprofil B, nordöstlich von Konradsheim**

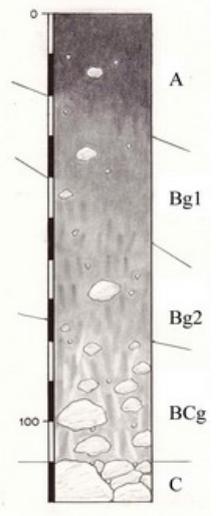
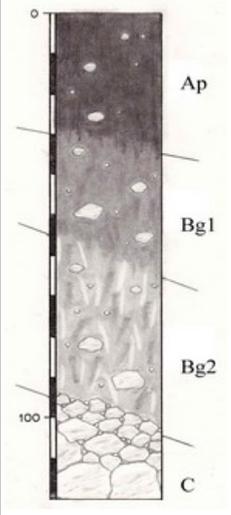
Profilnummer	Kulturart	Seehöhe (m)	Reliefart	Neigung	Ausrichtung	Wasserverhältnisse	Ausgangsmaterial	Bodentyp
218031 Nordöstl. Von Konradsheim	Grünland	540	Hangmulde	15°	WNW	mäßig feucht	silikatisches Flyschmaterial, vorwiegend aufgemürbter Sandstein	vergleyte kalkfreie Felsbraunerde
	Horizontabfolge	Horizont	Von [cm]	Bis [cm]	Bodenart	Grobanteil		
	1	A	0	20	lehmiger Sand	geringer Grobanteil (Grus, 1 cm) geringer Grobanteil (Grus, 1-2 cm) mäßiger Grobanteil (viel Grus, wenige Steine, 1-4 cm) vorherrschender Grobanteil (Grus, Steine, Grobsteine)		
	2	AB	20	45	lehmiger Sand / sandiger Lehm			
	3	Bg	45	85	sandiger Lehm			
	4	C	85	100				

Tabelle 6: Standortinformation Bodenprofil C, südwestlich von Konradsheim

Profilnummer	Kulturart	Seehöhe (m)	Reliefart	Neigung	Ausrichtung	Wasserverhältnisse	Ausgangsmaterial	Bodentyp
218028	Grünland	690	Verebnung	0°		mäßig feucht	silikatisches Flyschmaterial, vorwiegend aufgemürbter Sandstein	vergleyte kalkfreie Felsbraunerde
		Horizontabfolge	Horizont	Von [cm]	Bis [cm]	Bodenart	Grobanteil	
		1	A	0	25	lehmiger Sand	geringer Grobanteil (Grus, 1-2 cm) geringer Grobanteil (viel Grus, wenige Steine, 1-4 cm) mäßiger Grobanteil (viel Grus, wenige Steine, 1-7 cm) vorherrschender Grobanteil (Grus, Steine, Grobsteine)	
		2	ABg	25	45	sandiger Lehm		
		3	Bg	45	90	Lehm		
		4	C	90	100			

#### 4.2.5. Rutschungen in Niederösterreich

Im Bezirk Waidhofen an der Ybbs ist die Lithologie der maßgebliche Faktor für das Auftreten und die Verteilung gravitativer Massenbewegungen (Petschko et al., 2012). Schwenk (1992) stellt fest, dass es auch in nicht-alpinen Regionen durch rutschungsanfällige Geologie auch schon bei moderaten Hangneigungen zu einer hohen Disposition für gravitative Massenbewegungen kommen kann. In Niederösterreich sind dabei vor allem Gleitprozesse wie Felsgleitung sowie Translations- oder Rotationsrutschung von großer Bedeutung. Ebenso spielen Fallprozesse wie Steinschlag, Blockschlag, Felssturz sowie Fließ- und Kriechprozesse wie Hangschuttkriechen sowie Schutt- und Erdströme eine große Rolle. Steinschlag kann sich prinzipiell an jeder steilen Felswand ereignen. Großflächige Rutschprozesse finden hingegen besonders häufig in den verwitterungsempfindlichen Festgesteinen der penninischen Flyschzone und Klippenzone statt. Dabei kommen die mechanischen Eigenschaften veränderlich fester Gesteine zu tragen, die mitunter mächtige Verwitterungsdecken mit reinem Lockergesteinscharakter des involvierten Substrats ausbilden können. Überdies weisen einige Regionen, wie die Bucklige Welt mit Verwitterungsdecken des ostalpinen Kristallins eine hohe geologische Disposition für kleinräumige Rutschungen sowie Hangmuren bei Starkniederschlägen auf. Die Prozesse haben ein hohes Gefahrenpotential, da sie spontan entstehen, einen schnellen Verlauf und schwer vorherzusehendes räumliches Auftreten haben.

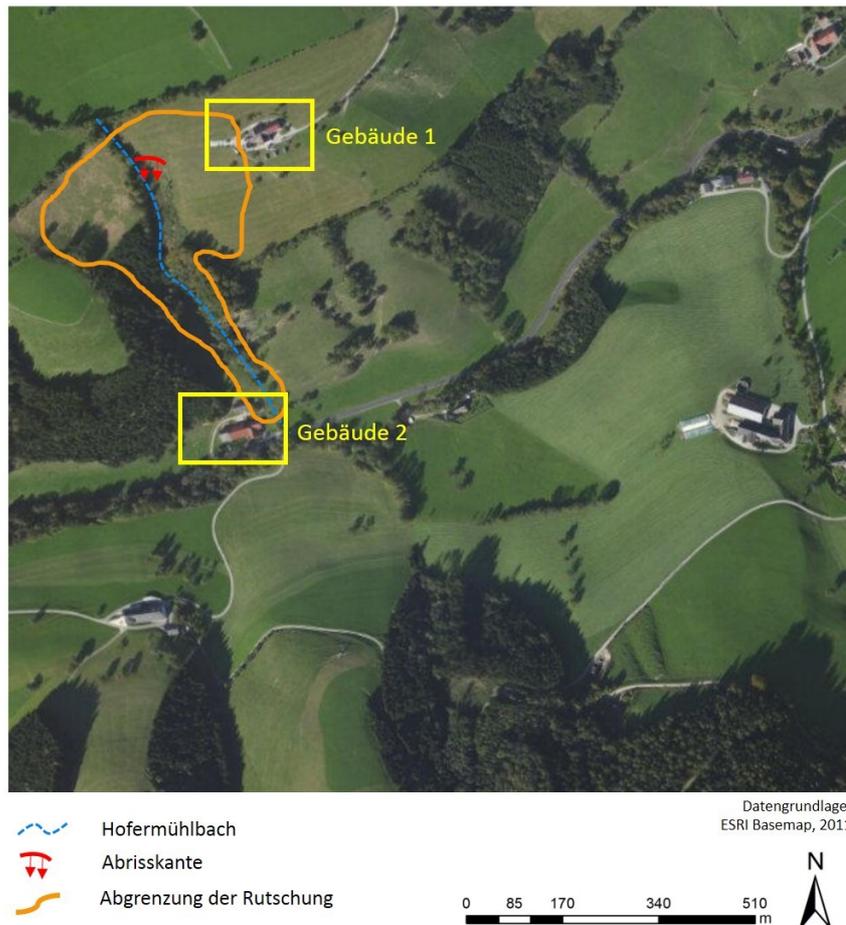
In Niederösterreich wird den Prozessen Kippen und Driften eine geringere Bedeutung zugemessen. (Lotter and Haberler, 2013)

Petschko et al. (2012) beschreiben, wie groß die Rutschungsdichte der einzelnen lithologischen Einheiten im Vergleich zur Größe des Bezirks ist. Dabei weist die Flyschzone mit 61,8 Rutschungen pro km<sup>2</sup> die höchste Rutschungsdichte aller lithologischen Einheiten des Bezirkes auf. Die Klippenzone weist einen Wert von 6,4 und die Molassezone einen Wert von 3,4 Rutschungen pro km<sup>2</sup> auf. In den nördlichen Kalkalpen macht der Dolomit 2,9 Rutschungen pro km<sup>2</sup> aus, während der Kalk auf 1,8 Rutschungen pro km<sup>2</sup> kommt.

### **4.3. Standortbedingungen Hofermühle**

Die Hofermühl-Rutschung befindet sich circa 5 km Südwestlich der Stadt Waidhofen an der Ybbs. Die Rutschung ist geologisch gesehen im Bereich verwitterter Gesteine des Flyschs und der Klippenzone gelegen. Im unteren Teil des Grabens bilden orografisch links mürbe Sandsteine und Mergel das anstehende Gestein. Die verwitterten Gesteine weisen eine geringe Festigkeit und eine Sickerwasserführung auf, weshalb der Hang zu Instabilitäten neigt. Die einfallenden Schichten weisen 35° nach W bis NW, durch Faltung auch nach SE auf. Im oberen Bereich des Grabens treten orografisch links Kalkschichten auf. (Sausgruber, 2013, Sausgruber, 2016)

Am Standort fließt der Hofermühlbach, der bei 462m SH in den Redtenbach mündet. Der Hofermühlbach schneidet in seinem Mittelteil tiefer ein (ca. 490 m SH bis 533 m SH). (Abbildung 14) (Sausgruber, 2013) Orografisch links, oberhalb der Rutschung, befindet sich ein Grundstück (570 m SH), das sich allerdings nicht auf der Rutschfläche befindet. Der dortige Gebäudekomplex wird von nun an als „Gebäude 1“ bezeichnet. Weiters befindet sich ein Anwesen am Schuttkegel des Hofermühlbaches am unteren Ende des Grabens (469 m SH). Diese Gebäude werden von nun an als „Gebäude 2“ bezeichnet. Nach genauer Inspektion der Strukturen sind keine Auswirkungen der Rutschung auf die Gebäude zu erkennen. Die Hangoberfläche in der unmittelbaren Umgebung zeigt keine Bodenspalten, aufgerissene Vegetation oder sonstige Anzeichen von Aktivität. Folglich ist davon auszugehen, dass die Gebäudekomplexe nicht von der Rutschmasse beeinflusst werden.



**Abbildung 14: Standort der Gebäude 1 und 2**

Vor circa 35 Jahren ereignete sich laut den Anrainern orografisch rechts des Hofermühlbaches eine großflächige Rutschung. Daraufhin wurde der betroffene Hang großflächig entwässert. Im Jahr 2011 kam es orografisch links des Baches zu einer Rotationsrutschung. Im Verlauf von zwei Wochen traten Geländeabsetzungen von bis zu 2 m auf. Als Reaktion darauf wurden Teile des Waldes geschlägert. Im Jahr 2013 kam es zu einer Reaktivierung der Bewegung des Jahres 2011. Am 19.4.2013 kam es zu starken Niederschlägen. Diese sind der vermutliche Auslöser einer Reaktivierung der Bewegung am 21.04.2013. Das Material im unteren Bereich der Rutschmasse war wassergesättigt und wies breiige bis flüssige Konsistenz auf. Dabei kam es zu Bewegungsraten von bis zu 20 m/h. Um das Anwesen im unteren Hangbereich zu schützen, wurde durch den Forsttechnischen Dienst für die Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV) ein Ablenkdamm errichtet. (Sausgruber, 2013) Laut Messungen von Humer (2016) ist es zwischen Juli 2014 und Mai 2015 zu Oberflächenveränderungen im Bereich mehrerer cm gekommen.

#### 4. Untersuchungsgebiet

---

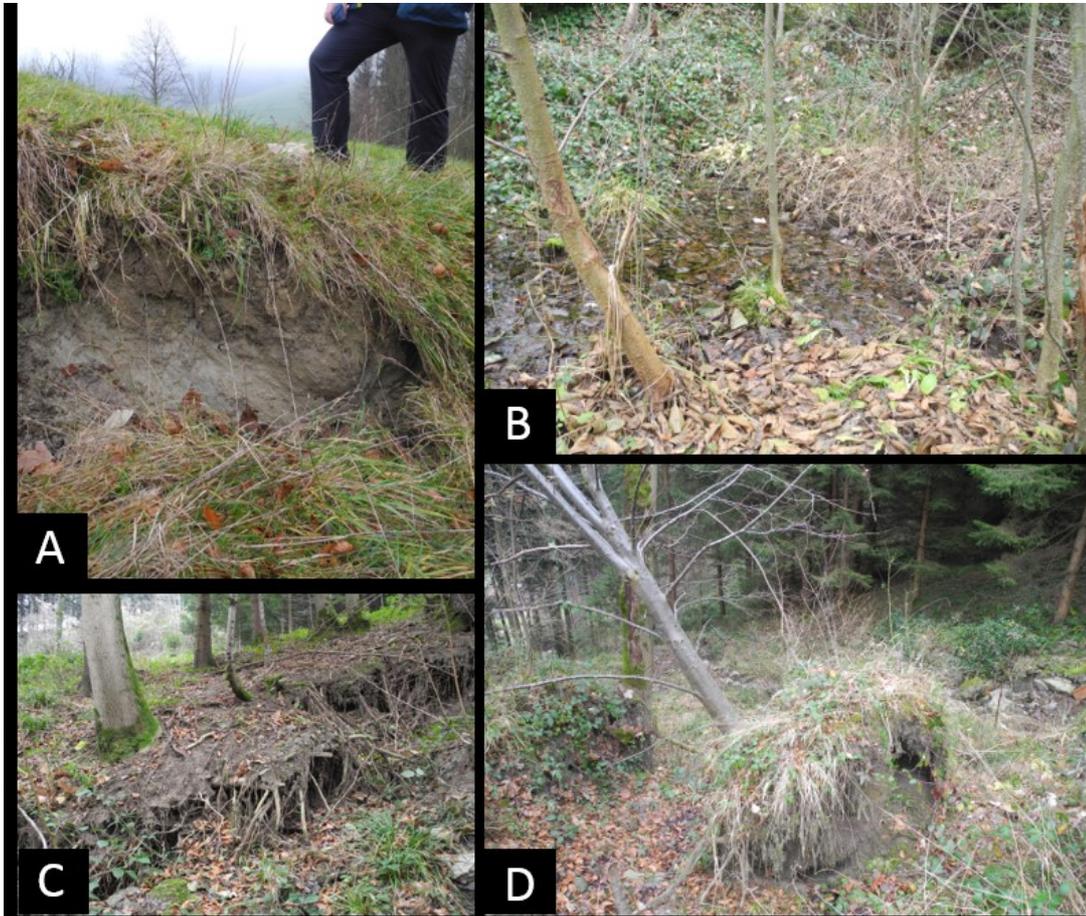
In der Folge wird der aktuelle Zustand anhand eines Lokalaugenscheines der WLV am 11.10.2016 sowie einer selbst durchgeführten Geländebegehung am 10.11.2016 dargestellt. Im Gelände wird deutlich, dass zahlreiche aktive Prozesse im Gebiet der Rutschung stattfinden. Im Vergleich zum Jahr 2013, als die erste Aufnahme der WLV stattgefunden hat, ist es zu einer deutlichen Vertiefung der Mulde oberhalb der Anrisszone (564 m SH bis 574 m SH) gekommen (Sausgruber, 2016). In diesem Bereich ist eine wellige Morphologie ebenso wie Risse erkennbar, die durch die aufgerissene Vegetationsdecke am Hang zu identifizieren sind (Abbildung 15).



**Abbildung 15: wellige Morphologie und Risse in der Vegetationsdecke oberhalb der Abrisskante der Rutschung, Foto: K. Fila**

Der östliche Bereich der Abrisskante (542m SH) hat sich im Vergleich zum Jahr 2013 vergrößert (Sausgruber, 2016). Hier ist ebenfalls eine frisch aufgerissene Vegetationsdecke zu erkennen. Der Boden sowie Wurzeln der Pflanzen sind erkennbar (Abbildung 16.A). Die Fläche unmittelbar unter der Abrisskante ist von dichtem Vegetationsbewuchs geprägt. Dort wachsen unter anderem Pflanzen wie Hundsrose (*Rosa Canina*) oder Gewöhnliche Robinie (*Robinia pseudoacacia*). In Abbildung 15.B wird die starke Vernässung der Rutschfläche deutlich. In zahlreichen Mulden sind kleine Wassertümpel zu erkennen (Sausgruber, 2016). Auf der westlichen Seite der Rutschung sind Absetzungen mit freigelegten Wurzeln zu identifizieren (Abbildung 16.C). Eine weitere Beobachtung von Sausgruber (2016) ist, dass sich orografisch rechts (535 m SH) der Forstweg absetzt. Vor allem im mittleren Bereich Rutschmasse (530 m SH) sind gekippte, teilweise lebende Bäume zu erkennen (Abbildung 16.D). Dabei handelt es sich zum Großteil um Fichten (*Picea Abies*).

Die Bäume wachsen vor allem an den Hängen oberhalb des Gerinnebettes. Die Fläche orografisch rechts des Hofermühl-Baches wird ebenfalls untersucht. Dort fand vor 35 Jahren die erste Rutschung statt. Allerdings können dort aktuell keine Anzeichen von Aktivität festgestellt werden.



**Abbildung 16: Beobachtungen auf der Abrisskante: aufgerissene Vegetation an der Abrisskante (A), Wassertümpel auf der Rutschmasse (B), abgesetzter Boden mit freigelegten Wurzeln (C), umgekippte Bäume auf der Rutschmasse (D) Fotos: K. Fila**

In Zukunft sind von der WLV verschiedene Maßnahmen zum genaueren Verständnis der Hangprozesse sowie der Optimierung der Bewegungsentwicklung geplant. Unter anderem werden mittels Geoelektrik Sickerwasserzüge in Bezug auf deren Verteilung und Tiefe im Hang untersucht. Dadurch wird festgestellt, ob Drainageschlitzte eine geeignete Methode zur Hangentwässerung darstellen. Weiters soll ein Graben im Norden der Rutschfläche mittels Geoelektrik untersucht werden, um festzustellen, ob dieser wasserführend ist. Eine Vertiefung des Hofermühlgrabens im Bereich von 520 m SH bis 560 m SH soll verhindern, dass aus dem Graben kommendes Wasser seitlich in die Rutschmasse einsickert. Überdies werden zukünftig Gräben in die Rutschmasse gezogen, um das Wasser aus den Tümpeln auszuleiten. (Sausgruber, 2016)

### 5. Ergebnisse

Im Hauptteil der Arbeit werden die Resultate der Datenaufnahme sowie deren Auswertung dargelegt. Im Rahmen des Kapitels werden Erkenntnisse abgeleitet, die sich direkt aus den generierten Punktwolken gewinnen lassen. Anschließend werden die erstellten Oberflächenmodelle dargestellt.

#### 5.1. Geländearbeit

Das folgende Kapitel behandelt die Planung und Durchführung der Datenaufnahme am Standort Hofermühle. Die Arbeitsschritte liefern die Grundlage für die weiterführende Auswertung der Daten.

##### 5.1.1. Geländeplanung

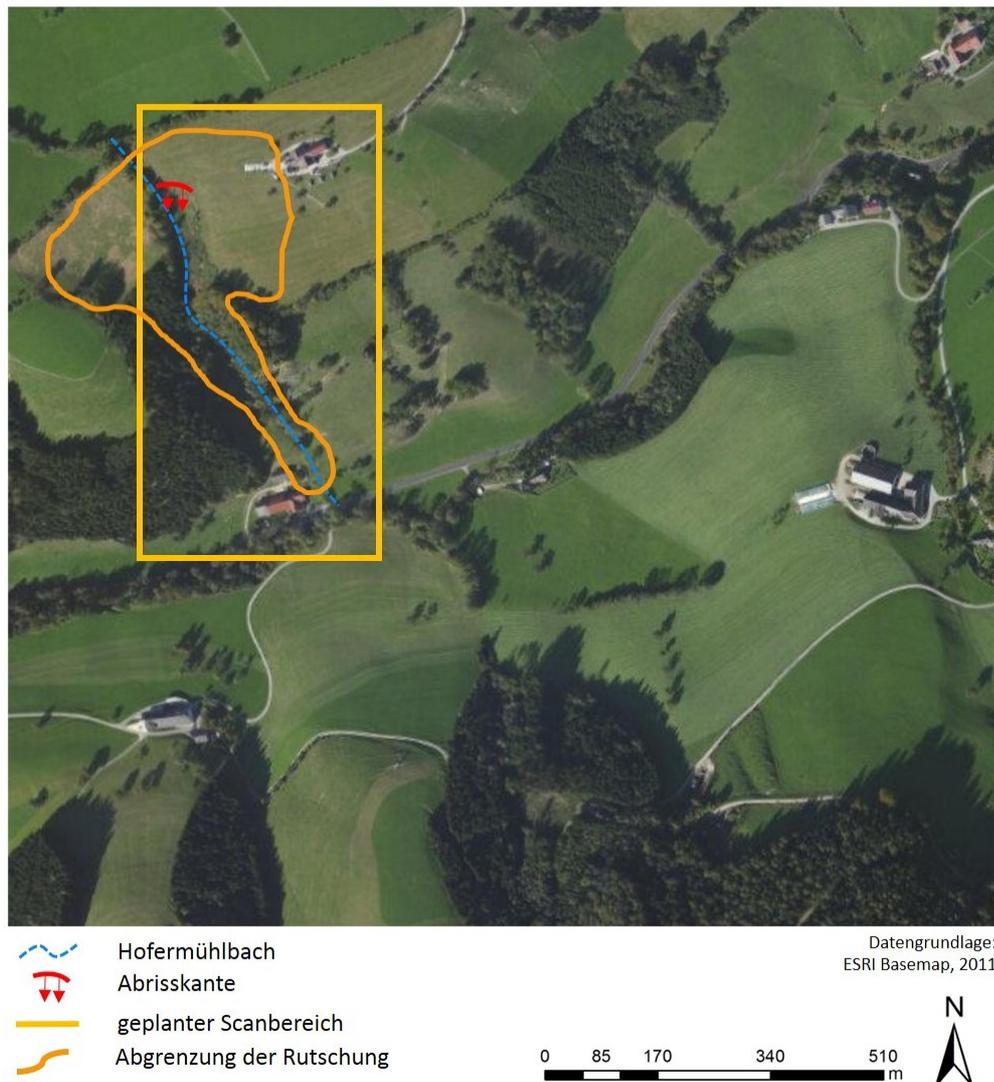
Die Planung des Geländeaufenthaltes wird im Vorfeld der ersten Aufnahme am 19.11.2015 durchgeführt. Auf Basis dieser Überlegungen werden alle weiteren Geländetage umgesetzt. In einem ersten Schritt wird die zu scannende Fläche mittels Satellitendaten sowie ALS-Daten des Landes Niederösterreich identifiziert. Die Daten stammen von einer Befliegung des Jahres 2009 und weisen eine Auflösung von 1 m x 1 m auf.

Bei der Vorbereitung geht es um keine exakte Abgrenzung der Hofermühl-Rutschung. Primär wird festgelegt, welche Flächen unbedingt von den Scans erfasst werden sollen, um aussagekräftige Daten zu generieren. In Abbildung 17 ist das im Vorfeld grob abgegrenzte Gebiet dargestellt. Zur Orientierung ist die Abrisskante in den folgenden Abbildungen der Arbeit als roter Halbkreis markiert. Die darunterliegenden Pfeile deuten die Bewegungsrichtung der Rutschung an. Das Gerinne des Hofermühlbaches ist in Form einer blau gestrichelten Linie dargestellt.

Die ungefähre Grenze des Untersuchungsgebietes im Norden stellen die linienhaft nebeneinander wachsenden Bäume und Sträucher dar, die sich ca. 60 m hangaufwärts der Abrisskante befinden. Die Abgrenzung wird festgelegt, da seit einiger Zeit eine regressive Bewegung oberhalb der Abrisskante beobachtet wird. Weiters werden bei den Geländebegehungen Absenkungen im Bereich oberhalb der Rutschung beobachtet (4.3). Eine weitere Abgrenzung stellt das Gebäude 1 nordöstlich der Rutschkante dar. Im Süden wird das UG durch Gebäude 2 festgelegt, das am Hangfuß an der Redtenbachstraße gelegen ist.

Die Miteinbeziehung der beiden Gebäudekomplexe ist von großer Bedeutung, da sie bei der Registrierung der Punktwolken eine wesentliche Rolle spielen (3.2.2, 5.2.2).

Aufgrund der Erkenntnisse der Geländebegehung (4.3) wird davon ausgegangen, dass im Bereich von Gebäude 1 und Gebäude 2 aktuell keine Aktivität stattfindet. Folglich können die Gebäude als ortsstabiler Referenzpunkt bei der Analyse und Interpretation dienen. Die westliche Abgrenzung erfasst nicht mehr den Teil des UG, in dem vor 35 Jahren die erste Hangbewegung stattfand. Die westliche Abgrenzung wird so gewählt, dass Flächen, die sich einige Meter westlich des Bachgerinnes befinden, erfasst werden. Der Fokus der Untersuchung liegt allerdings auf der orografisch linken Seite des Hofermühlbaches.



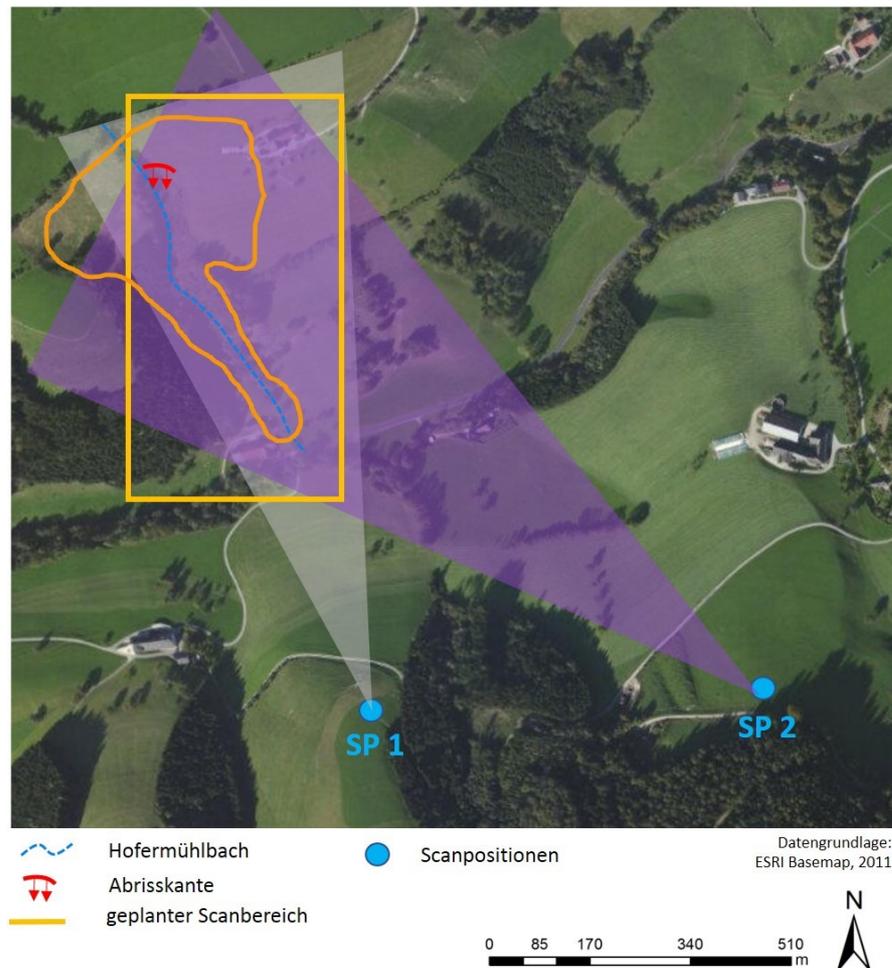
**Abbildung 17: Abgrenzung des Untersuchungsgebiets an der Hofermühl-Rutschung**

In einem weiteren Schritt werden Termine für die Geländeplanung festgelegt. Aus organisatorischen Gründen werden lediglich ungefähre Zeitpunkte zur Aufnahme definiert. Die konkreten Geländetage werden schließlich je nach Verfügbarkeit von Geräten, Zeitplanung der Beteiligten sowie Wetterbedingungen beschlossen. Grundlegend wird es angestrebt die Daten im Verlauf eines Jahres aufzunehmen.

Dadurch wird ein Überblick über die Veränderungen am Standort im Laufe einer Vegetationsperiode geliefert. Es wird darauf geachtet, mindestens einen Scan in den Sommermonaten und einen in den Wintermonaten durchzuführen. Infolgedessen kann die Auswirkung der Vegetation auf die Scanqualität untersucht werden.

### **5.1.2. Datenaufnahme**

Die Aufnahme der Scans wird an allen Geländeterminen innerhalb eines Tages vollendet. Der Aufnahmevorgang wird stets nach dem gleichen Ablauf durchgeführt. Aufgrund variierender Wetterbedingungen kommt es lediglich zu leichten Abweichungen im Arbeitsverlauf. Um das UG mit den Scans ausreichend abzudecken, werden zwei Scanpositionen am gegenüberliegenden Hang gewählt. Deren Lage ist in Abbildung 18 dargestellt. Scanposition 1 (SP 1) befindet sich auf ca. 540 m SH, Scanposition 2 (SP 2) westlich davon auf ca. 570 m SH. Die SPs liegen somit höher als der untersuchte Hang. Dadurch wird sichergestellt, dass die Rutschung nicht durch topographische Erhebungen am untersuchten Hang überdeckt wird. Zwischen beiden Scanpositionen besteht eine Luftliniendistanz von 410 m. SP 1 ist 890 m und SP 2 ist 670 m von der Abrisskante der Hofermühl-Rutschung entfernt. In Abbildung 18 ist die Durchführung der Scanaufnahmen schematisch dargestellt. Das graue Dreieck stellt den ungefähren Scanbereich dar, der von SP 1 abgedeckt wird. Der Scanbereich von SP 2 ist in Form des violetten Dreiecks angedeutet.



**Abbildung 18: Lokalisierung und schematischer Abdeckungsbereich der Scanpositionen 1 und 2**

Zunächst wird an jeder SP ein Überblicksscan durchgeführt. Dieser weist eine geringe Auflösung und somit eine niedrige Punktdichte auf. Die Durchführung dieses Scans nimmt ca. 5 Minuten in Anspruch. Dadurch wird ein schneller Überblick ermöglicht. Dabei wird kontrolliert, ob der korrekte Ausschnitt gescannt wird. Im Anschluss wird von jeder SP aus ein Detailscan durchgeführt. Die Auflösung sowie der Aufnahmebereich des Scans werden durch einen iterativen Prozess festgelegt. Für jeden Geländetag sowie jede Scanposition werden verschiedenen Einstellungen getestet. Schließlich werden für jeden Scan individuelle Einstellungen definiert, um ein optimales Ergebnis zu erhalten. Die Parameter werden so ausgewählt, dass ein Kompromiss zwischen maximaler Auflösung der Scans und minimaler Aufnahmezeit erreicht wird (Fischer et al., 2016). Die gewählte Punktdichte ist dabei so hoch, dass die Aufnahmezeit für einen Detailscan ca. 30 bis 40 Minuten beträgt.

Die resultierenden Daten bestehen aus Scans von sechs Geländeterminen. In Tabelle 7 sind die Termine der Geländetage aufgelistet. Insgesamt werden sieben Tage im Feld verbracht. Allerdings können nur an fünf Tagen aus beiden SPs erfolgreich Punktwolken aufgenommen werden. Am 18.09.2016 kann der Hang nur aus SP 1 aufgenommen werden.

## 5. Ergebnisse

Die Aufnahme von SP 2 muss aufgrund von spontan auftretendem, starken Niederschlag abgebrochen werden. Am 24.11.2016 findet ebenfalls ein Tag im Gelände statt. Aufgrund des Auftretens von Nebel im Verlauf der Aufnahme können allerdings keine Daten aufgenommen werden.

**Tabelle 7: Informationen über die Geländetage und durchgeführten Scans**

Geländetage Nov. 2015-16	Scans	Scanbezeichnung: Aufnahmedatum_Uhrzeit	Dateigröße der Originalscans
19.11.2015	SP 1	151119_143004	242 MB
	SP 2	151119_151654	163 MB
08.06.2016	SP 1	160608_145654	229 MB
	SP 2	160608_155537	299 MB
20.07.2016	SP 1	160720_114850	178 MB
	SP 2	160720_125612	331 MB
08.08.2016	SP 1	160808_122529	840 MB
	SP 2	160808_132121	1190 MB
15.09.2016	SP 1	160915_132703	1370 MB
	SP 2	keine Aufnahme möglich	/
10.11.2016	SP 1	161110_122430	1060 MB
	SP 2	161110_143155	1980 MB

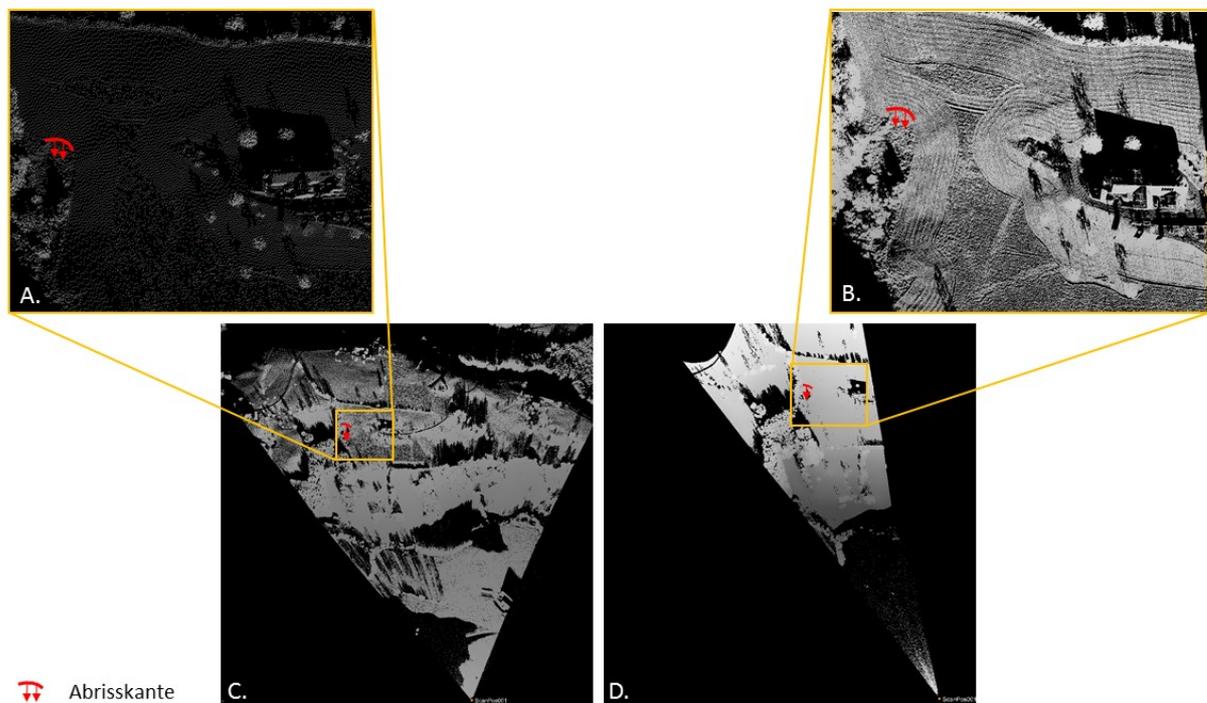
### 5.2. Datenverarbeitung

Nach der Aufnahme der multitemporalen Scans gilt es nun die geeigneten 3D-Punktwolken auszuwählen und so aufzubereiten, dass sie eine gute Basis für die anschließenden Analysen bieten.

#### 5.2.1. Sichtung der Scans

Die im Verlauf der Geländetage generierten 3D-Punktwolken werden in einem ersten Schritt mithilfe von RiSCAN PRO visualisiert und gesichtet. Dabei werden alle Scans einzeln, manuell untersucht. Bei den Scanaufnahmen werden gelegentlich Punktwolken aufgenommen, die nicht das ganze UG oder generell einen falschen Ausschnitt abbilden. Diese werden von den weiteren Arbeitsschritten ausgeschlossen.

Abbildung 19 stellt die Scans dar, die am 20.07.2016 von SP 1 aus erstellt wurden. In Abbildung 19.C ist der Überblickscan aus SP 1 visualisiert. Dieser erfasst eine weitläufige Fläche, die über das zuvor festgelegte Untersuchungsgebiet hinausgeht. Der Scan wird mit einer geringen Auflösung durchgeführt und liefert einen groben Überblick über den Hang. Ausgehend von diesem Scan wird der Scanbereich genauer definiert und ein weiterer Scan mit höherer Auflösung erstellt. Der Detailscan (D) stellt den eingeschränkten Ausschnitt des UG mit einer hohen Punktdichte dar. In den Ansichten A und B sind die Unterschiede in den Punktdichten erkennbar. Während in beiden Scans die Häuser identifiziert werden können, ist die Abrisskante beim Überblickscan nicht auszumachen. Im Detailscan (B) ist überdies zu erkennen, dass der Hang vor unmittelbarer Zeit gemäht wurde. Dies wird anhand der streifenförmigen Spuren auf der Fläche zwischen Abrisskante und Gebäude 1 deutlich.



**Abbildung 19: Überblickscan (C) und Detailscan (D) vom 20.07.2016 aus SP 1, Detailansicht von Abrisskante und Gebäude im oberen Hangbereich (A, B)**

Nach der Sichtung der Scans wird von jedem Termin und jeder SP ein Detailscan ausgewählt, der zur weiteren Analyse verwendet wird. Wie bereits erwähnt, werden insgesamt Daten von fünf Geländetagen berücksichtigt (5.1.2).

In einem nächsten Schritt werden die einzelnen SPs in Bezug auf die Merkmale der Hofermühl-Rutschung untersucht. Dabei werden geomorphologische Charakteristika des Ereignisses identifiziert, sowie eine ungefähre Abgrenzung des Ereignisses durchgeführt. An einigen Scanterminen werden zusätzlich zur Punktwolke Fotos aufgenommen.

## 5. Ergebnisse

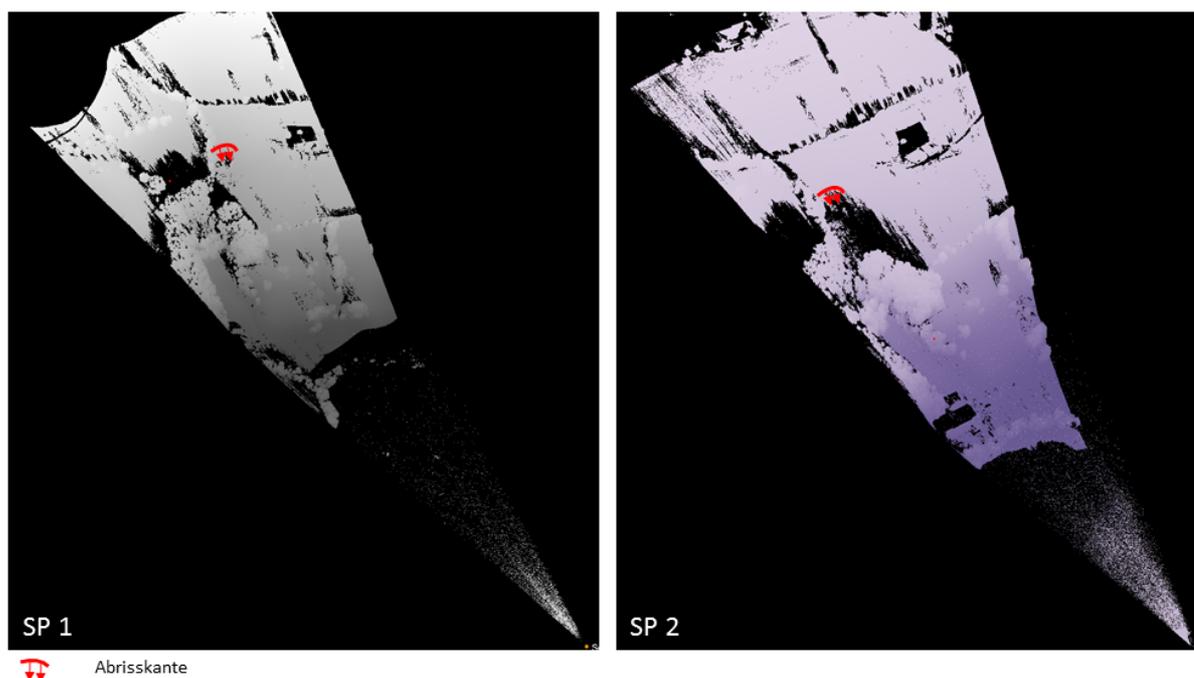
---

Durch die Aufnahmen der am Scanner befestigten Digitalkamera kann ein photorealistisches, dreidimensionales Abbild des UG erstellt werden. Die RGB-Informationen steigern die Aussagekraft der Visualisierung. Abbildung 20 zeigt das UG am 08.08.2016. Durch die Kombination der Punktdaten mit den Fotografien wird die Orientierung im UG erleichtert. In SP 1 ist die Fläche unterhalb der Abrisskante sowohl durch Struktur als auch Farbe von der östlich angrenzenden Wiesenfläche zu unterscheiden. Anhand von SP 2 sind hingegen keine Merkmale der Rutschung zu erkennen. Bei beiden SPs wird deutlich, dass aufgrund der Waldfläche im mittleren Teil der Rutschung signifikante Abschattungen existieren. Diese treten als schwarze Flächen in den Scans auf.



Abbildung 20: Photorealistische Abbildung des UG, SP 1 und SP 2 08.08.2016

In Abbildung 21 sind die Detailscans von SP 1 und SP 2 am 20.07.2016 dargestellt. SP 2 erfasst eine größere Fläche als SP 1. Da die beiden Scanpositionen aus verschiedenen Winkeln aufgenommen werden, finden sich Abschattungen an unterschiedlichen Stellen. Ein Großteil der Datenlöcher ist in Abdeckungen durch den Baumbewuchs begründet. Dieser wirkt sich in SP 2 stärker aus als in SP 1. Die beiden Gebäudekomplexe führen ebenfalls zu Datenverlusten im UG, da diese die dahinterliegenden Flächen verdecken. Weiters sind aus beiden SPs Luftverschmutzungen am Austrittspunkt des Laserstrahls aus dem Scanner zu erkennen.



**Abbildung 21: Detailscan des UG von SP 1 und SP 2 mit markierter Abrisskante der Hofermühl-Rutschung, 20.07.2016**

Abbildung 22 zeigt den oberen Rutschungsbereich aus SP 1 und SP 2 im Sommer 2016 (20.07.2016). Aus SP 1 ist die Abrisskante deutlich zu erkennen (A, C). Auch die Rutschmasse unterhalb hebt sich durch die wellige Oberflächenstruktur von der benachbarten Wiesenfläche ab. Bei SP 2 hingegen können kaum Punkte in dem Bereich aufgenommen werden. Die Abrisskante sowie die Rutschfläche können folglich nicht identifiziert werden (B, D). Nur im Vergleich mit SP 1 kann eine ungefähre Lokalisierung der Rutschung sowie Abgrenzung der Bewegung im Bereich unmittelbar unter der Abrisskante durchgeführt werden (A). Die Rutschmasse hebt sich durch morphologische Unterschiede zur angrenzende Wiesenfläche hervor. Während die Rutschmasse eine wellige Morphologie aufweist, ist die Wiesenoberfläche durch eine ebene Hangstruktur gekennzeichnet.

## 5. Ergebnisse

Allerdings kann keine klare Abgrenzung der Bewegung anhand der unbearbeiteten Punktwolken durchgeführt werden. Wie in Kapitel 4.3 erwähnt wird, finden auch hangaufwärts Bewegungen statt, die sich durch Durchnässungen und Unregelmäßigkeiten am Hang äußern (A). Diese können anhand der Scans nicht erkannt werden. In Abbildung 22.C, D wird überdies deutlich, dass die Waldfläche einen Großteil der Rutschung überdeckt. Das Datenloch im Bereich der Abrisskante bei SP 2 (B, D) weist den Umriss der darunterliegenden Bäume auf. Somit lassen sich anhand der unbearbeiteten Scans zwar einzelne aktive Bereiche identifizieren, jedoch kann keine vollständige Abgrenzung der Bewegung durchgeführt werden.

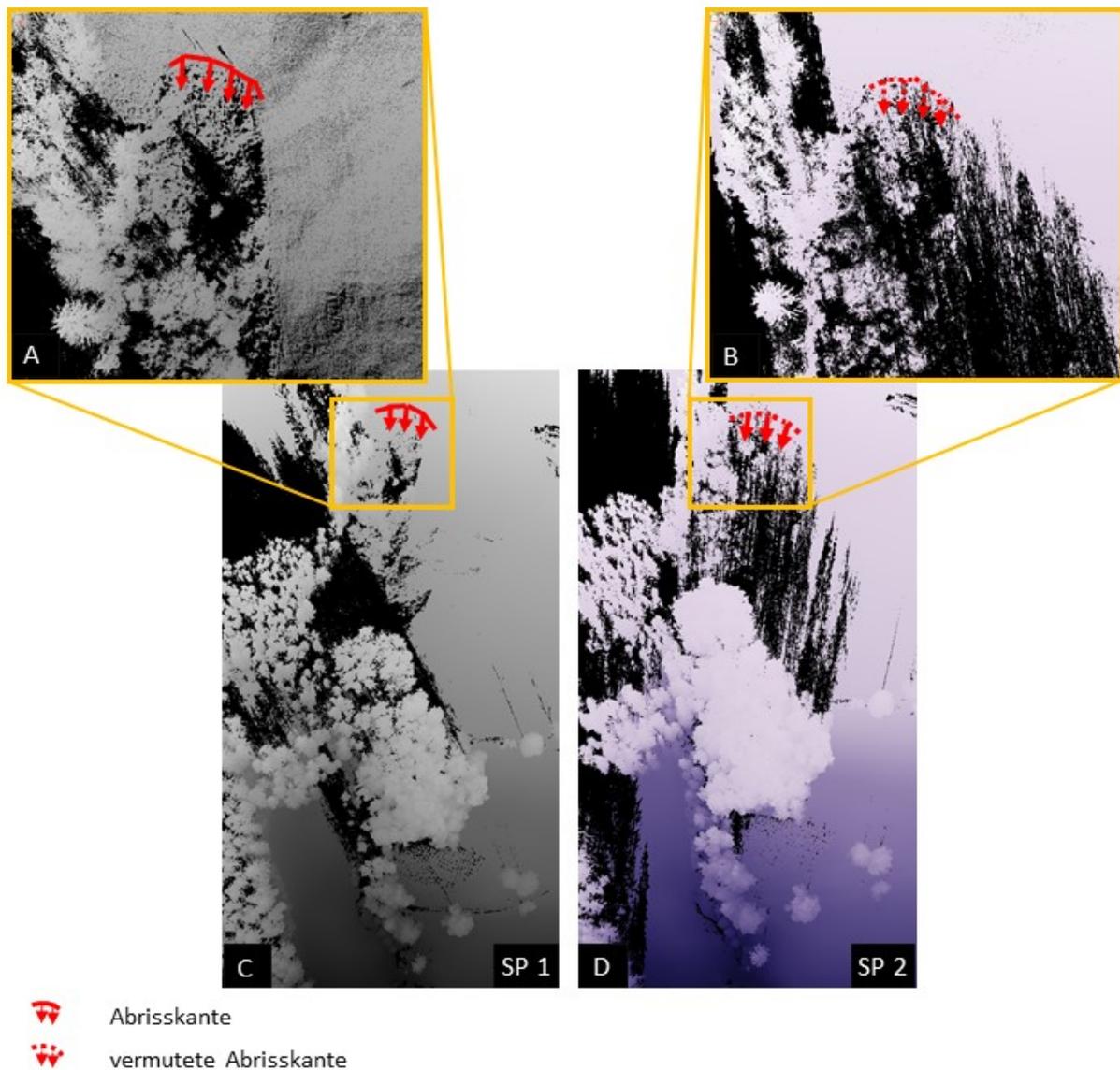


Abbildung 22: Vergleich der Punktdichte aus SP 1 und SP 2, 20.07.2016

Abbildung 23 stellt ebenfalls den oberen Hangbereich dar. Bei den Visualisierungen handelt es sich um Scans, die am 10.11.2016 aufgenommen wurden. Anhand von SP 1 ist, wie auch im Juli 2016, die Abrisskante erkennbar (A, C). Die Rutschmasse unmittelbar unterhalb kann ebenfalls identifiziert werden. Auch hier sind die im Gelände beobachteten Bewegungen, die sich oberhalb der Abrisskante befinden, nicht zu erkennen (4.3). Bei SP 2 ist die Abrisskante nur durch Zuhilfenahme von SP 1 ungefähr zu lokalisieren (B, D). Die Rutschmasse hebt sich allerdings kaum von der anliegenden Wiesenfläche ab und ist somit nicht eindeutig identifizierbar. Es ist jedoch zu sehen, dass der Abschattungseffekt der Bäume bei SP 2 im November geringer ist als im Juli. Die Daten von SP 2 alleine reichen dennoch nicht, aus um eine Abgrenzung der Bewegung durchzuführen. Abbildung 23.C, D zeigt ebenfalls die Auswirkung des Baumbewuchses. Die Scans der Aufnahmen im November weisen im Vergleich zur Aufnahme im Juli weniger Abschattungen im Bereich direkt unterhalb der Abrisskante auf. Das wird vor allem anhand von SP 2 deutlich.

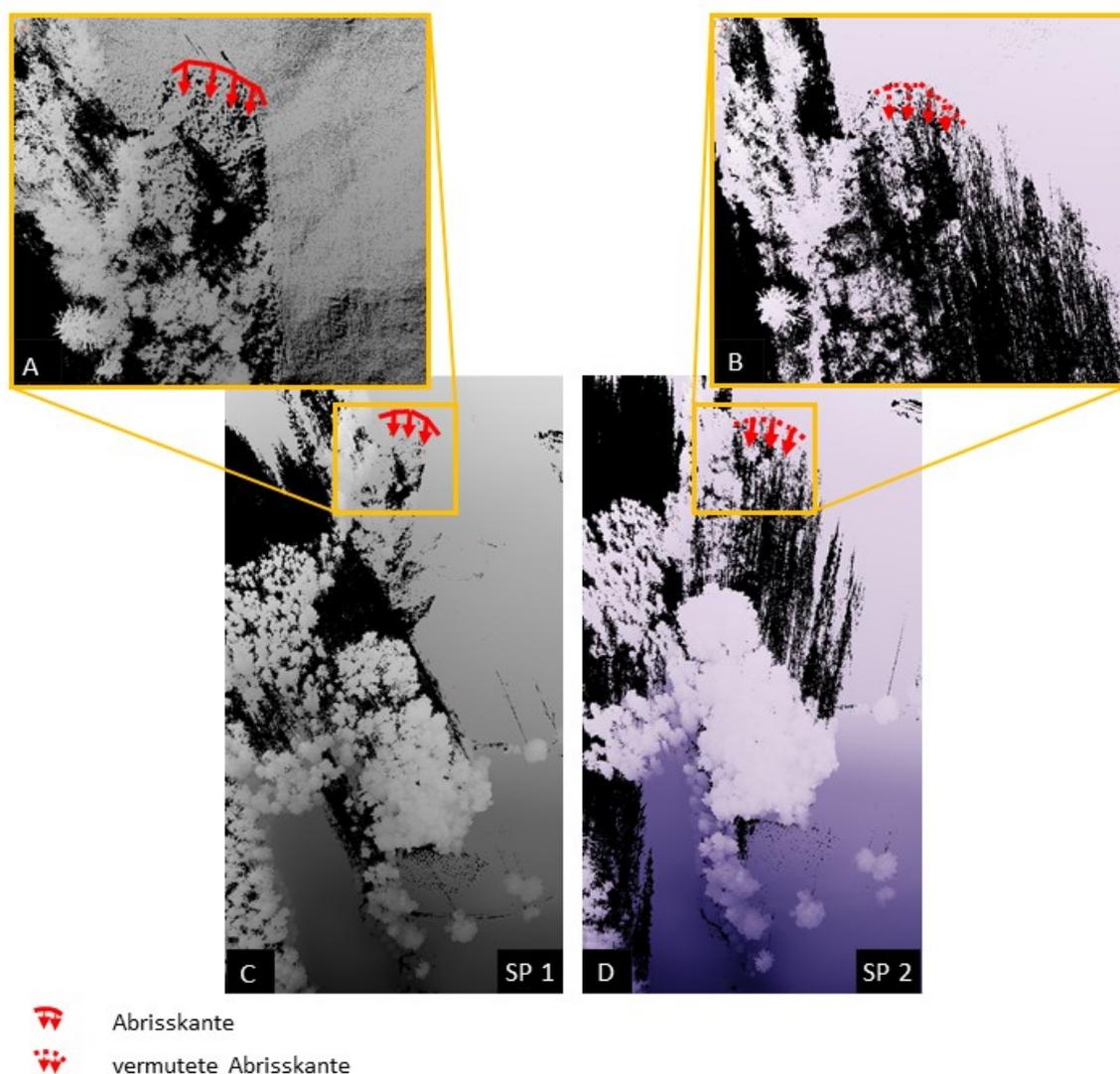


Abbildung 23: Vergleich der Punktdichte aus SP 1 und SP 2, 10.11.2016

Anhand der Daten aller Scantermine ist zusammenfassend zu sagen, dass die unbearbeiteten Punktwolken einen schnellen, ersten Überblick über das untersuchte Ereignis liefern. SP 1 ist generell besser dazu geeignet, um die Abrisskante sowie die unmittelbar darunterliegende Rutschmasse darzustellen. Anhand der Daten aus SP 2 alleine kann keine Identifikation dieser Merkmale der Rutschung durchgeführt werden. Überdies können nur Rutschungsmerkmale im oberen Hangbereich identifiziert werden. Die Waldfläche verhindert einen Blick auf die Bedingungen in den niedriger gelegenen Hangbereichen.

### 5.2.2. Scan Position Registrierung

Im Anschluss an die Sichtung und Auswahl der Scans werden die Daten für die Analysen der Hangoberfläche aufbereitet. Dazu werden die Punktwolken der beiden Scanpositionen an den ausgewählten fünf Terminen registriert. Im Verlauf des Prozesses werden alle Punktwolken in ein gemeinsames, übergeordnetes Koordinatensystem überführt.

Zunächst wird eine Punktwolke definiert, an die alle anderen Scanpositionen registriert werden („Referenzscan“). Als Referenzscan wird der Scan aus SP 1 vom 10.11.2016 herangezogen, da dieser vom aktuellsten Aufnahmeterrain stammt. Überdies weist der Scan eine hohe Punktdichte auf. Im Verlauf der Registrierung werden vier bis sechs ortsfeste Verknüpfungspunkte in jedem Scan ausgewählt. Anhand dieser Punkte werden die Scans aller Termine und Scanpositionen übereinandergelegt. Dabei wird darauf geachtet, dass die Verknüpfungspunkte in beiden Scans eindeutig identifizierbar sind. Da in den einzelnen Scans Unterschiede in den Punktdichten einzelner Flächen bestehen sind nicht in jeder Punktwolke dieselben Flächen ausreichend durch Punkte dargestellt. Folglich müssen die Verknüpfungspunkte für jede Punktwolke manuell identifiziert werden.

Als Verknüpfungspunkte werden im UG bevorzugt anthropogene Strukturen wie Gebäude herangezogen. Diese weisen markante Ecken und Kanten auf, die auf allen Punktwolken gut zu identifizieren sind. Überdies ist davon auszugehen, dass sich die Gebäude des UG im Zeitverlauf nicht bewegen, da sie sich nicht im Rutschungsbereich befinden. In Abbildung 24 ist eine Auswahl an Verknüpfungspunkten anhand des Scans vom 10.11.2016 aus SP 1 dargestellt. Die Spitze der Klimastation ist gut geeignet, da sie in den meisten Scanpositionen aller Termine gut zu identifizieren ist (A). Ein weiterer geeigneter Verknüpfungspunkt ist eine Antenne auf Gebäude 1 (B). Weiters eignen sich Häuserkanten oder Ecken an Haustüren für die Registrierung, da sie ebenfalls im Großteil der Scans gut zu erkennen sind (C). Spitzen und Ecken von Zäunen sind ebenfalls markante Punkte in der Landschaft, die als Verknüpfungspunkte angewendet werden (D).

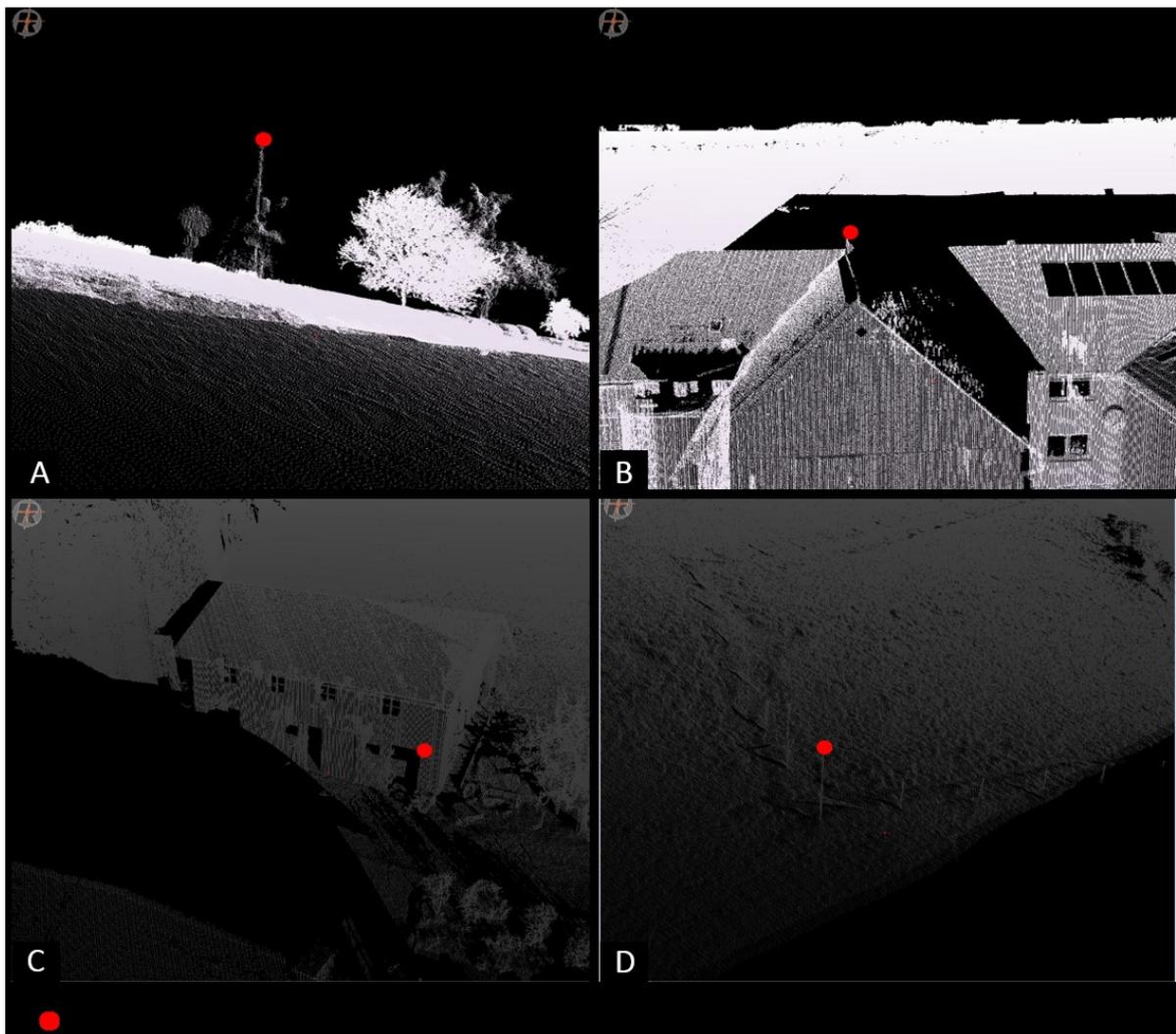


Abbildung 24: Verknüpfungspunkte zur Registrierung der Punktwolken von SP 1 und SP 2, 10.11.2016

Nach der Grobregistrierung wird in einem nächsten Schritt die Feinregistrierung in Form des Multi Station Adjustments durchgeführt. Beim MSA werden für jede Scanposition vier bis sechs ebene Flächen („Plane Patches“) auf der zu registrierenden Punktwolke markiert. Die Flächen müssen sowohl im Referenzscan als auch im zu registrierenden Scan vorhanden sein. In der Natur ist es kaum möglich, komplett glatte Ebenen zu finden. Die Gebäude 1 und 2 sind jedoch gut zur Durchführung der MSA geeignet. Diese weisen mehrere Ebenen in verschiedenen Winkeln auf und sind in allen Scanpositionen klar zu identifizieren. Überdies sind die Flächen ortstabil. Abbildung 25 veranschaulicht einige der zur Registrierung verwendeten Flächen. An Gebäude 1 (A) werden mehrere Flächen ausgewählt, um die Punktwolken der verschiedenen Scanpositionen und Termine aneinander anzugleichen. Dabei wird darauf geachtet, dass sich die Flächen in verschiedenen Winkeln zueinander befinden und so ausgeglichen wie möglich über den Scan verteilt sind. Dadurch kann eine Registrierung erreicht werden, die über das gesamte UG verhältnismäßig homogen ist. Hauswände und Dächer sind in dem Zusammenhang gut geeignet, um verschiedene Winkel miteinzubeziehen.

## 5. Ergebnisse

Das ist anhand des Gebäudes 2 am Hangfuß zu sehen (B). Bei der Auswahl der Flächen wird darauf geachtet, dahinterliegende Punkte nicht ebenfalls zu markieren (C), da sonst das Ergebnis der Registrierung verfälscht wird(B). Im Anschluss an die manuelle Definition der Flächen wird der automatische „Plane Patch Filter“ angewendet, um korrespondierende Punkte zu identifizieren. Unter Anwendung des ICP-Algorithmus (3.2.2) wird darauf abgezielt den Fehler zu minimieren.

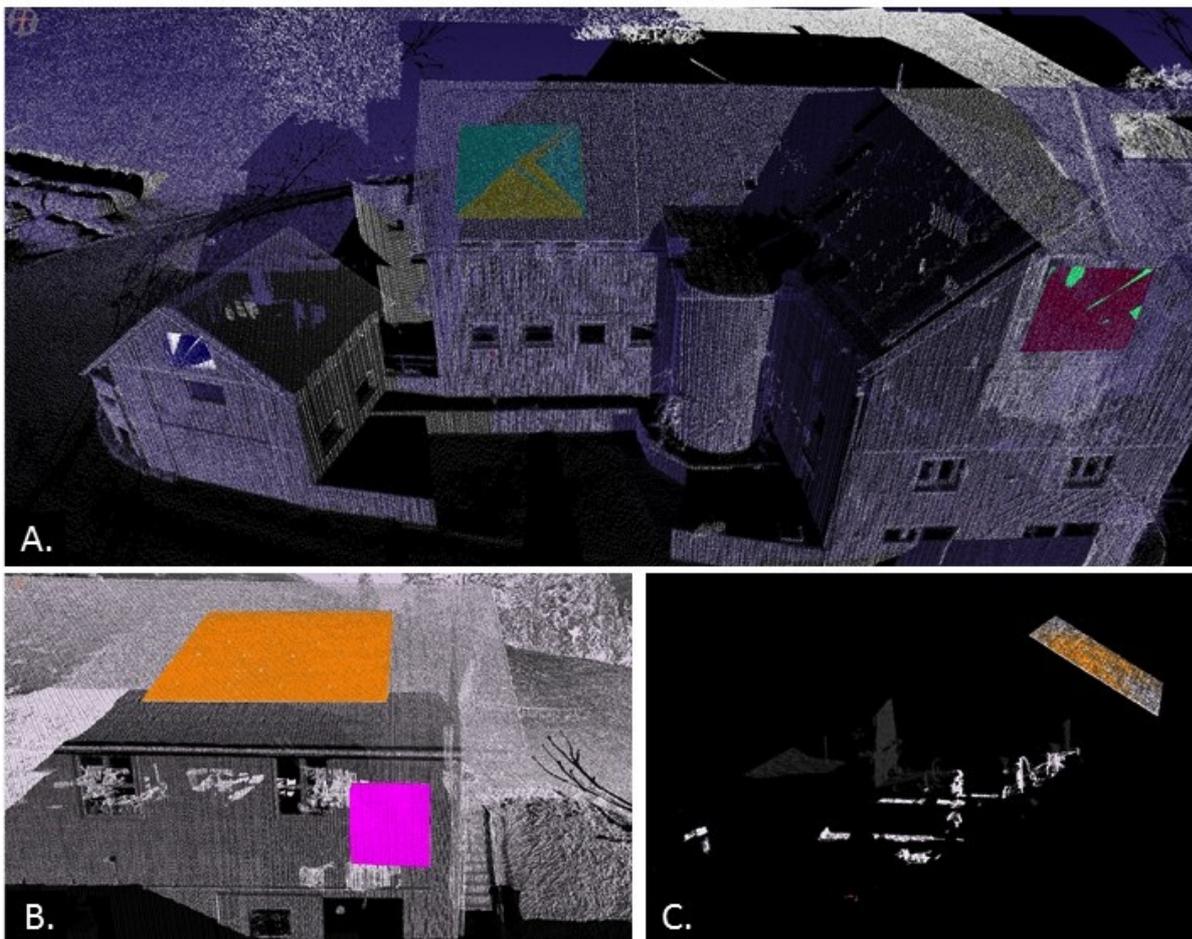


Abbildung 25: manuell definierte Ebenen zur Durchführung des MSA, Scankombination 10.11.2016

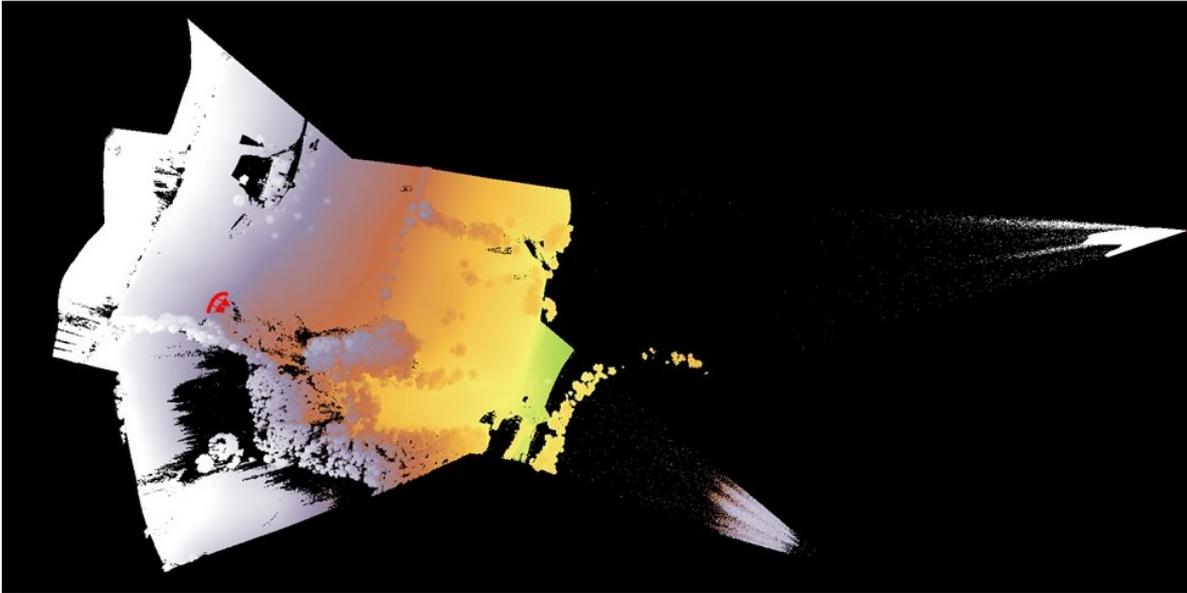
Tabelle 8 stellt die Standardabweichung  $\sigma$  der Grobregistrierung sowie des MSA dar. Die Werte sagen aus, wie stark die jeweiligen Punktwolken von der Punktwolke des Referenzscans abweichen. Die Standardabweichungen der Grobregistrierungen liegen zwischen  $\pm 0,022$  m und  $\pm 0,091$  m ( $\varnothing$ : 0,0735 m). Bei der Feinregistrierung reicht  $\sigma$  von  $\pm 0,0002$  m bis  $\pm 0,0342$  m ( $\varnothing$ : 0,00472 m). Die höchste Registriergenauigkeit weist der Scan auf, der am selben Tag wie der Referenzscan aus SP 2 aufgenommen wurde (161110\_143155).

Tabelle 8: Standardabweichung der Grob- und Feinregistrierung

Referenzscan: 161110_122403	Grobregistrierung Standardabweichung (m)	Feinregistrierung (MSA) Standardabweichung (m)
161110_143155	0,022	0,0002
160915_132703	0,073	0,0017
160808_122529	0,077	0,0033
160808_132121	0,085	0,0342
160720_114850	0,066	0,0002
160720_125612	0,091	0,0018
160608_145654	0,085	0,0023
160608_155537	0,084	0,0005
151119_143004	0,088	0,0019
151119_151654	0,064	0,0011

Mithilfe der Standardabweichung der Punktresiduen der Grob- sowie der Feinregistrierung können Rückschlüsse auf die Qualität der Registrierung gezogen werden. (Fischer et al., 2016) Dabei zeigt sich, dass die Standardabweichung durch das MSA deutlich reduziert werden kann. Es ist allerdings zu beachten, dass die Werte der Standardabweichung lediglich Indikatoren für die Genauigkeit der Registrierung sind. Die Registrierengenauigkeit ist über die gesamte Punktwolke hinweg gemittelt. Der Wert kann folglich lokal stark variieren.

In allen folgenden Arbeitsschritten werden die Scanpositionen der einzelnen Scantermine übereinandergelegt. Bei den künftigen und Auswertungen wird nur noch mit den kombinierten Scanpositionen der Termine gearbeitet. Im Anschluss an die Registrierung werden alle Scans übereinandergelegt, um durch optische Inspektion nochmals zu kontrollieren ob die Registrierung bei den Scanpositionen aller Aufnahmetermine erfolgreich durchgeführt worden ist. In Abbildung 26 sind die beiden zusammengeführten Scanpositionen vom Termin am 10.11.2016 dargestellt.



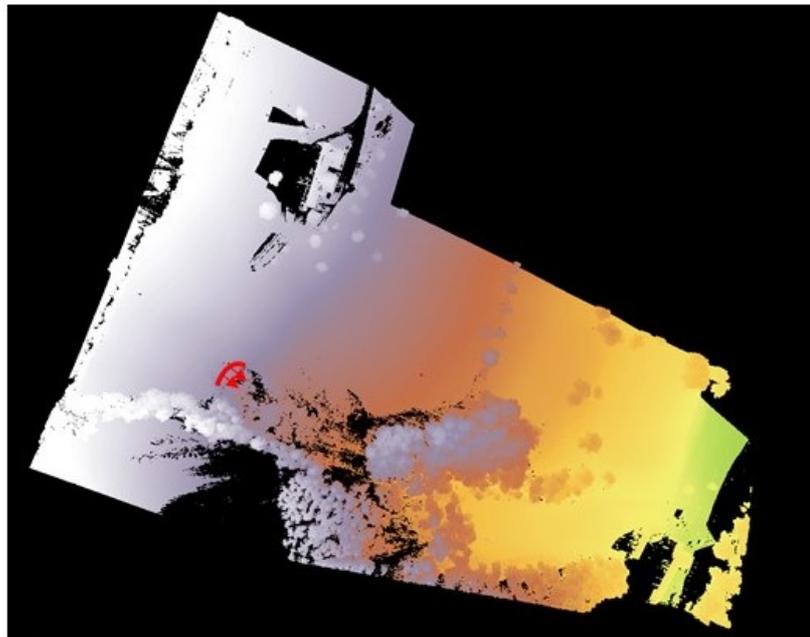
 Abrisskante

Abbildung 26: Scankombination von SP 1 und SP 2, 10.11.2016

Die Kombination von SP 1 und SP 2 eines jeden Termins wird von nun an als „Scankombination“ bezeichnet. Durch die Kombination beider Scanpositionen entsteht eine neue Punktwolke mit hoher Punktdichte. Folglich enthalten diese kombinierten Scans mehr Geländeinformationen.

### 5.2.3. Datenbereinigung

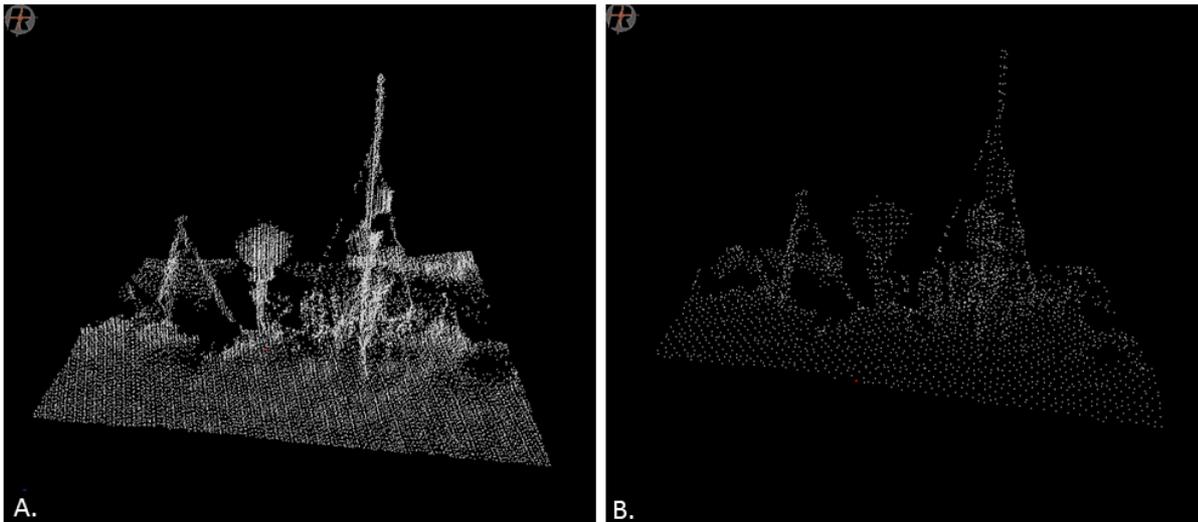
In diesem Kapitel wird die Durchführung der Datenbereinigung beschrieben. Dabei werden die Scans von Luftpartikeln sowie Vegetation befreit, um einen direkten Blick auf die Bodenoberfläche zu ermöglichen. Die Datenbereinigung wird für jeden Scantermine einzeln durchgeführt. Der Arbeitsablauf wird anhand der Scankombination vom 10.11.2016 erläutert. Da die Scans eine große Menge an Punkten aufweisen, wird eine lange Rechenzeit benötigt, um das UG zu bereinigen. Daher wird in der Folge das UG weiter eingeschränkt (Abbildung 27). Die Flächen im Südosten am unteren Hangende aus den weiteren Analysen ausgenommen. Weiters werden die Flächen westlich des Gerinnes eingeschränkt. Die Einschränkung wird durchgeführt, da in diesen Gebieten keine Hangaktivität zu erwarten ist.



 Abrisskante

**Abbildung 27: Zur Datenbereinigung eingeschränktes Untersuchungsgebiet, Scankombination 10.11.2016**

In Vorfeld der Vegetationsfilterung wird bei allen Scans ein Octree-Filter angewendet. Durch den Filter werden Flächen mit hoher Punktdichte ausgedünnt. Zudem wird über das gesamte UG hinweg eine ausgeglichene Punktdichte erreicht. Überdies wird die Datenmenge durch die Entfernung von überflüssigen Punkten verringert. Abbildung 28 zeigt das Ergebnis des Octree-Filters anhand der Scankombination des 10.11.2016. Die Klimastation weist im Vergleich zum Rest der Punktwolke eine sehr hohe Punktdichte auf. Das Material der Klimastation wird stärker reflektiert als die umgebenden, natürlichen Flächen. In Abbildung 28.A ist der Ausschnitt der Punktwolke vor der Anwendung des Octree-Filters dargestellt. Die Elemente der Klimastation sind weiß gefärbt und weisen eine glatte Oberflächenstruktur auf. Sie haben daher eine höhere Reflexion als der Rest der Punktwolke. Folglich ist die Punktdichte im Bereich der Klimastation höher als im übrigen Teil des Scans. Durch den Einsatz des Octree-Filters werden Bereiche mit hoher Punktdichte ausgedünnt (B), sodass eine homogenere Punktwolke entsteht.



**Abbildung 28:** Auswirkung des Octree-Filters – Klimastation im oberen Hangbereich, Scankombination 10.11.2016

In einem nächsten Schritt werden die Scans von störenden Luftpartikeln sowie von Vegetation befreit, um einen direkten Blick auf die Hangstruktur zu erhalten. Zur Filterung wird der RiSCAN „Terrain Filter“ angewendet. Dieser klassifiziert die Punktwolke in „Gelände“ und „Nicht-Gelände“ Punkte. Die „Nicht-Gelände“ Punkte werden je nach angewendeten Parameterwerten markiert. Die markierten Punkte können anschließend aus dem Scan entfernt werden. Der Prozess wird in zwei Filterungsschritten durchgeführt. Das Verfahren dient dazu hochgelegene Objekte zu filtern, unterhalb derer sich nur wenige Geländepunkte befinden (RIEGL, 2005). Im UG liegt diese Situation vor allem an den Hängen im Bereich des Gerinnebettes vor. Der dortige Baumbewuchs führt aufgrund der Abschattung durch die Baumkronen zu einer geringen Punktdichte an der Bodenoberfläche. Zusätzlich sind die Baumkronen mehrere Meter über der Geländeoberfläche gelegen.

Die Parameterwerte der beiden angewendeten Filter sind in Tabelle 9 dargestellt. Zunächst wird ein Filter mit „weichen“ Parameterwerten durchgeführt. Bei der Auswahl der Werte wird sich an den Einstellungen des Vegetationsfilters von RiSCAN PRO orientiert. Zur Identifikation der optimalen Parameterkombination werden die Werte iterativ variiert. Anschließend wird anhand der Punktwolken visuell untersucht, ob anhand der Wertekombination eine geeignete Klassifikation durchgeführt werden kann.

Die Parameterwerte des weichen Filters sind so gewählt, dass nur ein Teil der Vegetation gefiltert wird. Dabei wird die Vegetation der Baumkronen als „Nicht-Gelände“ klassifiziert. Vegetation, die nahe an der Oberfläche gelegen ist, wie Büsche und Baumstümpfe, wird vorerst von der Filterung ausgenommen. Durch diesen groben Filter wird ein Großteil der Vegetation markiert und kann entfernt werden.

Jedoch wird gewährleistet, dass keine Punkte als „Nicht Gelände“ klassifiziert und aus der Punktwolke entfernt werden, die eigentlich Teil der Rutschmasse sind. Der maximale Neigungswinkel wird mit  $80^\circ$  definiert, da die Hänge im Bereich des Gerinnebettes des Hofermühlbachs hohe Neigungswinkel aufweisen. Durch den steilen Winkel wird sichergestellt, dass nicht zu viele Geländepunkte entfernt werden.

**Tabelle 9: Parameterwerte der Terrain Filter**

Filter	Größe des Basisrasters (m)	Anzahl an Levels	Perzentil	Toleranzfaktor	maximaler Neigungswinkel (°)
Weicher Filter	0.25	8	1	1.5	80
Harter Filter	0.25	8	1	0.8	60

Abbildung 29 veranschaulicht die Anwendung des „weichen“ Filters auf das Untersuchungsgebiet. Die Abrisskante ist in Gelb markiert. Der „weiche“ Filter wird auf die gesamte Fläche angewendet. Aufgrund der hohen Punktdichte wird das UG in zwei Teile geteilt. Durch die Anwendung des „weichen“ Filters für jeden separaten Teil kann die Rechenleistung verringert werden. Der Filter wird zuerst im westlichen Teil des UG angewendet (A, B). Dabei werden die Punkte markiert, die entsprechend der Klassifikation ausgewählt werden. Im Anschluss daran werden diese Punkte aus der Punktwolke entfernt. Derselbe Schritt wird für die zweite Hälfte des UG durchgeführt (C, D).

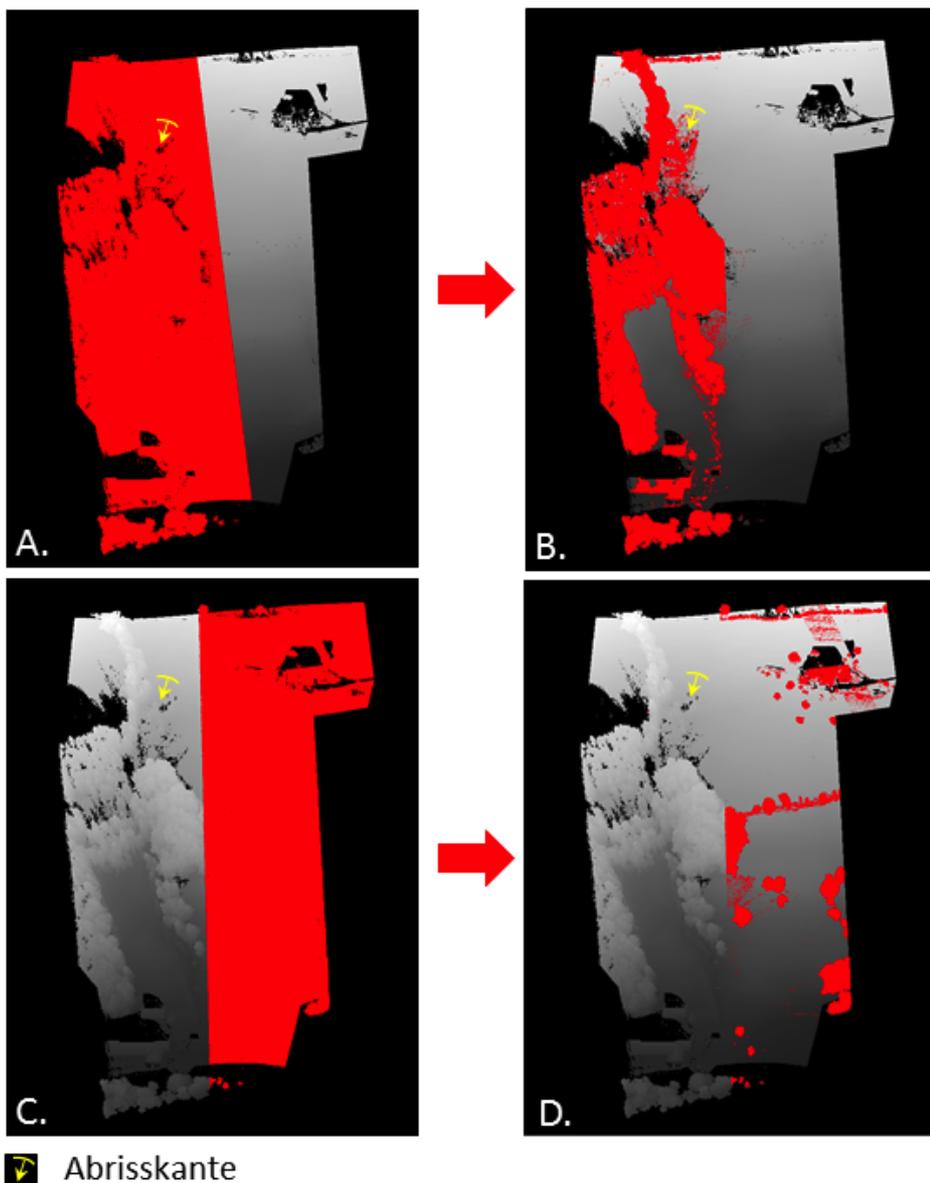


Abbildung 29: Anwendung des "weichen" Filters auf das UG, Scankombination 10.11.2016

In Abbildung 30 ist eine Auswahl der markierten Punkte im Detail dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der weiche Filter einen Großteil Waldfläche im Westen des UG markiert (B). Überdies werden mehrere Punkte auf der Fläche unterhalb der Abrisskante als „Nicht Gelände“ klassifiziert (B). Auf der Wiesenfläche westlich der Rutschung werden hingegen kaum Punkte durch den Filter erfasst. Im unteren Hangbereich werden allerdings Bäume und Sträucher im Bereich der Wiesenfläche gefiltert. Überdies werden einige Punkte der Oberflächenstruktur von Gebäude 1 und Gebäude 2 durch den Filter erfasst (C).

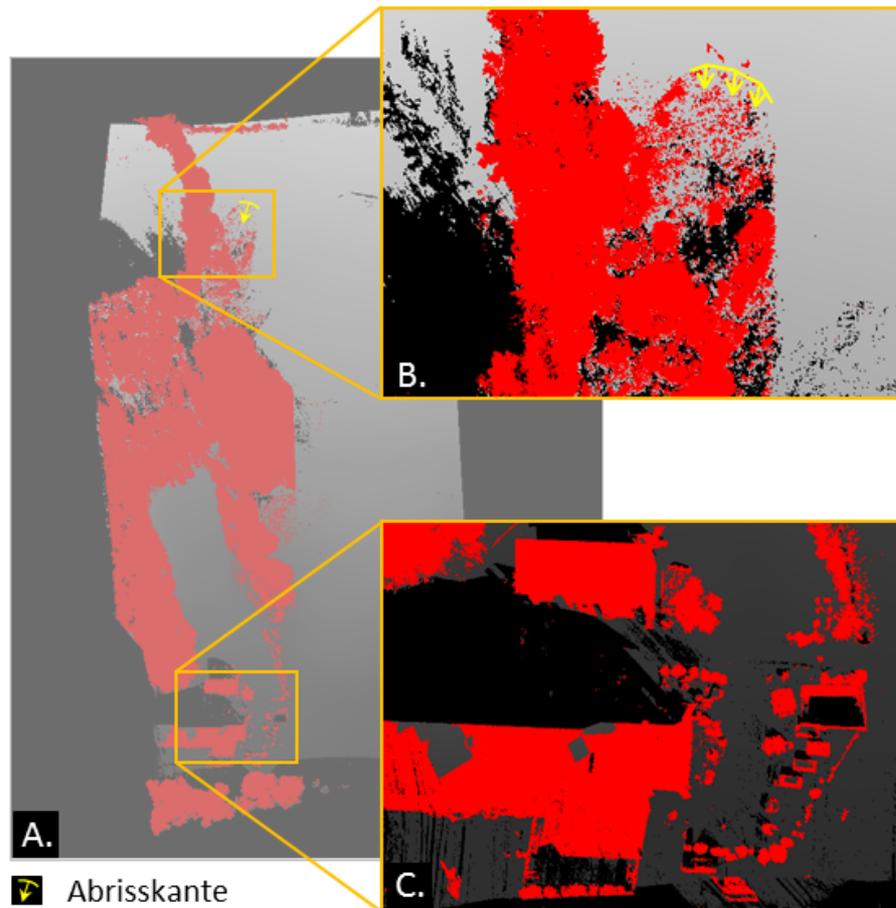


Abbildung 30: Detailansicht der durch den „weichen“ Filter identifizierten Flächen, Scankombination 10.11.2016

Nach Anwendung des „weichen“ Filters ist bereits ein Großteil der Vegetation aus der Punktwolke entfernt. Zusätzlich hat der Filter auch störende Luftpartikel entfernt, die durch die Standortbedingungen am Aufnahmeterrain vom Scanner erfasst wurden. Bei manueller Inspektion der Punktwolke sind allerdings noch einige Objekte wie Baumstrünke, Äste und weitere Spuren von Vegetation vorhanden. Diese Punkte werden durch den „weichen“ Filter als Geländepunkte klassifiziert. In Abbildung 31 sind Überreste von Ästen und Blättern der Bäume im Gerinnebereich hervorgehoben. Vor allem im Bereich mit dichtem Baumbewuchs in der Mitte des Hanges sind noch viele Vegetationspunkte vorhanden.

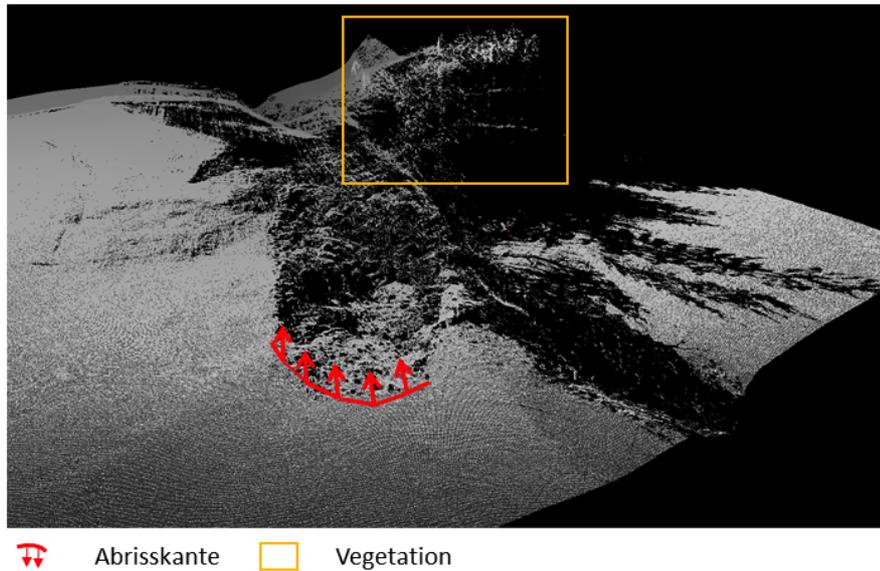


Abbildung 31: Vegetationsreste nach Anwendung des „weichen“ Filters, Scankombination 10.11.2016

Um auch die restliche Vegetation zu entfernen, wird im Anschluss an den ersten Filter ein zweiter, „harter“ Filter angewandt. Der Vorgang ist in Abbildung 32 dargestellt. Dieser zielt darauf ab die durch den ersten Filter nicht erfasste Vegetation zu entfernen. Der „harte“ Filter wird auf den Bereich des Gerinnes und dessen unmittelbare Umgebung angewendet, da sich dort noch besonders viele Vegetationspunkte befinden (A). Tabelle 9 stellt die Parameterwerte des harten Filters dar. Der Toleranzfaktor wurde mit 0,8 definiert und der maximale Neigungswinkel auf  $60^\circ$  verringert. Wie bereits beim weichen Filter werden nun die Punkte markiert, die entsprechend der Parameter des harten Filters ausgewählt werden.

Im Anschluss an den zweiten Filterschritt wird kontrolliert, ob die erneute Klassifikation erfolgreich durchgeführt worden ist. Dabei wird darauf geachtet, dass die markierten Flächen auch tatsächlich Teil der Vegetation sind und folglich aus der Punktwolke zu entfernen sind. Der harte Filter ist in der Lage, die Überreste der Bäume, die sich noch im UG befinden, zu identifizieren und als „Nicht Gelände“ zu klassifizieren (Abbildung 32.B, C). Bei visueller Inspektion wird jedoch deutlich, dass der zweite Filter tendenziell zu viele Punkte als Vegetation klassifiziert. Daher wird das bereits klassifizierte UG manuell untersucht um sicherzugehen, dass der Filter nicht Teile der Punktwolke miteinbezieht, die eigentlich Teil der Rutschmasse sind. Gegebenenfalls werden Punkte manuell der Kategorie „Gelände“ zugeordnet, um nicht zu viele Punkte aus der Rutschmasse zu entfernen. Besonders im Gerinnebett und im Bereich direkt unterhalb der Abrisskante sind zu viele Punkte fälschlicherweise klassifiziert. Diese Punkte werden manuell entmarkiert, bevor der Rest der klassifizierten Punkte aus dem Scan gelöscht wird. An diesen Stellen kann nur schwer festgestellt werden ob es sich bei den als „Nicht-Gelände“ klassifizierten Punkten tatsächlich um Vegetation handelt.

Um Datenverlust zu vermeiden, werden diese Punkte daher zu einem Großteil in der Punktwolke belassen. Nachdem die gefilterte Fläche manuell überprüft ist, werden die noch markierten Punkte aus der Punktwolke gelöscht.

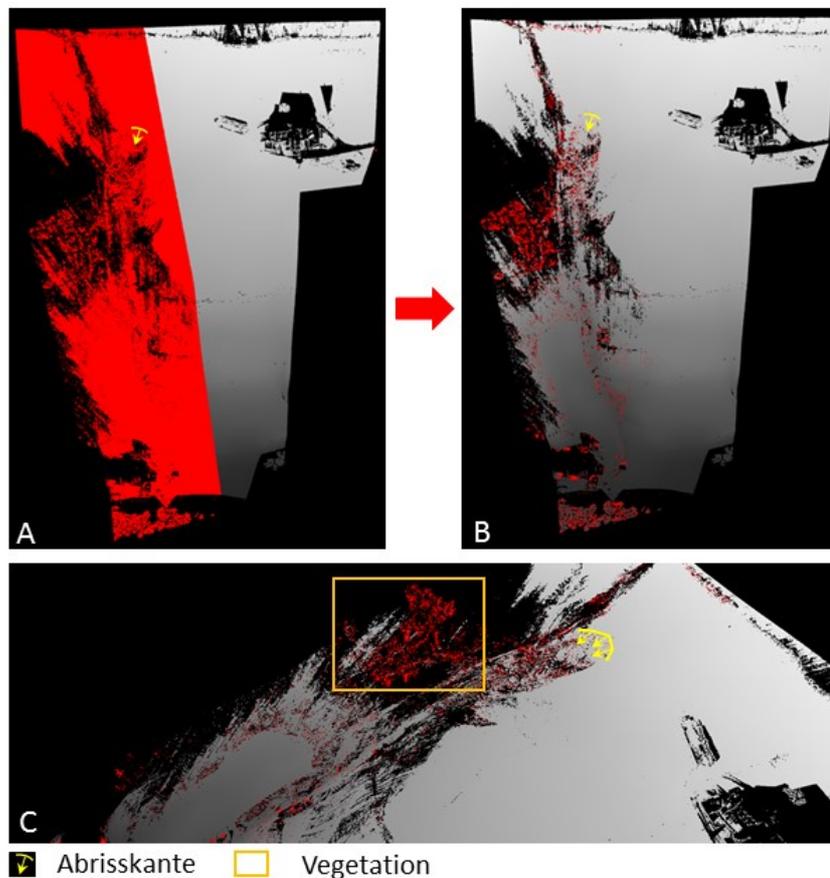


Abbildung 32: Anwendung des „harten“ Filters auf das UG, Scankombination 10.11.2016

Als Ergebnis der Vegetationsfilterung erhält man schließlich ein Modell, das die Geländeoberfläche ohne Vegetation und Gebäude darstellt. Abbildung 33 zeigt den Rutschungsbereich der bereinigten Punktwolke des 10.11.2016. An zahlreichen Stellen kann die Bodenoberfläche aufgrund großflächiger Datenlücken nicht identifiziert werden. Vor allem im mittleren und unteren Bereich ist es zu großen Datenlücken gekommen.



Abbildung 33: Punktwolke nach der Datenbereinigung, Scankombination 10.11.2016

Die Datenbereinigung verdeutlicht die Auswirkung der Abschattungen auf die Scans. Zu allen Aufnahmetermen werden große Datenlücken in den bereinigten Punktwolken identifiziert. Die Datenlöcher wirken sich in der Folge auf die Qualität der im Anschluss durchgeführten Analysen aus, da keine Aussagen über Situation und Entwicklung dieser Hangbereiche gemacht werden können.

### 5.3. Datenanalyse

Das Kapitel beschreibt die Auswertung der registrierten, bereinigten Scans. Einerseits wird mittels Interpolation ein geschlossenes Polygonnetz („Mesh“) aus den Punktwolken generiert. Anhand der generierten DGMs wird im Anschluss ein Vergleich der Oberflächen mittels RiSCAN PRO durchgeführt. Andererseits werden die Punktwolken mithilfe der Software OPALS exportiert und in Rasterdaten umgewandelt. In ArcMap wird anschließend ein DoD erstellt. Dadurch werden ebenfalls Oberflächenveränderungen an der Hofermühl-Rutschung untersucht.

### 5.3.1. Oberflächenvergleich in RiSCAN PRO

Bevor der Oberflächenvergleich in RiSCAN PRO durchgeführt werden kann, werden die Punktwolken interpoliert. Der Vorgang wird in Form einer Triangulierung durchgeführt und ist notwendig, um ein DGM in Form eines geschlossenen Polygonnetzes zu erstellen. Zunächst werden geeignete Parameterwerte für die Erstellung der DGMs identifiziert. Dazu werden verschiedene Wertekombinationen auf die Punktwolken angewendet. In Tabelle 10 sind die Werte der untersuchten Parameterkombinationen angegeben. Die Werte werden in Form sechs verschiedener Kombinationen getestet. Die maximale Kantenlänge sowie der maximale Neigungswinkel der zu generierenden Dreiecke werden im Verlauf der Testdurchläufe variiert. Der minimale Winkel der Dreiecke wird stets mit dem Wert 1° definiert, um nicht zu spitze Dreiecke zu generieren. Schließlich werden die Werte des „Test 4“ zur weiteren Analyse ausgewählt. Eine Begründung der Auswahl wird anhand von Abbildung 34 geliefert.

Tabelle 10: Getestete Parameter der Triangulierung (Test 4: angewendete Parameterkombination)

Test	Maximale Kantenlänge des Dreiecks (m)	Maximaler Neigungswinkel des Dreiecks (°)	Minimaler Winkel des Dreiecks (°)
1	0,5	75	1
2	0,25	75	1
3	0,75	75	1
4	1	75	1
5	0,5	90	1
6	0,5	50	1

Die getesteten Parameterkombinationen sind in Abbildung 34 anhand der Scankombination vom 20.07.2016 visualisiert. Dabei ist der Bereich der Abrisskante und die unmittelbar darunter befindlichen Rutschmasse dargestellt. Durch die Triangulierung werden Datenlöcher, die durch Abschattungen oder andere Störfaktoren entstanden sind, gefüllt. So wird eine Parameterkombination angestrebt, durch die so viele Datenlöcher wie möglich entfernt werden kann.

Jedoch ist zu beachten, dass durch die Interpolation Ungenauigkeiten in den Daten entstehen. Durch die Wahl von großen Kantenlängen für die Dreiecke oder die Erstellung von Dreiecken mit sehr spitzen Winkeln gehen wertvolle Geländeinformationen verloren. Es wird ein Kompromiss angestrebt, der einen wesentlichen Anteil der Datenlücken füllt, aber zugleich die Genauigkeit der Daten nicht zu stark verringert.

## 5. Ergebnisse

Schließlich wird die Parameterkombination des „Test 4“ ausgewählt. Die maximale Kantenlänge des Dreiecks wird mit 1 m festgelegt, da dadurch viele Datenlücken im UG gefüllt werden können. Vor allem im Umfeld der Abrisskante kann somit eine beinahe lückenfreie Oberfläche generiert werden. Die maximale Kantenlänge der Dreiecke wird mit 1 m gewählt, da ein höherer Wert zu großen Löchern in den Oberflächen des Mesh führt. Der maximale Neigungswinkel der generierten Dreiecke beträgt  $75^\circ$ , da dadurch ein Großteil der Fläche direkt unterhalb der Abrisskante trianguliert werden kann.

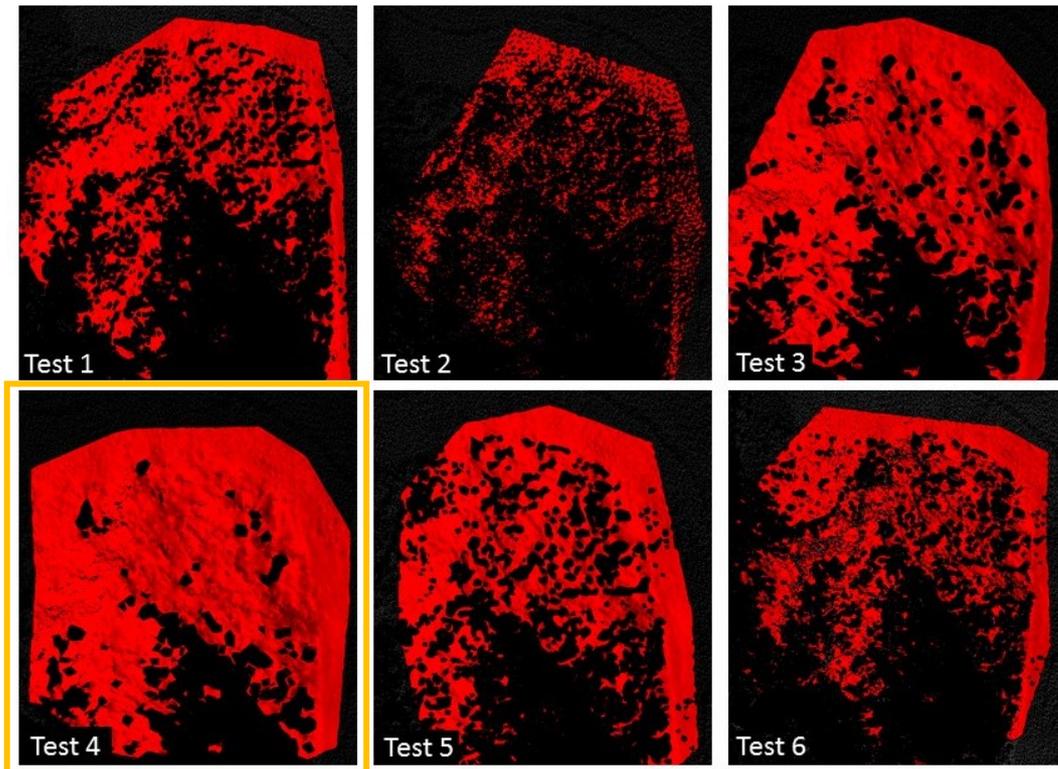


Abbildung 34: Visualisierung der getesteten Triangulierungsparameter, Scankombination 20.07.2016

In Abbildung 35 sind die Ergebnisse der Triangulierung zweier Termine gegenübergestellt. Sowohl der Scan vom August (A) als auch der vom November (B) stellen die Abrisskante deutlich dar. Die Oberflächenstruktur unmittelbar unter der Abrisskante ist ebenfalls erkennbar. Im Vergleich sind im November größere Datenverluste zu identifizieren als im August. Im August 2016 ist die Oberfläche im Bereich des Gerinnebettes gut zu erkennen (C). Die Scankombination im November 2015 weist hingegen große Datenlücken im Gerinnebett und östlich davon auf (D). In beiden Scankombinationen sind rechts des Gerinnes über große Flächen hinweg keine Daten vorhanden.

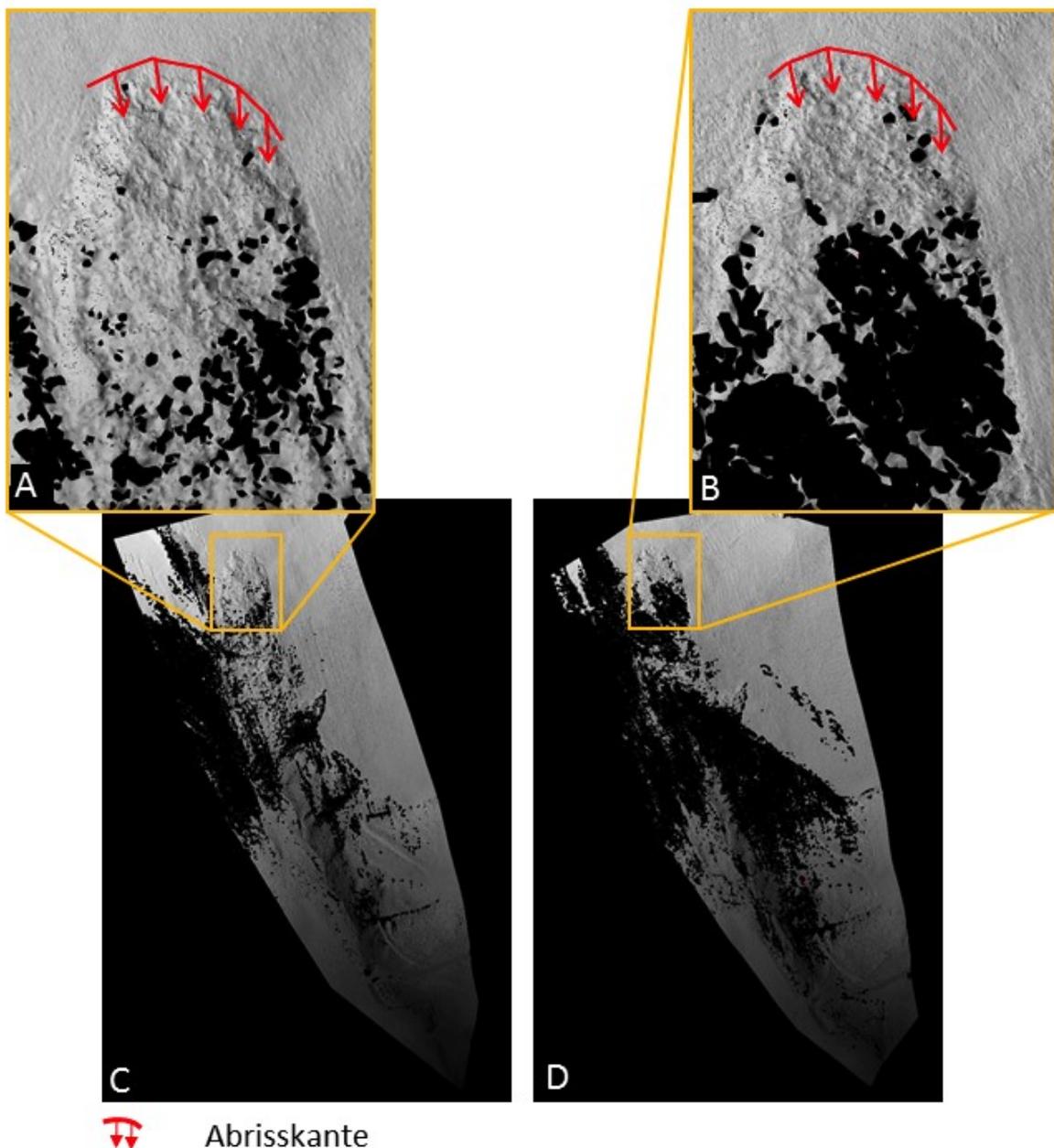


Abbildung 35: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Triangulierung der Termine 08.08.2016 (A, C) sowie 19.11.2015 (B, D)

Im Anschluss an die Erstellung der Meshes werden die generierten DGMs mithilfe der „Surface Comparison“ in RiSCAN PRO miteinander verglichen. Abbildung 36 stellt das Ergebnis des Oberflächenvergleichs von zwei Scantermine dar. Dabei wird die älteste vorhandene Scankombination vom 19.11.2015 mit der des aktuellsten Scans vom 10.11.2016 verglichen. In der Darstellung wird durch rot bis gelb reichende Farbwerte ein Oberflächenzuwachs visualisiert. Blaue Farbschattierungen stellen eine Abnahme des Oberflächenwertes dar.

## 5. Ergebnisse

Die Oberflächenveränderungen bewegen sich zwischen Werten von 1,59 m und -4,5 m. Der wesentliche Teil der Oberflächenverluste bewegt sich jedoch im Bereich weniger cm. Das wird in der beinahe flächendeckenden, gelben Färbung des UG deutlich (A), die eine Oberflächenveränderung von maximal 0,6 m darstellt. Dazwischen finden sich zahlreiche, kleinere blaue Flächen, die Oberflächenverluste von bis zu -0,6 m anzeigen.

Im UG sind hohe Verluste in Blau und hohe Zunahmen der Oberflächenwerte in Rot dargestellt. Extreme Veränderungswerte treten allerdings nur punktuell im UG auf. Vor allem in der Mitte der Rutschmasse finden sich diese vereinzelt Extremwerte, wie in Abbildung 36.B zu erkennen ist. Dabei handelt es sich um den Bereich des Gerinnebettes, der durch steile Hänge sowie dichten Vegetationsbewuchs geprägt ist. Weiters ist zu erkennen, dass die Abrisskante und die darunterliegende Rutschmasse dieselben Veränderungsrate wie die umgebende Grasfläche aufweisen. Die Rutschmasse hebt sich folglich auch farblich nicht von ihrer Umgebung ab. Über einen großen Teil des UG kann jedoch keine Aussage getroffen werden, da durch die Datenlücken keine Informationen über die Hangoberflächen im Zeitverlauf vorhanden sind.

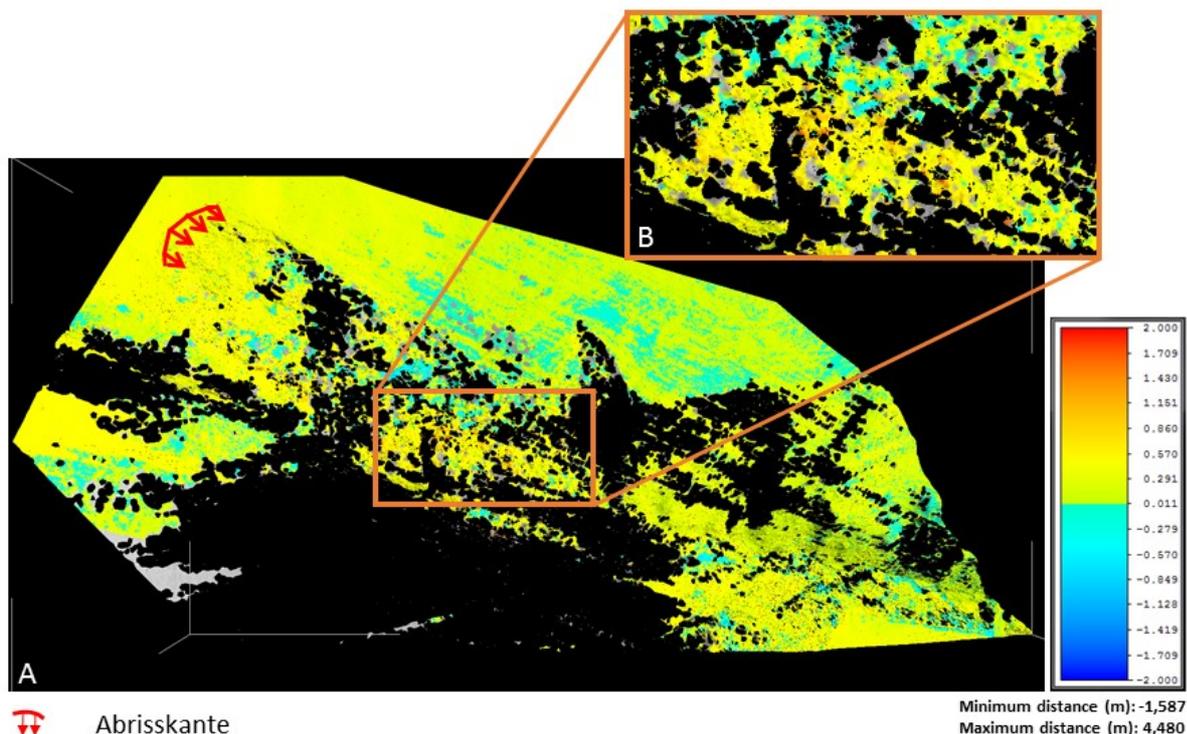


Abbildung 36: Oberflächenveränderung innerhalb eines Jahres (RiSCAN PRO), Differenz zwischen 19.11.2015 und 10.11.2016

Da im Vorfeld der Analyse ein Mesh mit einer Auflösung von 1 m erstellt wurde, liefern Veränderungsrate, die geringer als 1 m sind, keine Aussagen über die tatsächliche Veränderung im UG.

Zusammenfassend sind im gesamten UG nur geringe Oberflächenveränderungen festzustellen. Die Differenzen der Oberflächen im Zeitverlauf sind relativ gleichmäßig und großflächig über das UG hinweg verteilt. Vereinzelt finden sich jedoch im mittleren Bereich der Rutschung sehr hohe, punktuelle Oberflächenveränderungen. Es ist festzustellen, dass sich anhand der Analyse keine Abgrenzung der Rutschung durchführen lässt. Die soeben präsentierten Ergebnisse spiegeln sich in vergleichbarer Form auch bei der Gegenüberstellung der anderen Scantermine wider.

### 5.3.2. Oberflächenvergleich in ArcMap

Alternativ zum Differenzmodell in RiSCAN PRO wird ein Vergleich der Scans in Form von Rasterdaten durchgeführt. Dabei wird zunächst OPALS verwendet, um die Daten für die Analyse aufzubereiten. Ein Ausschnitt des dazugehörigen Skripts findet sich im Anhang. Mittels OPALS werden die 3D-Punktwolken in Rasterdaten umgewandelt. Dabei werden die Daten in einem ersten Schritt mithilfe des `opalsStatFilter` geglättet (Kernelsize: 3). Im Anschluss werden die Datenlöcher mittels `opalsAlgebra` gefüllt. Dieser Schritt ist notwendig, da nur anhand eines durchgehenden, geschlossenen Rasterdatensatzes ein Differenzmodell erstellt werden kann. Um ein DoD mittels ArcMap erstellen zu können, müssen die zu vergleichenden Raster denselben Umfang aufweisen. Daher wird aus allen Rastern derselbe Ausschnitt des UG ausgeschnitten, wodurch das UG weiter eingeschränkt wird. Überdies werden die Datenlücken im generierten Raster gefüllt, da nur so ein Differenzmodell erstellt werden kann. Anschließend werden aus den Punktwolken Rastermodelle mittels `OpalsCell` abgeleitet. Die Modelle werden mit einer Auflösung von 0,5 m generiert. Die Auflösung wird gewählt, da die Scans in einigen Gebieten eine sehr geringe Punktdichte aufweisen. Eine höhere Auflösung hätte große Lücken in den generierten DGMs zur Folge. Die Auflösung ist ein adäquater Kompromiss zwischen Effizienz in Bezug auf die Rechenleistung, Informationsverlust sowie ausreichender Auflösung, um Veränderungen detektieren zu können

Abschließend werden alle Rasterdaten in ArcMap importiert. Das DoD wird durch die Subtraktion der Rasterzellen der verglichenen Punktwolken generiert. Abbildung 37 zeigt eines der in ArcMap generierten Differenzmodelle. Dabei ist die Veränderung der Hangoberfläche zwischen dem 19.11.2015 und 10.11.2016 dargestellt. Positive Oberflächenveränderungen sind in Form eines Farbverlaufes von Rot bis Gelb dargestellt, während negative Oberflächenentwicklungen durch einen grün bis blauen Farbverlauf visualisiert sind.

Die Analyse zeigt großflächige Veränderungen im UG. Die gelben Flächen zeigen Veränderungen von ungefähr 0,25 m an. Diese Veränderungsdaten sind im Großteil des UG zu finden, sie treten jedoch besonders deutlich im unteren Hangbereich des UG auf.

## 5. Ergebnisse

Die blauen Flächen im mittleren Hangbereich zeigen Oberflächenverluste an, die Werte von ungefähr -0,25 m aufweisen. Wie bereits beim Oberflächenvergleich in RiSCAN PRO stechen vereinzelte Extremwerte hervor. Der Maximalwert beträgt 4,59 m, während das Minimum bei -7,5 m liegt. Der höchste Oberflächenzuwachs findet sich in Form von punktuellen Ansammlungen im mittleren Hangbereich, der durch dichte Vegetation und steile Hänge geprägt ist. Die höchsten Oberflächenverluste finden sich rechts des Gerinnebettes des Hofermühlbaches.

Die Abrisskante und die unmittelbar darunterliegende Rutschmasse weisen keine deutlich abweichende Oberflächenveränderung als die angrenzende Hangfläche auf. Anhand der Daten können auch keine sonstigen Merkmale der Rutschung identifiziert werden. Folglich ist es nicht möglich, eine Abgrenzung des Ereignisses anhand der Oberflächenmodelle vorzunehmen.

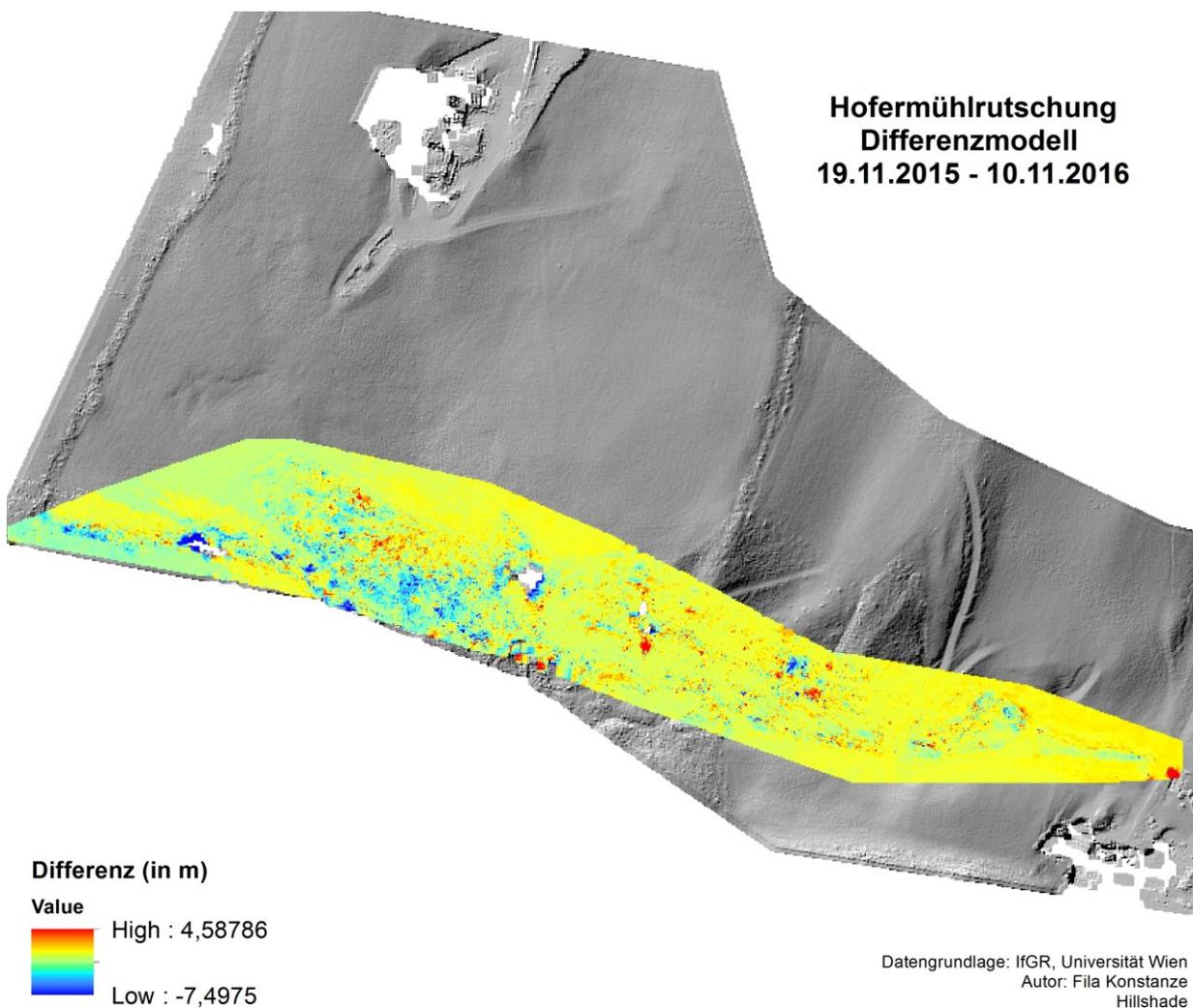


Abbildung 37: Oberflächenveränderungen innerhalb eines Jahres (ArcMap), Differenz zwischen 19.11.2015 und 10.11.2016

Im Verlauf der Analysen werden die DGMs aller Aufnahmezeitpunkte miteinander verglichen. Generell sind in allen DoDs geringe, großflächige Veränderungsraten zu beobachten. In den verschiedenen DoDs treten die punktuellen Extremwerte der Oberflächenveränderungen stets an unterschiedlichen Orten auf. In keinem DoD hebt sich die Rutschung deutlich von der umgebenden Hangoberfläche hervor. So ermöglicht keines der generierten Differenzmodelle eine Abgrenzung der Bewegung. Folglich können keine eindeutigen Erkenntnisse über die Entwicklung der Hangoberfläche im Zeitverlauf abgeleitet werden.

### 6. Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit diskutiert. Es wird eine Reflexion der durchgeführten Arbeitsschritte angestellt. Dabei werden Herausforderungen bei der Aufnahme, Aufbereitung sowie Analyse der Daten behandelt. Zudem werden die Resultate in Bezug auf die Limitierungen bei den vorangegangenen Arbeitsschritten betrachtet. Abschließend werden die anfangs aufgestellten Hypothesen diskutiert.

Im Lauf der Arbeit werden Vorteile, aber auch Herausforderungen deutlich, die beim Einsatz von TLS zur Untersuchung gravitativer Massenbewegungen bestehen. Ein wesentlicher Punkt beim Einsatz von TLS ist eine genaue Vorabplanung. Das wird bei der Vorarbeit zu den Geländeaufnahmen an der Hofermühl-Rutschung deutlich. Eine detaillierte Organisation der Vorgehensweise bestimmt die Qualität der im Anschluss generierten Daten. Dadurch kann eine effiziente und zielführende Aufnahme gewährleistet werden. Dabei müssen sowohl die Charakteristika des untersuchten Gebietes, als auch die Eigenschaften des Aufnahmeegerätes berücksichtigt werden (Barbarella et al., 2017).

Im Vorfeld der TLS-Aufnahme ist es unabdingbar, einen detaillierten Überblick über das UG zu haben. Nur durch eine eingehende Analyse der Standortbedingungen kann eine optimale Aufstellung der Scanpositionen gewährleistet werden. Anzahl und Positionierung der Scanpositionen haben einen bedeutenden Einfluss auf die Qualität der 3D-Punktwolken. Mithilfe mehrerer SPs, sowie hoher Scanauflösung, können aussagekräftige Daten generiert werden. Allerdings nimmt mit der Anzahl der SPs die Aufnahmezeit im Gelände zu. In der Folge steigt der Aufwand für weiterführende Arbeitsschritte, wie Registrierung und Datenbereinigung. (Dassot et al., 2011) Bei der Festlegung der Menge an SPs ist darauf zu achten, dass nicht zu viele überflüssige Daten aufgenommen werden. Durch eine zu hohe Anzahl an SPs werden redundante Daten generiert und es kommt zu zusätzlichem Zeitaufwand. Im Fall der Hofermühl-Rutschung werden zwei Scanpositionen festgelegt, die circa 400 m voneinander entfernt liegen. Dadurch kann das UG aus verschiedenen Winkeln aufgenommen werden. Infolge der Aufnahme aus variierenden Aufnahmewinkeln können Abschattungen vermieden werden. Überdies verlangt die Aufnahme von Scans aus zwei Positionen einen vertretbaren Zeitaufwand. Letztendlich muss ein Kompromiss zwischen Detailgrad der Aufnahmen, Arbeitsaufwand sowie Kapazitäten der anschließenden Auswertungen eingegangen werden. Die Faktoren müssen dabei entsprechend den spezifischen Zielen der Analyse abgewogen werden. (Alba et al., 2005, Abellán et al., 2006, Dassot et al., 2011)

Bei der Untersuchung von Hangbewegungen im Zeitverlauf ist es von großem Vorteil ortsfeste Objekte in die Scanaufnahme miteinzubeziehen. Dadurch werden Arbeitsschritte, wie Registrierung oder Georeferenzierung bedeutend erleichtert. Die Gebäudekomplexe im UG bieten aufgrund ihrer markanten Ecken und Kanten eine gute Basis für die anschließende Aufbereitung der Daten. Diese können in allen Scans identifiziert werden und agieren als ortsfeste Verknüpfungspunkte zur Grobregistrierung. Da die Feinregistrierung der Punktwolken anhand einer oberflächenbasierten Methode durchgeführt wird, müssen überdies Flächen mit ebener Geometrie in der Punktwolke aufgenommen werden. (Theiler and Schindler, 2012) Dabei sind die anthropogenen Strukturen ebenfalls von großem Nutzen, da sie zahlreiche, ebene Wände aufweisen.

Sind an einem Standort keine ortsfesten Objekte vorhanden, können alternativ hochreflektierende Targets zur Registrierung der Punktwolken herangezogen werden. Die Installation und Planung dieser Targets erfordert zusätzlichen Planungs- und Zeitaufwand. Allerdings kann anhand der Targets eine automatisierte Registrierung der Scans durchgeführt werden. Dadurch können mitunter höhere Genauigkeiten als bei der manuellen Registrierung erreicht werden. (Prokop and Panholzer, 2009)

Bei der Arbeit mit TLS beeinflussen die Wetterbedingungen die Datenaufnahme. Faktoren, wie Wolken oder Nebel haben einen starken Einfluss auf die Qualität der generierten Scans. Durch den Wasserdampf der Wolken können die vom Scanner ausgesandten Laserimpulse abgelenkt werden, was zu Datenverlusten oder Verfälschungen in der 3D-Punktwolke führt. Wolken beinhalten meist größere Regentropfen, die sich nur in geringem Maße auf die Aufnahme auswirken. Der Tröpfchendurchmesser des Wasserdampfes in Dunst und Nebel hingegen ist sehr gering und ähnelt der Wellenlänge der Laserstrahlen. (Reshetyuk, 2006) Das führt zu einer starken Diffusion und Zerstreuung der Laserstrahlen in der Atmosphäre. Überdies entstehen störende Punkte in den Scans, die anschließend aus der Punktwolke gefiltert werden müssen. (Dassot et al., 2011) Bei Regen oder Schneefall kann meist eine erfolgreiche Aufnahme durchgeführt werden. Bei Nebel oder Dunst muss jedoch oft gänzlich darauf verzichtet werden, da ein Scan unter diesen Bedingungen zu keinem Ergebnis führt. (Charlton et al., 2009) Überdies können sich atmosphärische Einflüsse, wie Aerosole auf die Qualität der Scans auswirken. Bei kurzen Entfernungen (<250 m) sind die Auswirkungen geringer, während atmosphärische Einflüsse bei Aufnahmen mit größerer Reichweite hingegen einen relevanten Störfaktor darstellen. (Dassot et al., 2011)

Beim Monitoring gravitativer Massenbewegungen ist ein Vorteil von TLS gegenüber traditioneller Methoden, dass innerhalb kurzer Zeit eine großflächige Aufnahme des UG durchgeführt werden kann.

Im Vergleich zu GNSS muss man sich nicht auf eine limitierte Anzahl an „Monitoringpunkten“ beschränken. (Bitelli et al., 2004) Im Vergleich mit ALS weist TLS eine weitaus höhere Einsatzflexibilität auf (Heritage and Large, 2009, Bitelli et al., 2004). Während bei ALS-Aufnahmen auf spezialisierte Firmen zurückgegriffen werden muss, können TLS-Aufnahmen mit einem weitaus geringeren Kosten- und Organisationsaufwand durchgeführt werden (Barbarella et al., 2017). Eine Stärke von TLS ist überdies die vergleichsweise kostengünstige Einsetzbarkeit des Scangerätes. Die Anschaffungskosten für Hardware und Softwarelizenzen von TLS sind zwar hoch, jedoch ist die Methode im Anschluss an die anfängliche Investition über alle Jahreszeiten hinweg einfach anzuwenden und kosteneffizient. Dadurch kann spontan eine Aufnahme gemacht werden. So ist es möglich, unmittelbar im Anschluss an eine Hangbewegung eine hochauflösende Aufnahme des Ereignisses durchzuführen. (Charlton et al., 2009)

TLS-Aufnahmen von Hangbewegungen im Zeitverlauf decken meist keinen identischen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes ab oder weisen dieselbe Auflösung auf (Barbarella et al., 2017). Das liegt unter anderem daran, dass die Geräteeinstellungen individuell an den jeweiligen Scantermin und -standort angepasst werden müssen. Aufgrund unterschiedlicher Aufnahmewinkel sowie variierender Umweltbedingungen müssen in einem iterativen Prozess die Werte der Aufnahmeparameter an die jeweilige Situation angeglichen werden. Das führt dazu, dass die Scans multitemporaler Aufnahmen unterschiedliche Qualität aufweisen. Zudem unterscheiden sich die Auflösungen der Scans nicht nur untereinander, sondern auch innerhalb einer Punktwolke. 3D-Punktwolken weisen meist eine sehr heterogene Punktdichte auf. Diese Tatsache ist relevant, da sie die Zuverlässigkeit von Analyseschritten, wie Registrierung und Interpolation, an verschiedenen Stellen der Punktwolke beeinflusst. (Barbarella et al., 2017)

Die Punktdichte ist eine Funktion der Distanz zwischen TLS-Station und gemessener Oberfläche sowie dem Aufnahmewinkel zwischen UG und Scannerstandpunkt (Barbarella et al., 2017). Folglich hängt die Qualität der generierten Punktwolke zu wesentlichen Teilen von der Positionierung des Aufnahmesensors im Vergleich zum gescannten Objekt ab. Da TLS eine reflektorlose Methode ist, sind zudem die Reflexionseigenschaften der aufgenommenen Oberflächen für die Beschaffenheit der generierten Daten von großer Bedeutung. (Ingensand, 2006) Bei der Scanaufnahme ist es anzustreben, über die gesamte Fläche hinweg eine gleichmäßige Anzahl an Punkten aufzunehmen. Allerdings wirken sich mehrere Faktoren auf die Reflexionseigenschaften des untersuchten Hanges und somit auch auf die Punktdichte der generierten 3D-Punktwolken aus.

Der Grad der Variation der Hangmorphologie in Bezug auf Oberflächenrauigkeit und Hangneigung sind hierbei die bestimmenden Einflussfaktoren. Durch diese Faktoren kommt es nicht nur zu Variationen der Punktdichte, sondern auch zu Abschattungen von Flächen (Barbarella et al., 2017). Durch Faktoren, wie Topographie und Vegetationsbewuchs, werden Flächen verdeckt, sodass keine Punkte aufgenommen werden können. Überdies trägt die bodennahe Lage des Sensors zu einer Verstärkung dieses Effektes bei. (Brodu and Lague, 2012) Dadurch können großflächige Datenlöcher in den Punktwolken entstehen. Folglich ist es herausfordernd mittels TLS eine homogene Abdeckung ohne Datenverluste und Abschattungen über das gesamte Scangebiet hinweg zu erzielen. (Bremer and Sass, 2012)

Die Auswirkungen der soeben dargelegten Vorteile sowie Limitierungen spiegeln sich in der Sichtung der unbearbeiteten Scans der Hofermühl-Rutschung wider. Anhand der Punktwolken aus SP 1 kann die Abrisskante identifiziert werden. Allerdings ist während der Geländebegehungen erkennbar, dass auch oberhalb der Abrisskante Bewegungen stattfinden. Auf der dortigen Wiesenfläche kommt es zu Absenkungen, die anhand der aufgerissenen Vegetationsdecke sowie von Rissen im Gelände identifiziert werden können. Diese können anhand der Scandaten allerdings nicht identifiziert werden. Im mittleren und unteren Hangbereich können anhand der TLS-Daten keine Merkmale der Rutschung identifiziert werden. Aufgrund der geringen Punktdichte sind die, im Gelände beobachteten Risse sowie die wellige Morphologie nicht zu erkennen. Bedingt durch diese Situation ist eine genaue Abgrenzung der Bewegung ist nicht möglich.

Die komplexen Bedingungen in Bezug auf Vegetation und Topographie führen zu einer herausfordernden Situation am Standort. Die Vegetation hat einen hohen Einfluss auf die Qualität der TLS-Daten (Barbarella et al., 2017). Mithilfe des Laserscanners kann Vegetation durchdrungen werden, sodass Punkte der darunterliegenden Erdoberfläche aufgenommen werden können. Der Durchdringungsgrad der Laserstrahlen hängt von dem Ablenkungswinkel des eintreffenden Laserstrahls, der Entfernung zwischen Aufnahmesensor und Zielobjekt sowie der Vegetationsstruktur ab. (Hopkinson, 2007)

Im UG spielen vor allem Bäume eine wichtige Rolle. Diese können aufgrund ihrer Struktur zu hohen Abschattungseffekten führen. Dabei führen in Besonderen der Stamm sowie die Baumkrone zu Datenverlust. (Dassot et al., 2011) Die Laserstrahlen können die Baumkronen von Laubbäumen meist relativ gut durchdringen. Dichte Nadelbäume sowie dichter Vegetationsbewuchs in bodennahen Schichten können hingegen nur schwer von den Laserstrahlen überwunden werden. (Vosselman and Maas, 2010) Je ausgeprägter die Dichte der Baumkronen, desto geringer ist die Punktdichte, die der Laserscanner an der Bodenoberfläche aufnehmen kann (Deems et al., 2013).

Allerdings ist zu erwähnen, dass der Grad der Abschattung im Zeitverlauf variiert. Besonders im Jahresverlauf können durch klimatische Veränderungen große Variationen im Bewuchs bestehen. Im Sommer kann dichter Bewuchs zu hohen Abschattungen führen. Hingegen können durch kahlen Bewuchs im Winter optimale Scanbedingungen gegeben sein. Auch an dieser Stelle sind die meist winterharten Nadelbäume von Laserstrahl schwerer zu durchdringen als Laubbäume, die ihr Laub im Winter abwerfen. (Vosselman and Maas, 2010) Die Hofermühl-Rutschung ist durch winterharte Fichten geprägt. Diese treten vor allem im Bereich des Gerinnebettes des Hofermühlbaches auf. Das führt zu großen Abschattungen im UG. Zusätzlich zum Baumbewuchs ist der Bereich unterhalb der Abrisskante dicht mit Gestrüpp bewachsen, wodurch es auch in diesem Bereich zu Datenverlusten kommt. Die Auswirkung der klimatischen Veränderungen im Jahresverlauf kann teilweise anhand der Aufnahmen im UG nachvollzogen werden. Die Scans der Wintermonate weisen meist geringere Abschattungen als die des Sommers auf. Allerdings können diese Beobachtungen nicht in allen Aufnahmen nachvollzogen werden. Folglich sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten.

Neben der Vegetation hat die Topographie einen großen Einfluss auf die Scans. Im UG werden einige Flächen durch steile topographische Strukturen verdeckt und können daher nicht vom Laserscanner erfasst werden. Besonders das Gerinnebett des Hofermühlbaches erweist sich als problematisch. Aufgrund von Abschattungseffekten kann nur eine begrenzte Anzahl an Punkten aufgenommen werden. Überdies führt die hohe Hangneigung zu Datenfehlern. Beim Auftreffen des Laserstrahls auf eine steile Fläche wird das Signal aufgrund des steilen Winkels verzerrt. Durch die Ausbreitung des Punktes auf der steilen Fläche wird die Zeit, bis der Strahl zum Sensor zurückkehrt, verzögert. Dadurch kommt es zu verfälschten Distanzmessungen. (Deems et al., 2013)

Neben Geländebedingungen führen auch methodische Aspekte zu Unsicherheiten in den Daten. So kommt es bei der Registrierung der Punktwolken oftmals zu Verzerrungen. Die Koordinatensysteme der einzelnen Scans enthalten stets einen systematischen Fehler. Dieser Fehler wird von der Anzahl an Scanpositionen, den Einstellungen der Scaninstrumente, sowie den Registrierungsparametern beeinflusst. (Bae and Lichti, 2008, Olsen et al., 2010) Bei der Angleichung der verschiedenen Scanpositionen der Aufnahmetermine kommt es zu Deformationen und Verschiebungen innerhalb der Punktwolken. Folglich entsteht eine inkorrekte Darstellung der untersuchten Hangoberflächen. Im Rahmen der Untersuchung des UG können Registrierengenauigkeiten von wenigen cm erreicht werden. Anhand dieses Genauigkeitsgrades können allerdings keine Hangbewegungen festgestellt werden, wenn diese ebenfalls im Bereich weniger cm liegen. (Lague et al., 2013)

In Bezug auf die Datenaufbereitung stellt die Bereinigung der Daten zur Erstellung von DGMs einen bedeutenden Schritt dar. Dabei ist die Filterung der Vegetation eine der größten Limitierungen, die aktuell bei der Analyse von TLS-Daten besteht. Bei der Vegetationsfilterung werden grundlegend Höhenunterschiede der untersuchten Oberfläche analysiert. Diese bilden die Basis zur Unterscheidung von Bodenoberfläche und Vegetation. Folglich werden Punkte, die einen großen Höhenunterschied zu benachbarte Punkten aufweisen, als Vegetation klassifiziert. Eine stark variierende Topographie im UG wirkt sich negativ auf die Genauigkeit der Klassifizierung aus. In flachem Gelände funktioniert die Filterung dadurch gut. Bei geringer Hangneigung, wenigen Gebäudeflächen, niedrigem Vegetationsanteil sowie einem hohen Anteil an freigelegter Bodenoberfläche können hohe Genauigkeitswerte erreicht werden. Mit steigender Hangneigung kommt es jedoch zu größeren Fehlern in der Klassifikation. (Sithole and Vosselman, 2004)

Neben der Topographie ist der horizontale Aufnahmewinkel des terrestrischen Laserscanners im Vergleich zur vertikalen Wuchsrichtung der Vegetation ein zusätzlicher Einflussfaktor. Während kleinere Vegetation, wie Gräser, im Hangbereich im Rahmen des Vegetationsfilters gut entfernt werden können stellt die hohe Vegetation in Form von Waldflächen einen einschränkenden Faktor dar. (Ghuffar et al., 2013) Das wird auch bei der Untersuchung im UG deutlich. Die Parameterwerte für die Klassifikation der Punkte in „Gelände“ und „Nicht-Gelände“ müssen an das jeweilige UG angepasst werden. Es ist jedoch nicht möglich, eine Parametrisierung zu definieren, die sich ideal an alle regionalen Geländeunterschiede anpasst. Bei der Hofermühl-Rutschung bestehen lokale Unterschiede in Bezug auf Morphologie, Material und Entfernung zum Standort des Scanners. Im oberen Teil des Hanges liegt eine geringe Hangneigung vor. Zudem sind die Flächen nur spärlich durch Vegetation in Form von Gräsern bedeckt. Folglich kann die Vegetation anhand des Filters gut identifiziert werden. Im Bereich des Gerinnebettes erschweren die steilen Hänge mit dichtem Baumbewuchs jedoch die Filterung der Daten. Oftmals werden Baumstämme oder dichte Sträucher fälschlicherweise als Gelände klassifiziert. Besonders im Bereich unmittelbar unterhalb der Abrisskante befindet sich dichter Vegetationsbewuchs. Dieser verhindert, dass ausreichend Laserstrahlen an die Bodenoberfläche gelangen. Folglich ist eine zuverlässige Unterscheidung zwischen Vegetation und Boden kaum möglich. Die Vegetationsoberfläche wird teilweise mit der Bodenoberfläche gleichgesetzt. Die manuelle Korrektur der Klassifikation führt dabei zu einer Optimierung der Filterung. So stellt die Kombination von automatischer und manueller Filterung einen geeigneten Kompromiss zwischen Effizienz und Qualität der Analyse dar.

Neben der Datenaufbereitung bestehen auch bei der Analyse der zeitlichen Entwicklung der Hangoberfläche Limitierungen. Um die Hangtopographie darstellen zu können werden die Punktwolken zunächst in DGMs umgewandelt. Die Qualität der generierten DGMs hängt von der angewendeten Methode sowie der Struktur des untersuchten Gebietes ab. (Hamrah et al., 2006) Im Verlauf der Arbeit werden DGMs mittels zwei verschiedener Methoden erstellt. Zunächst wird ein Triangulierungsalgorithmus angewendet, um die Punktwolken zu interpolieren und daraus ein Oberflächenmodell zu erstellen. Alternativ werden die Punktwolken in Rasterdaten umgewandelt und Datenlücken durch Interpolation entfernt.

Bei der Generierung der DGMs besteht die grundlegende Problematik, dass die Punktdichte in den Scans oftmals stark variiert. Dadurch stehen Bereiche mit vielen Datenpunkten Flächen mit Datenlücken gegenüber. (Schuerch et al., 2011) Im Verlauf der Analyse werden Interpolationen durchgeführt, um Teile der Datenlücken zu füllen. Durch den Prozess entstehen zusätzliche Fehler in den Daten und somit Verfälschungen der natürlichen Oberflächen. (Barbarella et al., 2017) Da Punktdichte und Rauigkeit innerhalb der Punktwolken stark variieren, ist es herausfordernd, einen repräsentativen Wert für jede Zelle zu wählen. (Rychkov et al., 2012) Folglich schwankt auch die Zuverlässigkeit der Interpolation an verschiedenen Stellen der Punktwolke (Barbarella et al., 2017).

Die Erstellung der DGMs in Form von Rasterdaten führt zu Verzerrungen der Daten. Durch die Berechnung der Differenzen zwischen den Höhenwerten der Rasterzellen werden DoDs generiert. Durch die Methode können Oberflächenveränderungen relativ schnell und einfach visualisiert werden. Ein Nachteil der DoDs besteht jedoch darin, dass sie 3D-Oberflächen nicht optimal darstellen können. Diese Form der Differenzmodelle ist primär für die Analyse von zweidimensionalen Oberflächen geeignet. Die Informationsdichte nimmt proportional zur steigenden Hangneigung ab. DGMs sind nicht in der Lage, überhängende Bereiche abzubilden. Das ist unter anderem im Bereich von Gerinnebetten oder bei großen Blöcken der Fall. (Lague et al., 2013) So kann bei ebenen Flächen, wie im oberen Hangbereich des UG, hohe Genauigkeit erreicht werden. Im steilen Bereich des Gerinnebettes sind die Analyseergebnisse allerdings nur begrenzt zuverlässig. Überdies nehmen Ungenauigkeiten mit zunehmender Oberflächenrauigkeit in den Rasterdaten zu. Da die Höhenwerte innerhalb einer Zelle stark variieren können, ist es schwierig, einen repräsentativen Wert für die Zelle zu definieren (Schuerch et al., 2011).

Die variierende Punktdichte steht der festgelegten Größe der Rasterzellen gegenüber, die über das gesamte UG hinweg einheitlich ist. So kann die Wahl der Größe der Rasterzelle nie für die gesamte Fläche optimal gewählt werden.

An dieser Stelle weist die Triangulierung in Form der TINs einen Vorteil auf. (Schuerch et al., 2011) Die mittels RiSCAN PRO durchgeführte Triangulierung kann die Variationen in der Hangoberfläche besser darstellen.

Eine tragende Bedeutung spielt zudem die gewählte Auflösung der DGMs. Der Wert bestimmt den Detailgrad der Informationen über die Situation im untersuchten Gebiet. (Lague et al., 2013) Im Rahmen der Triangulierung wird eine maximale Kantenlänge von 1 m für die Dreiecke des Polygonnetzes festgelegt. Dadurch kann zwar eine relativ lückenfreie Oberfläche generiert werden, allerdings sinkt somit auch die Genauigkeit der Darstellung. Durch den Parameterwert von 1 m können in der Folge keine Veränderungen detektiert werden, die geringer als 1 m sind. Die Auflösung der mittels OPALS generierten Raster beträgt 0,5 m. Auch diese Auflösung ermöglicht nur begrenzte Aussagen über die Aktivität im UG.

Durch die soeben beschriebenen Herausforderungen bei den verschiedenen Arbeitsschritten kommt es zu einer Akkumulation von Verzerrungen der Daten. Infolgedessen entstehen Darstellungen der Hangoberfläche, die von der tatsächlichen Situation im UG abweichen. Das wirkt sich negativ auf die Aussagekraft in Bezug auf zeitliche Oberflächenveränderungen im UG aus.

Die Oberflächenvergleiche von RiSCAN PRO sowie ArcMap liefern ähnliche Ergebnisse. Es wäre zu erwarten, dass im Verlauf der Analysen Hangveränderungen im Bereich der Rutschungen erkenntlich werden. Bezugnehmend auf die Beobachtungen im Gelände wäre Aktivität im Bereich der Abrisskante oder der darunterliegenden Rutschmasse zu erwarten. Die Analysen zeigen jedoch gleichmäßige, großflächige Veränderungen im UG. Die Rutschfläche kann nicht von der angrenzenden Wiese unterschieden werden. Die Veränderungen bewegen sich größtenteils im Bereich weniger cm. Die Minima und Maxima der Oberflächenveränderung liegen im Bereich mehrerer Meter. Diese treten allerdings nur punktuell auf und befinden sich vor allem im mittleren Bereich der Rutschung. Da dort die meiste Vegetation im UG vorhanden ist, wird dieser Bereich besonders stark durch Ungenauigkeiten bei der Vegetationsfilterung beeinflusst. An dieser Stelle wirken sich überdies die bereits bei der Aufnahme entstandenen Datenlöcher aus. Große Anteile der untersuchten Flächen können nicht analysiert werden, da keine Daten vorhanden sind. Die Analyseergebnisse liefern also keine tatsächliche Aussage über Materialverlagerungen im UG.

Wie in diesem Kapitel gezeigt wird, hängen die Ungenauigkeiten in den Daten von zahlreichen Faktoren ab. Folglich variiert der Grad der Verzerrung über das gesamte UG hinweg und die Qualität der resultierenden Daten ist überdies je nach Aufnahmezeitpunkt unterschiedlich. (Bitelli et al., 2004, Deems et al., 2013)

Die Ungenauigkeiten, die im Verlauf der Datenaufnahme und -aufbereitungen entstehen, können folglich nur schwer abgeschätzt werden. Die Bewegungsraten am Standort im Jahresverlauf liegen im Bereich einiger cm (Humer, 2016). So ist zu vermuten, dass die entstandenen Verzerrungen höher sind, als die Bewegungsraten am Standort.

Abschließend ist festzustellen, dass die Anwendbarkeit von TLS zur Untersuchung gravitativer Massenbewegungen stark von den Geländebedingungen abhängt. Gebiete mit geringer Hangneigung und minimalem Vegetationsbewuchs, sowie generell homogenen Bedingungen, liefern optimale Gegebenheiten für TLS-Aufnahmen. Dabei können innerhalb kurzer Zeit hochauflösende Daten aufgenommen werden. In den anschließenden Analysen können folglich hohe Genauigkeiten erreicht werden. Am Standort der Hofermühl-Rutschung liegt allerdings variierende Hangmorphologie sowie lokaler, dichter Vegetationsbewuchs vor. Infolgedessen kommt es im Verlauf von Aufnahme und Analyse der Daten zu Verzerrungen, die nur begrenzt Rückschlüsse auf Situation und Entwicklung am Hang zulassen.

Auf Basis der soeben präsentierten Erkenntnisse, werden die eingangs aufgestellten Hypothesen behandelt.

Hypothese 1: *TLS stellt eine geeignete Methode zur Untersuchung und Analyse gravitativer Massenbewegungen dar.*

Hypothese 1 kann teilweise bestätigt werden. TLS ermöglicht eine detaillierte, schnelle Aufnahme gravitativer Massenbewegungen. Anhand der hochauflösenden 3D-Punktwolken kann ein detaillierter Überblick über das UG erhalten werden. Am Standort der Hofermühl-Rutschung werden jedoch einige Herausforderungen deutlich, die aufgrund der komplexer Topographie und dichten Vegetation am Standort bestehen. Es stellt sich heraus, dass der Einsatz von TLS in einem heterogenen Untersuchungsgebiet zu hohen Ungenauigkeiten führen kann.

Hypothese 2: *Anhand der TLS-Daten können Veränderungen, die im Zeitverlauf an der Hofermühl-Rutschung stattfinden festgestellt werden.*

Im Rahmen der Arbeit können auf Basis der TLS-Daten keine Veränderungen an der Hofermühl-Rutschung im Jahresverlauf festgestellt werden. Durch Unsicherheiten in mehreren Schritten der Datenaufnahme- und Verarbeitung werden die Ergebnisse der Analysen verfälscht. Hohe Vegetationsbedeckung führt zu hohen Abschattungseffekten, die in Datenlücken in den Punktwolken resultieren. Klimatische Veränderungen im Jahresverlauf führen zu variierender Qualität der Punktwolken, die den Vergleich der Daten erschwert. Da anhand der TLS-Daten keine Veränderungen an der Hofermühl-Rutschung im Zeitverlauf festgestellt werden können muss Hypothese 2 verworfen werden.

## 7. Conclusio

Im Rahmen der Masterarbeit wird die Anwendbarkeit von terrestrischem Laserscanning zur Untersuchung gravitativer Massenbewegungen erörtert. Die Analyse wird anhand der Hofermühl-Rutschung im niederösterreichischen Waidhofen an der Ybbs durchgeführt.

Dabei wird erforscht, ob das Ereignis anhand der generierten 3D-Punktwolken lokalisiert und abgegrenzt werden kann. Weiters wird ein multitemporaler Vergleich der Punktwolken vorgenommen, um Oberflächenveränderungen am Hang zu identifizieren. Zudem wird erforscht, wie sich Geländebedingungen sowie klimatische Veränderungen im Zeitverlauf auf die Datenqualität auswirken.

Im Verlauf der Arbeit werden innerhalb eines Jahres mehrere TLS-Scans durchgeführt. Die Daten werden mithilfe des RIEGL VZ-6000 Laserscanners aufgenommen. Um das untersuchte Gebiete ausreichend abzudecken, wird von zwei Scanpositionen aus gescannt. Die anschließende Aufbereitung und Analyse der Daten wird durch die Software RiSCAN PRO sowie OPALS und ArcMap umgesetzt. Im Verlauf der Datenaufbereitung werden die Scanpositionen aller Termine registriert und infolgedessen in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt. Anschließend wird im Rahmen der Datenbereinigung die Vegetation aus den Punktwolken gefiltert. Zum multitemporalen Vergleich der Daten werden DGMs durch zwei Methoden generiert. Einerseits wird ein Triangulierungsalgorithmus in RiSCAN PRO angewendet, um Oberflächenmodelle zu erstellen. Andererseits werden die Punktwolken mittels OPALS in Rasterdaten umgewandelt. Auf Basis der generierten DGMs werden anschließend Differenzmodelle berechnet.

Die aufgenommenen 3D-Punktwolken liefern eine hochauflösende Darstellung der Hangoberfläche. Am Standort kann anhand der Scans die Abrisskante identifiziert werden. Überdies ist in einigen Bereichen die Rutschmasse durch wellige Hangmorphologie zu erkennen. Kleinmaßstäbige Merkmale des Ereignisses, wie Risse in der Bodenoberfläche, sind allerdings nicht zu bestimmen.

Die Qualität der Daten wird allerdings durch die Geländebedingungen stark beeinflusst. Durch komplexe Topographie und teilweise dichte Vegetationsbedeckung kommt es zu Abschattungseffekten. Infolgedessen entstehen Datenlücken, sodass kein flächendeckender Blick auf das UG möglich ist. Folglich können einzelne Merkmale am Standort beobachtet werden, jedoch kann keine genaue Abgrenzung des UG anhand der TLS-Daten durchgeführt werden.

Die komplexen Geländefaktoren stellen auch im Verlauf der weiterführenden Analysen eine Herausforderung dar. Die Daten werden aufbereitet und bereinigt, um schließlich anhand von DGMs Oberflächenvergleiche durchführen zu können. Die Qualität der generierten Oberflächenmodelle wird dabei im Wesentlichen durch zwei Faktoren beeinflusst. Zum einen bestimmen die Charakteristika des Untersuchungsgebiets den Detailgrad der Daten. Zum anderen spielen Aufnahmemethodik sowie Verarbeitung der Daten eine große Rolle zur Erstellung hochwertiger Ergebnisse.

Im Arbeitsverlauf entstehen im Verlauf der manuellen Registrierung Fehler in Bezug auf die Genauigkeit der Ausrichtung der Punktwolken zueinander. Durch die Datenbereinigung der Punktwolken entstehen ebenfalls Verzerrungen. Die Entfernung der Vegetation stellt dabei eine große Herausforderung dar. Die Filter werden im Verlauf der Arbeit flächendeckend über das gesamte UG durchgeführt. Dabei werden dieselben Werte der Filterparameter über das heterogene UG hinweg angewendet. Das führt zu Qualitätsunterschieden innerhalb der Punktwolken. Im Verlauf der Arbeit führt der dichte Vegetationsbewuchs zu Fehlern bei der Unterscheidung der Punkte in „Gelände“ und „Nicht Gelände“. Im Lauf der Arbeit stellt sich eine Kombination von automatischer und manueller Filterung als geeigneter Kompromiss zwischen Genauigkeit und Effizienz heraus.

Die Generierung der DGMs auf Basis der bereinigten Scans führt zu weiteren Ungenauigkeiten. Bei der Erstellung der DGMs und Füllung der Datenlücken durch Interpolationen kommt es im resultierenden Mesh oder Raster ebenfalls zu Abweichungen von der ursprünglichen Punktwolke. Diese Verzerrungen führen dazu, dass die räumliche Genauigkeit der Modelle stark variiert.

Durch Unsicherheiten in mehreren Schritten der Datenaufnahme- und Verarbeitung werden die Ergebnisse der Analysen verfälscht. Die Veränderungen, die sowohl beim RiSCAN PRO Oberflächenvergleich, als auch bei den DoDs erkennbar sind, können nicht eindeutig mit tatsächlichen Hangbewegungen in Verbindung gebracht werden.

Abschließend ist festzustellen, dass TLS in vielen Fällen eine effektive, ökonomische Methode zum Monitoring gravitativer Massenbewegungen darstellt (Bitelli et al., 2004). Allerdings ist die Bearbeitung der Daten komplex und zeitaufwändig. Aus diesem Grund sind zukünftig noch einige Herausforderungen zu bewältigen. Faktoren, wie Vegetation, klimatische Verhältnisse, sowie verschiedene Analyseschritte in der Weiterverarbeitung stellen Ansatzpunkte für zukünftige Forschung dar.

## 8. Perspektiven

TLS-Daten werden in den vergangenen Jahren immer häufiger zur Analyse gravitativer Massenbewegungen angewendet. Durch die Schnelligkeit und hohe Genauigkeit bei der Datenaufnahme liefert TLS eine vielversprechende Methode für zukünftige Forschung. Allerdings sind bei der Erfassung, Aufbereitung und Analyse der 3D-Punktwolken einige Herausforderungen zu bewältigen. Um noch genauere Informationen aus den 3D-Punktwolken generieren zu können, sind weitere Untersuchungen verschiedener Methoden zur Datenaufbereitung und -analyse notwendig. (Pirotti et al., 2013a)

In der Folge werden Vorschläge für eine Optimierung des Arbeitsablaufs am Standort der Hofermühl-Rutschung präsentiert. Zunächst kann die Aufstellung der Scanpositionen optimiert werden, um die Rutschung vollständiger erfassen zu können. Dabei ist es anzustreben, im Bereich des Gerinnebettes Daten mit einer höheren Punktdichte aufzunehmen. Die beiden Scanpositionen nehmen die Rutschung aus einem unterschiedlichen Horizontalwinkel auf. Allerdings befinden sich beide SPs auf einer ähnlichen Seehöhe. Folglich wird das UG aus einem vergleichbaren Vertikalwinkel erfasst. Durch eine Positionierung von SP 2 weiter hangaufwärts kann das UG von einem steileren Winkel aus aufgenommen werden. Das hat unter anderem den Vorteil, dass dadurch das Gerinnebett des Hofermühlbaches besser erfasst werden kann. Überdies kommt es zu weniger Abschattungen im Bereich der Abrisskante, da die Bäume durch den steileren Winkel eine geringere Fläche verdecken.

Um Abschattungen entgegenzuwirken, kann eine weitere Scanposition hinzugefügt werden. Durch eine Positionierung des Scanners am Hangfuß, nahe Gebäude 2, kann das Gerinnebett oberhalb aufgenommen werden. Dadurch kann die Struktur im Gerinnebereich aus näherer Entfernung und folglich mit höherer Punktdichte aufgenommen werden. Allerdings erfordert die Aufnahme aus einer weiteren Scanposition zusätzlichen Zeitaufwand und Speicherplatz. Überdies muss diese SP auf die bisherigen Scans registriert werden, wodurch wiederum Ungenauigkeiten entstehen können. So ist es empfehlenswert, vor Ort verschiedene Scanpositionen auszutesten, um eine optimale Menge und Aufstellung der SPs zu identifizieren. Infolgedessen kann eruiert werden, ob weitere SP zu einem tatsächlichen Mehrwert führen.

Für eine Analyse des UG im Zeitverlauf sind permanente Reflektoren anzubringen. Diese Zielmarken sind an mehreren, ortsfesten Standorten im UG aufzustellen. Dabei stellen vertikal angebrachte, hochreflektierende Zylinder eine gute Option dar. Die Zylinderform gewährleistet, dass diese aus mehreren Winkeln vollständig erfasst werden können. Zusätzlich können Stangen mit schwenkbaren Reflektoren angebracht werden, deren Position an die jeweilige Scanposition angepasst werden kann.

Durch die automatische Erfassung der Zielmarken in den Punktwolken kann eine effizientere, automatisierte Registrierung durchgeführt werden. Neben Zeitersparnis hat eine automatische Registrierung den Vorteil, dass dabei höhere Genauigkeiten erreicht werden können als durch manuelle Registrierung (Prokop and Panholzer, 2009). Zusätzlich dienen die Zielmarken der räumlichen Verortung der Punktwolken. Die einzelnen Zielmarken können durch differenzielles GPS (dGPS) vermessen werden. Dadurch kann das gesamte Scanprojekt einem globalen Koordinatensystem untergeordnet werden. Die Georeferenzierung der Daten liefert in der Folge einen Ausgangspunkt für zahlreiche weitere Analysen. So können Ausdehnung der Rutschung und deren Veränderung im Zeitverlauf quantifiziert werden.

In Bezug auf die Datenaufbereitung können ebenfalls Schritte zur Optimierung des Ablaufs getroffen werden. Bei der Filterung der Vegetation können die Werte der Filterparameter an individuelle Flächen des UG angepasst werden. Durch eine Unterscheidung von Flächen mit hoher Hangneigung und dichtem Vegetationsbewuchs und Wiesenflächen mit geringer Hangneigung können die Filterparameter besser an die jeweilige Situation angeglichen werden. Eine individuelle Anpassung der Filter an die Hangbereiche führt zur Minimierung von Fehlern im Verlauf der Klassifikation. In der Folge können homogenere Punktwolken generiert werden. Alternativ zur Anwendung des „Terrain Filters“ von RiSCAN PRO stehen weitere Möglichkeiten zur Vegetationsfilterung zur Verfügung. Das CANUPO-Plugin der Software CloudCompare bietet eine Open Source Alternative zur Vegetationsfilterung bei Punktwolken (Brodu and Lague, 2012).

Im Rahmen der Arbeit wird mit dem Vergleich der DGMs ein bewährter Ansatz gewählt, um Oberflächenveränderungen im UG festzustellen. Für zukünftige Analysen bietet ein „Cloud to Cloud“ (C2C) Vergleich eine alternative Vorgehensweise. Im Verlauf der Methode werden die Daten nicht in Raster umgewandelt, sondern die Analyse wird direkt mit der 3D-Punktwolke durchgeführt. (Girardeau-Montaut et al., 2005) Für jeden Punkt einer Punktwolke wird der am nächsten gelegene Punkt der anderen Punktwolke identifiziert. Anschließend wird die Differenz zweier Scans, anhand der Entfernung der einzelnen Punkte der Scans zueinander eruiert. (Lague et al., 2013)

Als weiterführender Schritt dieser Arbeit ist es von Interesse, den Grad der Genauigkeit der Untersuchungen zu quantifizieren. Lague et al. (2013) präsentieren mit der „Multiscale Model to Model Cloud Comparison“ (M3C2) eine neue Methode zum Vergleich von TLS-Daten mit komplexer Topographie. Im Verlauf der Methode werden lokale Konfidenzintervalle für die Oberflächenveränderung berechnet. Durch Anwendung der Analyse kann zudem besser auf die Komplexität des UG eingegangen werden. Weiters können die Unsicherheiten der Daten analysiert werden.

Aufbauend auf den georeferenzierten Punktwolken können die TLS-Daten überdies mit weiteren Datenquellen verknüpft werden. Durch eine Kombination mit Daten alternativer Untersuchungsmethoden können weitere Erkenntnisse über den Standort erlangt werden. An der Hofermühl-Rutschung werden bereits einige Daten regelmäßig aufgenommen. Aktuell werden am Standort Steine mittels GNSS vermessen, die in und um das Ereignis an der Bodenoberfläche befestigt sind. Durch die Bewegung der Steine können Rückschlüsse auf die Aktivität der Rutschung gezogen werden. So können die GNSS-Daten zum Vergleich mit den 3D-Punktwolken herangezogen werden. Dabei kann analysiert werden, ob Bewegungen der GNSS-Punkte mit den Oberflächenveränderungen auf den TLS-Punktwolken übereinstimmen. Am Standort werden überdies regelmäßig Klimadaten am Standort aufgenommen. Aus den Niederschlagswerten können Zusammenhänge zwischen Bewegungen der Rutschung und Starkniederschlagsereignissen untersucht werden.

ALS-Daten können ebenfalls ergänzende Informationen zu TLS-Daten liefern (Bitelli et al., 2004). Die Methode ermöglicht die Erstellung großflächiger DGMs, anhand derer Rutschungen kartiert werden können. Mittels multitemporaler Daten können zudem Oberflächenveränderungen beobachtet werden. So können ALS-Daten zum Vergleich mit den TLS-Daten herangezogen werden. Mithilfe zeitgleich aufgenommener Daten kann überprüft werden, ob die Abgrenzungen sowie eventuelle Hangbewegungen auf beiden Datenquellen identifiziert werden können. Folglich sind Methoden anzustreben, die eine Kombination von ALS und TLS-Daten erlauben, um dadurch Analysen mithilfe von LiDAR-Daten unterschiedlicher Maßstäbe und Aufnahmetechniken zu ermöglichen (Bremer and Sass, 2012). Dabei kann durch die großflächige Verfügbarkeit von ALS-Daten einerseits und die flexible Aufnahme von TLS-Daten andererseits ein gutes Werkzeug zur Untersuchung gravitativer Massenbewegungen geschaffen werden (Bremer and Sass, 2012).

Aktuell wird TLS oftmals mit 3D-Photogrammetriedaten kombiniert. Mithilfe der „Structure from Motion“-Methode (SfM) werden dreidimensionale Strukturen aus zweidimensionalen Bildsequenzen abgeleitet. Unter Berücksichtigung von Bewegungssignalen wird infolgedessen aus Bilddaten ein dreidimensionales Modell der Oberfläche erstellt. Durch die Kombination von TLS und Photogrammetrie können Hanginformationen mit hoher photorealistischer Qualität sowie hoher Auflösung generiert werden. (Bitelli et al., 2004, Haemmerle et al., 2016) Oftmals werden Photogrammetrie-Daten mithilfe von „Unmanned Aired Vehicles“ (UAV) aufgenommen, die das UG überfliegen. Dadurch wird das Untersuchungsgebiet von einem vertikalen Winkel aus aufgenommen. Folglich können Abschattungen im Bereich der Rutschung vermieden werden. Am Standort der Hofermühle ist die Methode von Vorteil, um Datenlücken im Bereich der Abrisskante zu schließen.

## 8. Perspektiven

---

Abschließend ist festzustellen, dass durch eine Optimierung der Arbeitsabläufe zukünftig detaillierte Scans der Hofermühl-Rutschung generiert werden können. Dabei ist auf die komplexe Topographie und Vegetationsbedingungen am Standort einzugehen. Durch die Fortsetzung regelmäßiger Aufnahmen am Standort können aussagekräftige Daten aufgenommen werden, die detaillierte Informationen über die Hangentwicklung liefern. Auf deren Basis können zukünftig Analysen zum besseren Verständnis der Hofermühl-Rutschung durchgeführt werden.

## 9. Literatur

- ABELLÁN, A., DERRON, M.-H. & JABOYEDOFF, M. 2016. "Use of 3D Point Clouds in Geohazards" Special Issue: Current Challenges and Future Trends. *Remote Sensing*, 8, 130-139.
- ABELLÁN, A., JABOYEDOFF, M., OPPIKOFER, T. & VILAPLANA, J. M. 2009. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9, 365-372.
- ABELLÁN, A., VILAPLANA, J. & MARTÍNEZ, J. 2006. Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain). *Engineering geology*, 88, 136-148.
- AHNERT, F. 2009. *Einführung in die Geomorphologie*, UTB.
- AICHHOLZER, O. & JUETTLER, B. 2014. *Einführung in die angewandte Geometrie*, Springer.
- ALBA, M., FREGONESE, L., PRANDI, F., SCAIONI, M. & VALGOI, P. 2006. Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 1-6.
- ALBA, M., LONGONI, L., PAPINI, M., RONCORONI, F. & SCAIONI, M. 2005. Feasibility and problems of TLS in modeling rock faces for hazard mapping. *ISPRS WG III/3, III/4*, 3, 12-14.
- ARMESTO, J., ORDÓÑEZ, C., ALEJANO, L. & ARIAS, P. 2009. Terrestrial laser scanning used to determine the geometry of a granite boulder for stability analysis purposes. *Geomorphology*, 106, 271-277.
- BAE, K.-H. & LICHTI, D. D. 2008. A method for automated registration of unorganised point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63, 36-54.
- BARBARELLA, M. & FIANI, M. 2012. Landslide Monitoring Using Terrestrial Laser Scanner: Georeferencing and Canopy Filtering Issues in a Case Study. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XXXIX-B5, 157-162.
- BARBARELLA, M., FIANI, M. & LUGLI, A. 2013. Landslide monitoring using multitemporal terrestrial laser scanning for ground displacement analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 5705, 1-21.
- BARBARELLA, M., FIANI, M. & LUGLI, A. 2017. Uncertainty in terrestrial laser scanner surveys of landslides. *Remote Sensing*, 9, 113-140.
- BESL, P. J. & MCKAY, N. D. Method for registration of 3-D shapes. *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*, 1992. 586-606.
- BFW 2016. Digitale Bodenkarte von Österreich (eBOD). Bundesforschungszentrum für Wald.
- BITELLI, G., DUBBINI, M. & ZANUTTA, A. 2004. Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35, 246-251.

- BREMER, M. & SASS, O. 2012. Combining airborne and terrestrial laser scanning for quantifying erosion and deposition by a debris flow event. *Geomorphology*, 138, 49-60.
- BRODU, N. & LAGUE, D. 2012. 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68, 121-134.
- CARREA, D., ABELLAN, A., DERRON, M.-H. & JABOYEDOFF, M. 2015. Automatic rockfalls volume estimation based on terrestrial laser scanning data. *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2*. Springer.
- CHARLTON, M. E., COVENEY, S. J. & MCCARTHY, T. 2009. Issues in laser scanning. *Laser Scanning for the Environmental Sciences*, 1.
- CHEN, Y. & MEDIONI, G. 1992. Object modelling by registration of multiple range images. *Image and vision computing*, 10, 145-155.
- CHÁVEZ, A. & KARSTOFT, H. 2012. Improvement of KinectTM sensor capabilities by fusion with laser sensing data using octree. *Sensors*, 12, 3868-3878.
- CLAGUE, J. J. 2013. Landslide. In: BOBROWSKY, P. T. (ed.) *Encyclopedia of Natural Hazards*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- CLAGUE, J. J. & ROBERTS, N. J. 2012. Landslide hazard and risk. In: CLAGUE, J. J. & STEAD, D. (eds.). Cambridge: Cambridge University Press.
- COLDEWEY, W. G. & GOEBEL, P. 2014. *Hydrogeologische Gelände-und Kartiermethoden*, Springer.
- CROZIER, M. & GLADE, T. 2005. The nature of landslide hazard impact. *Landslide hazard and risk*. Wiley, London, 43-74.
- CROZIER, M. J. 1986. *Landslides: causes, consequences & environment*, Taylor & Francis.
- CRUDEN, D. M. 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 43, 27-29.
- CRUDEN, D. M. & VARNES, D. J. 1996. Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3- Landslide types and processes. *Transportation research board special report*.
- DASSOT, M., CONSTANT, T. R. & FOURNIER, M. 2011. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application fields, benefits and challenges. *Annals of Forest Science*, 68, 959-974.
- DE VALLEJO, L. I. G. & FERRER, M. 2011. *Geological engineering*, CRC Press.
- DEEMS, J. S., PAINTER, T. H. & FINNEGAN, D. C. 2013. Lidar measurement of snow depth: a review. *Journal of Glaciology*, 59, 467-479.
- DIKAU, R. 1996. *Landslide recognition: identification, movement, and causes*, Wiley.
- DIKAU, R. & GLADE, T. 2002. Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen. *Geographische Rundschau*, 54, 38-47.
- DUNNICLIFF, J. 1993. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*, John Wiley & Sons.

- DUNNING, S. A., MASSEY, C. I. & ROSSER, N. J. 2009. Structural and geomorphological features of landslides in the Bhutan Himalaya derived from Terrestrial Laser Scanning. *Geomorphology*, 103, 17-29.
- EGGER, H. & WESSELY, G. 2014. *Wienerwald*, Gebrüder Bornträger.
- FISCHER, M., HUSS, M., KUMMERT, M. & HOELZLE, M. 2016. Application and validation of long-range terrestrial laser scanning to monitor the mass balance of very small glaciers in the Swiss Alps. *Cryosphere*, 10, 1279-1295.
- GHUFFAR, S., SZÉKELY, B., RONCAT, A. & PFEIFER, N. 2013. Landslide displacement monitoring using 3D range flow on airborne and terrestrial LiDAR data. *Remote Sensing*, 5, 2720-2745.
- GIRARDEAU-MONTAUT, D., ROUX, M., MARC, R. & THIBAUT, G. 2005. Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, W19.
- GLADE, T. & DIKAU, R. 2001. Gravitative Massenbewegungen–vom Naturereignis zur Naturkatastrophe. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 145, 42-55.
- GLADE, T. & STOETTER, J. 2008. Gravitative Massenbewegungen und Schneelawinen. In: FELGENTREFF, C. & GLADE, T. (eds.) *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*. Berlin, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- GRUEN, A. & AKCA, D. 2005. Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59, 151-174.
- GUARNIERI, A., VETTORE, A., PIROTTI, F., MENENTI, M. & MARANI, M. 2009. Retrieval of small-relief marsh morphology from terrestrial laser scanner, optimal spatial filtering, and laser return intensity. *Geomorphology*, 113, 12-20.
- HAEMMERLE, M., SCHUTT, F. & HOEFLE, B. 2016. Terrestrial and unmanned aerial system imagery for deriving photogrammetric three-dimensional point clouds and volume models of mass wasting sites. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10.
- HAMRAH, M., SHOJAEI, D. & MOSAVI, A. 2006. Evaluation of DTM Generation in Surfer 8.0. E–Conference Proceedings of Map India 2006.
- HASHEMI, A., KALANTARI, M. & KASSER, M. 2013. Direct Solution of the 7 parameters transformation problem. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 7, 1375.
- HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. 2009. Principles of 3D laser scanning. *Laser scanning for the environmental sciences*, 21-34.
- HIGHLAND, L. M. & BOBROWSKY, P. 2008. The Landslide Handbook — A Guide to Understanding Landslides. *Landslides*.
- HOLLAUS, M. & HOEFLE, B. 2010. Terrain roughness parameters from full-waveform airborne LIDAR data. *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPR*. Vienna, Austria.
- HOPKINSON, C. 2007. The influence of flying altitude, beam divergence, and pulse repetition frequency on laser pulse return intensity and canopy frequency distribution. *Can. J. Remote Sensing*, 33, 312-324.

- HUMER, L. 2016. *Monitoring, mögliche Ursachen und Schutzmaßnahmen von Hangrutschungen am Beispiel der Rut-schung Hofermühle in Niederösterreich*. Bachelorarbeit, Universität Wien.
- HUPPERT, H. E. & SPARKS, R. S. J. 2006. Extreme natural hazards: population growth, globalization and environmental change. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364, 1875-1888.
- HUTCHINSON, J. N. 1988. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*. Pergamon.
- INGENSAND, H. Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology. Proceedings of the 3rd IAG/12th FIG symposium, Baden, Austria, 2006.
- JABOYEDOFF, M., OPPIKOFER, T., ABELLÁN, A., DERRON, M. H., LOYE, A., METZGER, R. & PEDRAZZINI, A. 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: A review. *Natural Hazards*, 61, 5-28.
- JABOYEDOFF, M., OPPIKOFER, T., MINOIA, R., LOCAT, J. & TURMEL, D. Terrestrial LIDAR investigation of the 2004 rockslide along Petit Champlain Street, Québec City (Québec, Canada). 4th Canadian conference on geohazards: from causes to management. Presse de l'Université Laval, 2008. 295-301.
- JOECKEL, R. & STOBBER, M. 1991. *Elektronische Entfernungs-und Richtungsmessung*, Wittwer.
- KEATON, J. R. & DEGRAFF, J. V. 1996. Surface observation and geologic mapping. *Landslides, Investigation and Mitigation, Transportation Research Board, National Research Council Special Report*, 247, II.
- KRAUS, K. & PFEIFER, N. 2001. Advanced DTM generation from LIDAR data. *International Archives Of Photogrammetry Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, 34, 23-30.
- LAGUE, D., BRODU, N. & LEROUX, J. 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10-26.
- LANDNOE 2015. Statistisches Handbuch des Landes Niederösterreich. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung.
- LESER, H. 1977. *Feld-und Labormethoden der Geomorphologie*, de Gruyter.
- LOEFFLER, E., HONECKER, U. & STABEL, E. 2005. Geographie und Fernerkundung.
- LOTTER, M. & HABERLER, A. 2013. Geogene Naturgefahren – gravitative Massenbewegungen und ihre Ursachen. *NÖ Geotage*, 5-17.
- LUHMANN, T. & MUELLER, C. 2011. Photogrammetrie-Laserscanning-Optische 3D-Messtechnik. *Beiträge der Oldenburger 3D - Tage*.
- MALLET, C. & BRETAR, F. 2009. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 64, 1-16.
- MERRITT, A., CHAMBERS, J., MURPHY, W., WILKINSON, P., WEST, L., GUNN, D., MELDRUM, P., KIRKHAM, M. & DIXON, N. 2014. 3D ground model development for an active

- landslide in Lias mudrocks using geophysical, remote sensing and geotechnical methods. *Landslides*, 11, 537-550.
- MILAN, D. J., HERITAGE, G. L. & HETHERINGTON, D. 2007. Application of a 3D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river. *Earth surface processes and landforms*, 32, 1657-1674.
- MONSERRAT, O. & CROSETTO, M. 2008. Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63, 142-154.
- OLSEN, M. J., JOHNSTONE, E., KUESTER, F., DRISCOLL, N. & ASHFORD, S. A. 2010. New automated point-cloud alignment for ground-based light detection and ranging data of long coastal sections. *Journal of Surveying Engineering*, 137, 14-25.
- OPPIKOFER, T., JABOYEDOFF, M., BLIKRA, L., DERRON, M. H. & METZGER, R. 2009. Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9, 1003-1019.
- PERRONE, A., LAPENNA, V. & PISCITELLI, S. 2014. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review. *Earth-Science Reviews*, 135, 65-82.
- PETRIE, G. & TOTH, C. K. 2008. Airborne and spaceborne laser profilers and scanners. *Shan J, Toth CK*, 29-87.
- PETSCHKO, H., BELL, R., BRENNING, A. & GLADE, T. 2012. Landslide susceptibility modeling with generalized additive models—facing the heterogeneity of large regions. *Landslides and Engineered Slopes, Protecting Society through Improved Understanding*, 1, 769-777.
- PETZOLD, B., REISS, P. & STOESSEL, W. 1999. Laser scanning—Surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing*, 54, 95-104.
- PFEIFER, N., MANDLBURGER, G., OTEPKA, J. & KAREL, W. 2014. OPALS—A framework for Airborne Laser Scanning data analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 45, 125-136.
- PIROTTI, F., GUARNIERI, A. & VETTORE, A. 2013a. Ground filtering and vegetation mapping using multi-return terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 56-63.
- PIROTTI, F., GUARNIERI, A. & VETTORE, A. 2013b. State of the Art of Ground and Aerial Laser Scanning Technologies for High-Resolution Topography of the Earth Surface. *European Journal of Remote Sensing*, 46, 66-78.
- PRAGER, C., KRAINER, K., SEIDL, V. & CHWATAL, W. 2006. Spatial features of Holocene sturzstrom-deposits inferred from subsurface investigations (Fernpass rockslide, Tyrol, Austria). *Geo. Alp*, 3, 147-166.
- PRINZ, H. & STRAUß, R. 2012. *Ingenieurgeologie*, Springer.
- PROKOP, A. & PANHOLZER, H. 2009. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9, 1921-1928.

- REGMI, N. R., GIARDINO, J. R., MCDONALD, E. V. & VITEK, J. D. 2014. A comparison of logistic regression-based models of susceptibility to landslides in western Colorado, USA. *Landslides*, 11, 247-262.
- RESHETYUK, Y. 2006. *Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners*. KTH.
- RIEGL 2005. *RiSCAN PRO User Manual*, RIEGL LMS.
- ROYÁN, M. J., ABELLÁN, A., JABOYEDOFF, M., VILAPLANA, J. M. & CALVET, J. 2014. Spatio-temporal analysis of rockfall pre-failure deformation using Terrestrial LiDAR. *Landslides*, 11, 697-709.
- RYCHKOV, I., BRASINGTON, J. & VERICAT, D. 2012. Computational and methodological aspects of terrestrial surface analysis based on point clouds. *Computers & Geosciences*, 42, 64-70.
- SANDERSON, D. & SHARMA, A. 2016. World Disasters Report 2016. Resilience : saving lives today, investing for tomorrow. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies.
- SANTANA, D., COROMINAS, J., MAVROULI, O. & GARCIA-SELLÉS, D. 2012. Magnitude–frequency relation for rockfall scars using a Terrestrial Laser Scanner. *Engineering Geology*, 145, 50-64.
- SAUSGRUBER, T. 2013. Hofermühlrutschung, Waidhofen/Ybbs. Forsttechnischer Dienst für Wildbach und Lawinenverbauung.
- SAUSGRUBER, T. 2016. Protokoll zum Lokalausweis Hangprozess Hofermühle/Hofermühlrutschung. Forsttechnischer Dienst für Wildbach und Lawinenverbauung.
- SCHNABEL, W. 2002. *Geologische Karte von Niederösterreich: mit Kurzerläuterung*. Geologische Bundesanstalt.
- SCHUERCH, P., DENSMORE, A. L., ROSSER, N. J., LIM, M. & MCARDELL, B. W. 2011. Detection of surface change in complex topography using terrestrial laser scanning: application to the Illgraben debris - flow channel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 1847-1859.
- SCHUSTER, R., DAURER, A., KRENMAYR, H., LINNER, M., MANDL, G., PESTAL, G. & REITNER, J. 2013. Rocky Austria. *Geologie von Österreich–kurz und bunt*. Geologische Bundesanstalt, Wien.
- SCHWARZ, H. R. & KÖCKLER, N. 2013. *Numerische mathematik*, Springer.
- SCHWENK, H. 1992. Massenbewegungen in Niederösterreich 1953–1990. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 135, 597-660.
- SITHOLE, G. & VOSSelman, G. 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 59, 85-101.
- STRAUB, C., WANG, Y. & IERCAN, O. 2009. *Airborne laser scanning: Methods for processing and automatic feature extraction for natural artificial objects*, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons.

- THEILER, P. & SCHINDLER, K. 2012. Automatic registration of terrestrial laser scanner point clouds using natural planar surfaces. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 173-178.
- THENIUS, E. 1974. Geologie der österreichischen Bundesländer in kurzgefaßten Einzeldarstellungen. *Wien*.
- TOLLMANN, A. 1985. Geologie von Österreich. Teil II, Außerzentralalpiner Anteil. *F. Deuticke, Wien*.
- TSENG, C. M., LIN, C. W., STARK, C. P., LIU, J. K., FEI, L. Y. & HSIEH, Y. C. 2013. Application of a multi - temporal, LiDAR - derived, digital terrain model in a landslide - volume estimation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 1587-1601.
- VARNES, D. J. 1978. Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11-33.
- VOSSelman, G. & KLEIN, R. 2010. Visualisation and structuring of point clouds. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, 1, 43-79.
- VOSSelman, G. & MAAS, H.-G. 2010. *Airborne and terrestrial laser scanning*, Whittles Publishing.
- WAGNER, W., ULLRICH, A., MELZER, T., BRIESE, C. & KRAUS, K. 2004. From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges.
- WEHR, A. & LOHR, U. 1999. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54, 68-82.
- WESSELY, G., DRAXKER, I., GANGL, P., GOTTSCHLING, P., HEINRICH, M., HOFMANN, T., LENHARDT, W., MATURA, A., PAVUZAA, R. & PERESSON, H. 2006. *Niederösterreich. Geologie der österreichischen Bundesländer*, Geologische Bundesanstalt.
- WHEATON, J. M., BRASINGTON, J., DARBY, S. E. & SEAR, D. A. 2010. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 136-156.
- WP/WLI 1993. Multilingual landslide glossary. UNESCO Working Party on World Landslide Inventory.
- ZAMG. 2016. *Klimanormalperiode 1981-2010* [Online]. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Available: <http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/daten-download/klimamittel> [Accessed 28.09.2016].
- ZANGERL, C., PRAGER, C., BRANDNER, R., BRUECKL, E., EDER, S., FELLIN, W., TENTSCHERT, E., POSCHER, G. & SCHOENLAUB, H. 2008. Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen. *Geo. Alp*, 5, 1-51.
- ZARUBA, Q. & MENCL, V. 1982. Landslides and their control. *Landslides and their control*.
- ZEPP, H. 2011. *Geomorphologie: eine Einführung*, UTB.
- ZHANG, Z. 1994. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International journal of computer vision*, 13, 119-152.

## 10. Anhang

### OPALS-Skript zur Transformation der 3D-Punktwolken (Scan 19.11.2015)

#### Gesamtes Untersuchungsgebiet

```
opalsImport -inFile 151119_crop.txt -outFile hoferm151119.odm
opalsCell -inFile hoferm151119.odm -outFile hoferm151119_50cm.tif -feature max -cellSize 0.5
opalsStatFilter -inFile hoferm151119_50cm.tif -outFile hoferm151119_50cm_smooth.tif -feature mean -kernelSize 3
opalsAlgebra -inFile hoferm151119_50cm.tif -inFile hoferm151119_50cm_smooth.tif -outFile hoferm151119_50cm_filled.tif -formula
"return r[1] if (r[0] is None) else r[0]" -gridSize 0.5
opalsShade -infile hoferm151119_50cm_filled.tif
```

#### Abgegrenzter Rutschungsbereich

```
opalsImport -inFile 151119_ls.txt -outFile hoferm151119ls.odm
opalsCell -inFile hoferm151119ls.odm -outFile hoferm151119ls_50cm.tif -feature max -cellSize 0.5
opalsStatFilter -inFile hoferm151119ls_50cm.tif -outFile hoferm151119ls_50cm_smooth.tif -feature mean -kernelSize 3
opalsAlgebra -inFile hoferm151119ls_50cm.tif -inFile hoferm151119ls_50cm_smooth.tif -outFile hoferm151119ls_50cm_filled.tif -formula
"return r[1] if (r[0] is None) else r[0]" -gridSize 0.5
opalsShade -infile hoferm151119ls_50cm_filled.tif
```