



universität  
wien

# MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„GIS-basierte Kartierung glazialer Geländeformen in den Öztaler Alpen zur Findung eines eiszeitlichen Eisdoms.“

verfasst von / submitted by

Doris Gruber, BSc

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

Wien, 2019 / Vienna, 2019

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

UA 066 855

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

Masterstudium Geographie

Betreut von / Supervisor:

PD Dr.rer.nat. Mag.rer.nat. Martin Mergili



## **Danksagung**

Ich danke meinen Betreuern PD Dr.rer.nat. Mag.rer.nat. Martin Mergili und Univ.Prof. Dipl.Geol. Dr.rer.nat. Markus Fiebig für ihre Unterstützung und Geduld.

Ebenso danke ich Dr. Jürgen Reitner für seine Hilfsbereitschaft.

Bei meinen StudienkollegInnen, vor allem bei Isabelle, Nora, Lucia, Horst, Shyama, Anne und Kathrin, bedanke ich mich für die Motivation, die Hilfsbereitschaft und die vielen gemeinsamen schönen und lustigen Stunden während dem Studium. In ihnen habe ich FreundInnen fürs Leben gefunden.

Ein großer Dank gebührt auch meiner ehemaligen Schulkollegin und guten Freundin Julia, die mich speziell in den letzten Monaten motiviert hat. Die gemeinsamen, produktiven Schreibstunden in der Bibliothek waren sehr wichtig für mich.

Der größte Dank gilt meinen Eltern und meiner gesamten Familie für die jahrelange Unterstützung und Motivation vor und während meinem Studium. Ohne sie wäre das alles nicht möglich gewesen.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung, Forschungsfrage und Definitionen.....	1
2. Methoden.....	4
3. Daten.....	6
4. Einführung in das Untersuchungsgebiet.....	8
4.1. Geographische Lage und Landnutzung.....	8
4.2. Vegetation und Klima.....	10
4.3. Geologie.....	15
4.4. Geomorphologie.....	16
5. Ergebnisse.....	18
6. Diskussion.....	45
7. Schlussfolgerungen und Zukunftsperspektiven.....	51

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über die Datengrundlagen und deren Eigenschaften.....	6
Tabelle 2: Vergleich der unterschiedlichen Moränen-Klassifikation der GEOFAST-Karten ( <i>Blatt 172 – Weißkugel</i> und <i>Blatt 173 – Sölden</i> ) (siehe GBA). .....	47

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebietes (rot abgegrenzt) in Österreich.....	9
Abbildung 2: Lage des Untersuchungsgebietes (rot abgegrenzt) in den Ötztaler Alpen.....	9
Abbildung 3: Jahresmitteltemperaturen in °C im Zeitraum von 1851 bis 2018 der Messstation Obergurgl-Vent (Datenquelle: HISTALP, ZAMG). .....	13
Abbildung 4: Jahresniederschlagssummen in mm im Zeitraum von 1971 bis 2015 der Messstation Sölden-Kaisers (Datenquelle: eHYD). .....	13
Abbildung 5: Digitales Geländemodell des Untersuchungsgebietes. ....	19
Abbildung 6: Schummerungskarte des Untersuchungsgebietes (DGM-Derivat).....	20
Abbildung 7: Orthofoto des Untersuchungsgebietes (rot abgegrenzt). .....	20
Abbildung 8: Geologische Karte des Untersuchungsgebietes (rot abgegrenzt). .....	21

Abbildung 9: Hangneigungskarte des Untersuchungsgebietes (DGM-Derivat).....	22
Abbildung 10: Raster zur Unterteilung des Untersuchungsgebietes in gleichgroße Ausschnitte zur Erleichterung der Kartierung.....	23
Abbildung 11: Rasterabschnitt des Untersuchungsgebietes.....	24
Abbildung 12: Vergleich der Kartiergrundlagen eines ausgewählten Ausschnitts des Untersuchungsgebietes (Beispiel 1).....	26
Abbildung 13: Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit kartierten glazialen Geländeformen (Beispiel 1).....	27
Abbildung 14: Vergleich der Kartiergrundlagen eines ausgewählten Ausschnitts des Untersuchungsgebietes (Beispiel 2).....	29
Abbildung 15: Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit kartierten glazialen Geländeformen (Beispiel 2).....	30
Abbildung 16: Vergleich der Kartiergrundlagen eines ausgewählten Ausschnitts des Untersuchungsgebietes (Beispiel 3).....	32
Abbildung 17: Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit kartierten glazialen Geländeformen (Beispiel 3).....	33
Abbildung 18: Vergleich der Kartiergrundlagen eines ausgewählten Ausschnitts des Untersuchungsgebietes (Beispiel 4).....	35
Abbildung 19: Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit kartierten glazialen Geländeformen (Beispiel 4).....	36
Abbildung 20: Vergleich der Kartiergrundlagen eines ausgewählten Ausschnitts des Untersuchungsgebietes (Beispiel 5).....	38
Abbildung 21: Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit kartierten glazialen Geländeformen (Beispiel 5).....	39
Abbildung 22: Vergleich der Kartiergrundlagen eines ausgewählten Ausschnitts des Untersuchungsgebietes (Beispiel 6).....	41
Abbildung 23: Vergleich der unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen der Schummerungskarte eines Abschnitts des Untersuchungsgebietes (Beispiel 6). a) Azimut 45°; b) Azimut 135°; c) Azimut 225°; d) Azimut 315°; Sonnenhöhe gleichbleibend 45°.....	42
Abbildung 24: Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit kartierten glazialen Geländeformen (Beispiel 6).....	43

## Kurzfassung

Die Alpen waren während der letzten Eiszeit durch starke Vergletscherung und bis ins Alpenvorland reichende Eisstromnetze geprägt. Die exakte Ausdehnung der Gletscher sowie die Abgrenzung von ehemals vergletscherten Flächen zu nicht vergletscherten Flächen (Gletscher versus Nunataker) wurden zumindest stellenweise bis heute noch nicht genau festgelegt und bieten viel Forschungspotenzial. Für das Verständnis der Landschaftsentwicklung Österreichs ebenfalls interessant ist das mögliche Vorkommen von Transfluenzpassen und Eisdomen im Alpenraum während der Würm-Eiszeit. SEGUINOT et al. (2018) postulierten im Diskussionspapier ihres später publizierten Artikels einen ehemaligen eiszeitlichen Eisdom in den Öztaler Alpen, welcher im Zuge dieser Arbeit mithilfe von GIS-basierter Kartierung ausgewählter glazialer Geländeformen – hier als Synonym für die computergestützte Interpretation von Laserscan-Daten verwendet – gesucht beziehungsweise gefunden werden sollte. Gleichzeitig wurde die prinzipielle Eignung der gewählten Forschungsmethode für diese Fragestellung überprüft. Als Kartiergrundlagen dienten ein hochaufgelöstes digitales Geländemodell und dessen Derivate sowie Orthofotos und geologische Karten des Untersuchungsgebietes. Die Datenaufbereitung und die visuelle Interpretation sowie die anschließende Darstellung der Ergebnisse erfolgten mithilfe des Computer-Programms ArcMap 10.6, einer GIS-Software der Firma Esri. Im Zuge der Kartierung wurden anhand der geomorphologischen Formen *Blockgletscher*, *Moränenwälle*, *Schlifflinien* und *Rundhöcker* ehemals vergletscherte Gebiete sowie die Eisfließrichtung bestimmt. Dies sollte dazu dienen, Schlifffgrenzen zu definieren und Anzeichen für den postulierten eiszeitlichen Eisdom zu finden.

Das Bestimmen von exakten Schlifffgrenzen war im Untersuchungsgebiet mit den verfügbaren Daten und der gewählten Forschungsmethode jedoch nicht möglich, da die diesbezüglich relevanten Bereiche entweder durch jüngere Vergletscherungen und gravitative Massenbewegungen stark überprägt oder durch Schneeflächen bedeckt waren. Ebenso wenig konnten Hinweise auf den gesuchten Eisdom gefunden werden. In beiden Fällen wäre zusätzliche Feldforschung notwendig um Unsicherheiten zu beseitigen und genauer nachzuprüfen. Auch wenn mit der angewandten Methode die Forschungsfrage im gewählten Untersuchungsgebiet nicht bejaht werden konnte, kommt man dennoch zu dem wichtigen Ergebnis, dass GIS-basierte Kartierung, also die computergestützte Interpretation von Laserscan-Daten, zweifellos hilft, zeitsparend thematisch interessante Gebiete herauszufiltern um gezieltere Feldforschung zu ermöglichen. Die Arbeit mit Fernerkundungsdaten ist daher ein wichtiges Mittel der modernen Forschung mit viel Zukunftspotenzial.

## Abstract

The European Alps have been shaped by strong glaciation and a large glacier network that reached to the Alpine foreland during the last ice age. The exact expansion of the glaciers as well as the distinction between formerly glaciated and formerly non-glaciated areas (glacier versus nunataks) have at least in some places not been investigated or specified until today and offer potential for further research. Also of interest for the understanding of landscape development in Austria is the potential occurrence of ice domes in the Alpine region during the Würm ice age. SEGUINOT et al. (2018) postulate a former ice-age ice dome in the Ötztaler Alps in their discussion paper of a later published article. The aim of the present thesis is to find this ice dome using GIS-based mapping of selected glacial landforms – here used as synonym for computer-based interpretation of laser scan data. A high-resolution digital terrain model and its derivatives as well as an orthophoto and a geological map of the study area served as bases for the mapping. The data processing, the visual interpretation and the presentation of the results were carried out using the computer programme ArcMap 10.6, a GIS-software of the company Esri. In the course of the mapping there were identified formerly glaciated areas and the ice flow direction on the basis of the geomorphological features *rock glaciers*, *moraines*, *linear glacial polish* and *roches moutonnées*. This should help to define a boundary between glacial polished and not polished areas as well as to find indications for the postulated ice-age ice dome.

However, the determination of exact boundaries between polished and not polished areas has not been possible in the study area with the available data and the selected research method. The relevant areas are either strongly reshaped by younger geomorphological processes or covered with snow. Furthermore, there could not be found indications for the postulated ice dome. In both cases, additional fieldwork would be necessary to examine and remove uncertainties. Nevertheless, an important result of the thesis is that GIS-based mapping (computer-based interpretation of laser scan data) helps without doubt to filter and determine thematic interesting areas expeditiously in order to enable more focused fieldwork. The use and processing of remote sensing data is therefore an important tool of the recent research with considerable future potential.



# 1. Einleitung, Forschungsfrage und Definitionen

Der europäische Alpenraum wurde in der letzten Eiszeit bekanntermaßen von großen Talgletschern in Eisstromnetzen geprägt und geformt. Das heutige Landschaftsbild weist Relikte der damaligen Zeit auf und lässt somit Rückschlüsse auf die Vergangenheit zu, welche wiederum Erkenntnisse für die Zukunft des Alpenraumes bringen können. Gerade in Zeiten des globalen Wandels und dessen in vielerlei Hinsicht ungewisser Auswirkung auf den fragilen Lebensraum der Hochgebirge sind sämtliche Informationen zur Landschaftsentwicklung von großer Bedeutung. Die Geomorphologie ist für diese Zwecke ein geeignetes wissenschaftliches Fachgebiet und liefert mit ihren spezifischen Theorien und Methoden wichtige Beiträge zur aktuellen Forschung im Alpenraum.

Für den östlichen Alpenraum leistete VAN HUSEN (1987) mit seiner Karte der Vergletscherung der Ostalpen in der letzten Eiszeit einen großen Beitrag zur Thematik und eine Grundlage für zahlreiche weitere Forschungen. Die Karte zeigt die maximale Ausdehnung der Vergletscherung in den Ostalpen in der Würm-Eiszeit vergleichsweise detailliert. VAN HUSEN unterscheidet eindeutig zwischen vergletscherten und nicht vergletscherten Bereichen (Gletscher versus Nunataker) und gibt Höhenschichtlinien der Eisoberfläche in 100 Meter Abständen an. Da es jedoch immer noch Ungereimtheiten und Wissenslücken zur exakten Gletscherausdehnung auf regionaler beziehungsweise lokaler Ebene gibt, besteht hier noch viel Forschungspotenzial.

Entgegen der Theorie, dass es im Alpenraum während der letzten Eiszeit ausschließlich Kargletscher, Talgletscher und in Kombination eben ein Eisstromnetz – also dem Relief untergeordnete Vergletscherung – gegeben hat, wird behauptet und belegt, dass es lokal auch dem gegebenen Relief übergeordnete Vergletscherung gegeben hat. Dem Relief übergeordnete Vergletscherung bedeutet, dass das Relief vollkommen vom Eis verhüllt wird und Form und Fließrichtung des Eises von der Eisdynamik selbst bestimmt werden (EMBLETON-HAMANN 2007: 70). Ein Gletscher folgt demnach nicht unbedingt einer Talstruktur, sondern kann beispielsweise Pässe überfließen (= Transfluenzpass) – also auch hangaufwärts fließen – oder bei großer Eismächtigkeit (etwa in Form einer Eiskappe) selbstbestimmt in alle Richtungen abfließen (= Eisdom) (vgl. AHNERT 2009). EMBLETON-HAMANN (2007: 71) definiert Eisdomen als "flach-konvexe" Eismassen, von welchen das Eis "radial nach außen abfließt".

Da man in der aktuellen Literatur kaum Forschungsergebnisse zu eiszeitlichen Eisdomen in den Alpen findet, sondern hauptsächlich zu solchen in Großbritannien, Skandinavien (inklusive Grönland) oder Nordamerika (vor allem Kanada), soll die vorliegende Arbeit diese Thematik näher betrachten. Als Forschungsmethode wurde dafür die GIS-basierte Kartierung gewählt, da geographische Informationssysteme (GIS) in bisherigen Studien hauptsächlich zur Verortung und Darstellung der Ergebnisse herangezogen wurden (siehe zum Beispiel KELLY et al. 2004), obwohl das Potenzial und die Analysemöglichkeiten von

Fernerkundungsdaten mithilfe von GIS mittlerweile weit darüber hinausreichen. *GIS-basierte Kartierung* steht in dieser Arbeit als Synonym für die Kartierung durch Interpretation eines hochaufgelösten Laserscan-Geländemodells und dessen Derivate mittels GIS (vgl. ZUAN 2008). Die Wahl des Untersuchungsgebietes ist auf SEGUINOT et al. (2018) zurückzuführen, welche im Diskussionspapier ihrer Publikation *Modelling last glacial cycle ice dynamics in the Alps* – basierend auf den durchgeführten Modellierungen – davon ausgehen, dass es in den Ötztaler Alpen während der letzten Eiszeit einen Eisdom gegeben hat.

Ziel dieser Masterarbeit, welche vor der Publikation des eben genannten Artikels begonnen wurde, ist also, diesen in den Ötztaler Alpen postulierten eiszeitlichen Eisdom mithilfe von GIS-basierter Kartierung ausgewählter glazialer Geländeformen zu suchen beziehungsweise zu finden und dabei prinzipiell die Eignung der Forschungsmethode für diese Fragestellung zu überprüfen.

Die Forschungsfrage lautet demnach:

- Kann der in den Ötztaler Alpen postulierte eiszeitliche Eisdom mithilfe von GIS-basierter Kartierung von ausgewählten glazialen Geländeformen gefunden bzw. bestätigt werden?

Im Folgenden werden für die vorliegende Arbeit wichtige Begriffe definiert:

- **Eisdome** sind „flach-konvexe“ Eismassen, von welchen das Eis „radial nach außen abfließt“ (EMBLETON-HAMANN 2007: 71). Ein Eisdom ist „der zentrale Bereich einer Eiskappe oder eines Eisschildes“ (GOUDIE 2008: 115). Eiskappen zählen zu den nicht talförmigen Gletschertypen und überdecken kuppelförmig das unterliegende Relief (ebd.).
- **„Digitale Geländemodelle** (DGMs) sind numerische Beschreibungen der Erdoberfläche (Topographie) [...]. Um Geländemodelle zu erzeugen, werden Punktinformationen zu den Koordinaten (x, y) und der Höhe (z) mittels Rasterzellen- oder TIN-Format zu einer Oberfläche interpoliert“ (EMBLETON-HAMANN et al. 2013: 40f.). Daten für DGMs können unter anderem durch Fernerkundungsmethoden wie etwa Laserscanning erzeugt werden (ebd.). Im Gegensatz zu digitalen Oberflächenmodellen bilden digitale Geländemodelle das Relief ohne Bebauung und Bewaldung ab – diese werden in einem vorhergehenden Arbeitsschritt weggerechnet (gefiltert) (siehe SITHOLE & VOSSelman 2004, PFEIFER & MANDLBURGER 2009).
- **Laserscanning:** „Instrumente senden Laserpulse aus und erfassen Reflexion, aufgrund Laufzeit, Lichtgeschwindigkeit und Streuung wird 3-D-Information (Punktwolke) berechnet. Kombiniert mit GPS können hochaufgelöste digitale Gelände- und Oberflächenmodelle erstellt werden“ (EMBLETON-HAMANN et al. 2013: 42).

- Das **Würm-Hochglazial** bezeichnet den Höhepunkt der letzten Eiszeit vor 26.000 bis 20.000 Jahren (SCHUSTER et al. 2013: 67).
- **Schliffgrenzen** sind jene Grenzbereiche, an denen durch Detersion (Gletscherschliff) „insgesamt geglättet wirkendes Gelände“ in „rau und kantig beschaffene Felshänge“ übergeht (EMBLETON-HAMANN 2007: 78).
- Als **Schlifflinien** werden in dieser Arbeit Gletscherschrammen und Grundmoränen bezeichnet. Die Orientierung von Gletscherschrammen im anstehenden Gestein lässt nach dem Zurückziehen der Gletscher die Richtung der ehemaligen Eisbewegung erkennen (AHNERT 2009: 308). Grundmoränen in direkter Nähe der rezenten Gletscherzunge beziehungsweise im oberen Nährgebiet weisen häufig linienhafte Ablagerungsmuster auf, welche beim Abschmelzen des Gletschers sichtbar werden und – wenn sie nicht mehr überprägt werden – ebenfalls die Richtung der ehemaligen Eisbewegung anzeigen (vgl. EMBLETON-HAMANN 2007: 81; siehe Abbildung 14 und Abbildung 15 in Kapitel 5).
- **GIS-basierte Kartierung** steht in dieser Arbeit als Synonym für die Kartierung durch Interpretation eines hochaufgelösten Laserscan-Geländemodells und dessen Derivate mittels GIS (vgl. ZUAN 2008). „GIS ist ein ideales Werkzeug, um geomorphologische Formen zu untersuchen, [...] geomorphologische Muster festzustellen [...] [und] die Topographie zu visualisieren [...]“ (EMBLETON-HAMANN et al. 2013: 54).

Im Folgenden werden nun die verwendeten Methoden und Daten vorgestellt, ehe ein Einblick ins Untersuchungsgebiet gegeben wird. Dieser beinhaltet die Erläuterung der geographische Lage und der Landnutzung des Gebietes, der Vegetation und des Regionalklimas sowie der Geologie und der Geomorphologie. Die Einführung in das Untersuchungsgebiet dient zum besseren Verständnis der lokalen Gegebenheiten und soll die Interpretation der anschließend dargestellten Ergebnisse erleichtern. Abschließend werden im Zuge der Diskussion die Methoden, Daten und Ergebnisse der Arbeit kritisch hinterfragt, sowie Schlussfolgerungen und Zukunftsperspektiven behandelt.

## 2. Methoden

Als Methode zur Untersuchung der Forschungsfragen und Arbeitshypothesen wurde die GIS-basierte Kartierung gewählt, da GIS in bisherigen Studien hauptsächlich zur Verortung und Darstellung der Ergebnisse herangezogen wurde, jedoch nicht zur Analyse von Fernerkundungsdaten. Im Zuge dieser Arbeit wird folglich die Eignung der Methode für spezielle analytische Zwecke geprüft. GIS-basierte Kartierung steht in dieser Arbeit als Synonym für die Kartierung durch visuelle Interpretation eines hochauflösten Laserscan-Geländemodells und dessen Derivate mittels GIS und wird in Folge Einfachheit halber nur noch als Kartierung bezeichnet (vgl. ZUAN 2008). Die Methode hat im Allgemeinen den Vorteil, große Gebiete in vergleichsweise kurzer Zeit zu untersuchen (vgl. EMBLETON-HAMANN et al. 2013: 54). Sie kann desweiteren wetterunabhängig durchgeführt werden, was vor allem für Untersuchungsgebiete im Hochgebirge einen wichtigen Vorteil bringt. Unwegsames Gelände kann mithilfe der Methode ebenfalls schneller und einfacher ergründet werden als bei der Feldbegehung (ebd.).

Da eine qualitativ hochwertige Datengrundlage die Grundvoraussetzung für die gewählte Methode ist, wurde zu Beginn der Forschung geprüft, ob diese für das Untersuchungsgebiet vorhanden und zugänglich ist. Nach Erhalt der Daten, welche in Kapitel 3 näher beschrieben werden, wurden diese in das Computer-Programm ArcMap (Version 10.6) – eine GIS-Software der Firma Esri<sup>[1]</sup> – eingelesen und bearbeitet. Im ersten Bearbeitungsschritt wurden die räumlichen Bezugssysteme der unterschiedlichen Datensätze angepasst um eine genaue Verortung und einen korrekten visuellen Vergleich der Geodaten zu gewährleisten. Als Standard Bezugssystem für diese Arbeit diente jenes der geologischen Karte, da diese bei der Anpassung auf ein anderes Bezugssystem am meisten verzerrt und beeinträchtigt worden wäre. Die anschließend genau übereinander liegenden Datensätze der gewählten Kartengrundlagen konnten durch Aktivieren beziehungsweise Deaktivieren im Programm eingeblendet oder ausgeblendet und somit visuell korrekt verglichen werden. Desweiteren wurde zur besseren Übersichtlichkeit ein ebenfalls maßstabsgetreuer Raster (fishnet) mit einer Auflösung von 500 mal 500 Metern generiert und über das Untersuchungsgebiet gelegt. Die Kartierung erfolgte anschließend Rasterabschnitt für Rasterabschnitt bei einem gewählten standardisierten Maßstab von 1:4000. Der standardisierte Maßstab, welcher aufgrund der Daten- und Bildschirmauflösung so festgesetzt wurde, gewährleistet eine möglichst einheitliche Kartierung aller Rasterabschnitte über das gesamte Untersuchungsgebiet. Bei Bedarf wurde der Maßstab während der Kartierung vorübergehend geändert – etwa wenn Geländeformen über den Rasterabschnitt hinausreichten oder um einen Gesamtüberblick beispielsweise über ein ganzes Tal zu erhalten. Kartiert wurden mithilfe eines Vergleichs der DGM-Derivate mit der geologischen Karte und dem Orthofoto folgende glaziale Geländeformen: Moränenwälle, Blockgletscher,

Rundhöcker und Schlifflinien. Die Schriffgrenzen sollen sich im Nachhinein vom Ergebnis der Kartierung ableiten lassen. Die Wahl der Datengrundlagen (DGM, geologische Karte und Orthofoto) wird im folgenden Kapitel begründet. Die genannten Geländeformen wurden ausgewählt um ehemals vergletscherte Gebiete so gut wie möglich von nicht vergletscherten Gebieten zu unterscheiden (Schliff versus Nunataker) und da sie Rückschlüsse auf die ehemalige Vergletscherung zulassen. Die Formen und ihre Lage beziehungsweise Ausrichtung geben Hinweise auf Fließrichtung und Begrenzung der Vergletscherung der letzten Jahrzehnte und – unter der Annahme, dass sich die rezenten Kar- und Talgletscher nach dem in der letzten Eiszeit geschaffenen Relief richten – auch auf jene der letzten Eiszeit. Moränenwälle und Schlifflinien lassen sowohl auf die Fließrichtung als auch auf die ehemalige Ausdehnung der Gletscher schließen (vgl. EMBLETON-HAMANN 2007). Rundhöcker konnten in die Kartierung (auflösungsbedingt) erst ab einer gewissen Größe aufgenommen werden, geben dann aber ebenfalls Hinweise auf die Fließrichtung ehemaliger Gletscher, da sie eine flach ansteigende Luv- und eine stark abfallende Leeseite aufweisen, welche speziell in der Hangneigungskarte (DGM-Derivat) sichtbar werden (vgl. ebd.). Blockgletscher sind in der vorliegenden Arbeit deshalb inkludiert, da sie häufig in alten Moränenzügen liegen beziehungsweise diese überlagern (vgl. AHNERT 2009). Natürlich muss berücksichtigt werden, dass in dem langen Zeitraum seit der Würm-Eiszeit auch zahlreiche andere Prozesse formgebend gewirkt haben wie etwa Sturz- und Rutschprozesse. Darüber hinaus hat auch der Mensch maßgeblich das Relief beeinflusst und geformt. Dies darf bei der Interpretation der heute sichtbaren gewählten geomorphologischen Formen nicht missachtet werden. Im Zuge der Kartierung wurden die zuvor erwähnten Formen im ArcMap als Linien- und Flächenobjekte eingezeichnet und in Bezug auf die Forschungsfragen betrachtet und interpretiert. Die Ergebnisse der Kartierung wurden anschließend in Kartenform dargestellt (siehe Kapitel 5) und in den aktuellen wissenschaftlichen Kontext eingebettet. Der aktuelle Forschungsstand wurde mittels online-Literaturrecherche ermittelt, wobei in verschiedensten Literaturdatenbanken (ScienceDirect<sup>[2]</sup>, Wiley Online Library<sup>[3]</sup>, ResearchGate<sup>[4]</sup>, Google Scholar<sup>[5]</sup>, Online-Bibliothek der Universität Wien<sup>[6]</sup>, Online-Bibliothek der Universität Innsbruck<sup>[7]</sup>) die Suchwörter *ice dome*, *Eisdom*, *Ötztal*, *alps*, *Alpen*, *Würm ice age*, *Würm Eiszeit*, *geomorphology* und *Geomorphologie* verwendet wurden und mithilfe der Literaturverzeichnisse der gefundenen Werke weitergesucht wurde.

### 3. Daten

Zur Kartierung wurden, wie zuvor erwähnt, ein digitales Geländemodell (DGM), ein Orthofoto sowie eine geologische Karte des Untersuchungsgebietes herangezogen. Die Daten für das DGM wurden von der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) zur Verfügung gestellt, und daraus eine Schummerungskarte und eine Hangneigungskarte abgeleitet. Diese Derivate kamen für die eigentlichen Vergleiche der Datensätze in ArcMap zur Verwendung. Das DGM stand in einer Bodenauflösung von einem mal einem Meter zur Verfügung. Die Grunddaten – also dreidimensionale, klassifizierte Punktwolken – für das DGM wurden mit einem luftgestützten Laserscanner (LIDAR, Airborne Laserscanning) durch Befliegungen im Zeitraum von 2006 bis 2008 (für den Bereich des Untersuchungsgebietes) im Auftrag des Landes Tirol aufgenommen und im Jahr 2010 aktualisiert (Land Tirol<sup>[8]</sup>; siehe HÖFLE & RUTZINGER 2011). Die Befliegung sowie die Datenprozessierung wurden von der Firma BSF Swissphoto AG durchgeführt (Land Tirol<sup>[8]</sup>). Das verwendete Orthofoto liegt in einer Auflösung von 20 mal 20 Zentimetern vor, wurde vom Untersuchungsgebiet im Jahr 2015 aufgenommen und wird als Open Government Data (OGD<sup>[9]</sup>) via WMS-Server vom Land Tirol<sup>[8]</sup> frei zur Verfügung gestellt. Die verwendete geologische Karte ist über den WMS Server GEOFAST der Geologischen Bundesanstalt<sup>[10]</sup> (GBA) ebenfalls kostenlos verfügbar. Es handelt sich hierbei um digitalisierte geologische Karten auf Basis des ursprünglichen Kartenmaßstabs 1:50.000, welche georeferenziert und nahtlos zusammengesetzt wurden. Die in dieser Arbeit verwendeten Karten wurden im Jahr 2016 herausgegeben beziehungsweise veröffentlicht. Die Eigenschaften der Datengrundlagen sind in Tabelle 1 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 1: Überblick über die Datengrundlagen und deren Eigenschaften.

	Auflösung	Maßstab	Aufnahmedatum	Quelle
DGM	1x1 Meter	-	2006 bis 2008, 2010 aktualisiert	Land Tirol
Orthofoto	20x20 Zentimeter	-	2015	Land Tirol
Geologische Karte	-	1:50.000 (Kartengrundlage)	2016 (Herausgabjahr)	GBA

Die verwendeten Datengrundlagen wurden so gewählt, da mit ihrer Hilfe die ausgewählten (zu kartierenden) geomorphologischen Formen vergleichsweise einfach zu finden sind. Die Schummerungskarte des DGM zeigt das Relief ohne Bebauung und Bewaldung und daher auch Geländeformen, die in bewaldeten Gebieten auf anderen Luftaufnahmen entweder gar

nicht oder nur schwer erkennbar sind (siehe Abbildung 6 in Kapitel 5). Da die Berghänge im Untersuchungsgebiet unterschiedlich disponiert sind, wurden aus dem DGM vier Schummerungskarten mit einer jeweils anderen Beleuchtungsrichtung (Azimut: 45°, 135°, 225° und 315°; Sonnenhöhe: 45°) erstellt um jeden Bereich des Untersuchungsgebietes gut sichtbar zu machen (siehe Abbildung 23 in Kapitel 5). Die Hangneigungskarte zeigt – wie im Namen schon enthalten – die Hangneigung an, wobei bei gestreckter Symbolisierung mit Farbverlauf geringe Neigungen grünlich und starke Neigungen rötlich angezeigt werden (siehe Abbildung 9 in Kapitel 5). Dies hilft dabei, die gefundenen Formen noch deutlicher zu analysieren, etwa um die Luv- und Leeseite von Rundhöckern eindeutig zu unterscheiden. Die geologische Karte beinhaltet neben Informationen zur Geologie auch Geländeformen wie Moränen, Blockgletscher, tektonische Störungslinien oder allgemein Störungslinien (siehe Abbildung 8 in Kapitel 5). Beim Vergleich der Schummerungskarten mit der geologischen Karte können also beispielsweise anhand des DGMs so interpretierte Moränenwälle eindeutig bestätigt werden sowie auch Informationen zum geomorphologischen Entwicklungspotential des anstehenden Gesteins abgeleitet werden. Das Orthofoto diente dazu, bei verbleibenden Unsicherheiten die gefundenen Formen noch genauer kontrollieren und interpretieren zu können, was vor allem durch die höhere Auflösung und die Echtfarben des Orthofotos möglich war (siehe Abbildung 7 in Kapitel 5).

Um das Untersuchungsgebiet richtig kennenzulernen und einzuschätzen bedarf es allerdings auch weiterer Hintergrundinformationen, welche daher im folgenden Kapitel näher vorgestellt werden.

## **4. Einführung in das Untersuchungsgebiet**

Das Untersuchungsgebiet wurde gewählt, da SEGUINOT et al. (2018) in den Öztaler Alpen einen eiszeitlichen (heute verschwundenen) Eisdome postulieren, welcher im Zuge der vorliegenden Arbeit gesucht werden sollte.

Die genaue Abgrenzung des Untersuchungsgebietes richtet sich nach den Grenzen der erhaltenen DGM-Daten. Es ist im Norden durch eine in West-Ost-Richtung verlaufende Gerade etwa auf der Höhe von Sölden begrenzt, im Westen und Osten jeweils durch eine in Nord-Süd-Richtung verlaufende Gerade – zum einen westlich des Gepatschstausees und zum anderen östlich des Gurgler Tales. Im Südwesten, Süden und Südosten folgt die Grenze des Untersuchungsgebietes der österreichisch-italienischen Staatsgrenze. Die Abgrenzung wird in Abbildung 2 kartographisch dargestellt. Das Untersuchungsgebiet hat eine Fläche von rund 560 Quadratkilometern und wird im Folgenden etwas genauer vorgestellt um einen besseren Einblick in die Gegebenheiten zu erhalten. Nach einer kurzen Beschreibung der geographischen Lage und der Landnutzung des Untersuchungsgebietes werden dessen Vegetation und das Regionalklima vorgestellt, gefolgt von der Erläuterung der Geologie und Geomorphologie des Gebietes.

### **4.1. Geographische Lage und Landnutzung**

Das Untersuchungsgebiet liegt im österreichischen Teil der Öztaler Alpen. Deren höchste Erhebung, und gleichzeitig auch jene des Untersuchungsgebietes, ist die Wildspitze mit einer Höhe von 3768 Metern über Adria. Die Haupttäler des Untersuchungsgebietes sind von West nach Ost gereiht das Kaunertal, das Pitztal und das Öztal mit seinen Oberläufen im Venter und Gurgler Tal. Die großen Täler verlaufen in Süd-Nord-Richtung und entwässern im Norden in den Inn. Das Untersuchungsgebiet umfasst allerdings nur einen geringen Anteil der genannten Haupttäler, beinhaltet mit den großen Gletschern in ihren Quellgebieten jedoch einen wichtigen Teil der hydrologischen Einzugsgebiete.

In Abbildung 1 wird die Lage des Untersuchungsgebietes (rot abgegrenzt) in Österreich dargestellt. Die topographische Grundkarte lässt auch die Verortung in den zentralen Ostalpen erkennen. Abbildung 2 zeigt ebenfalls die Außengrenze des Untersuchungsgebietes auf einer Grundkarte, allerdings mit größerem Kartenmaßstab. Der Gepatschstausee im Nord-Westen, die Oberläufe der Haupttäler sowie die österreichisch-italienische Grenze sind gut erkennbar. Ebenfalls deutlich wird, dass das Untersuchungsgebiet entlang der Staatsgrenze einen schmalen Streifen des italienischen Staatsgebietes inkludiert.

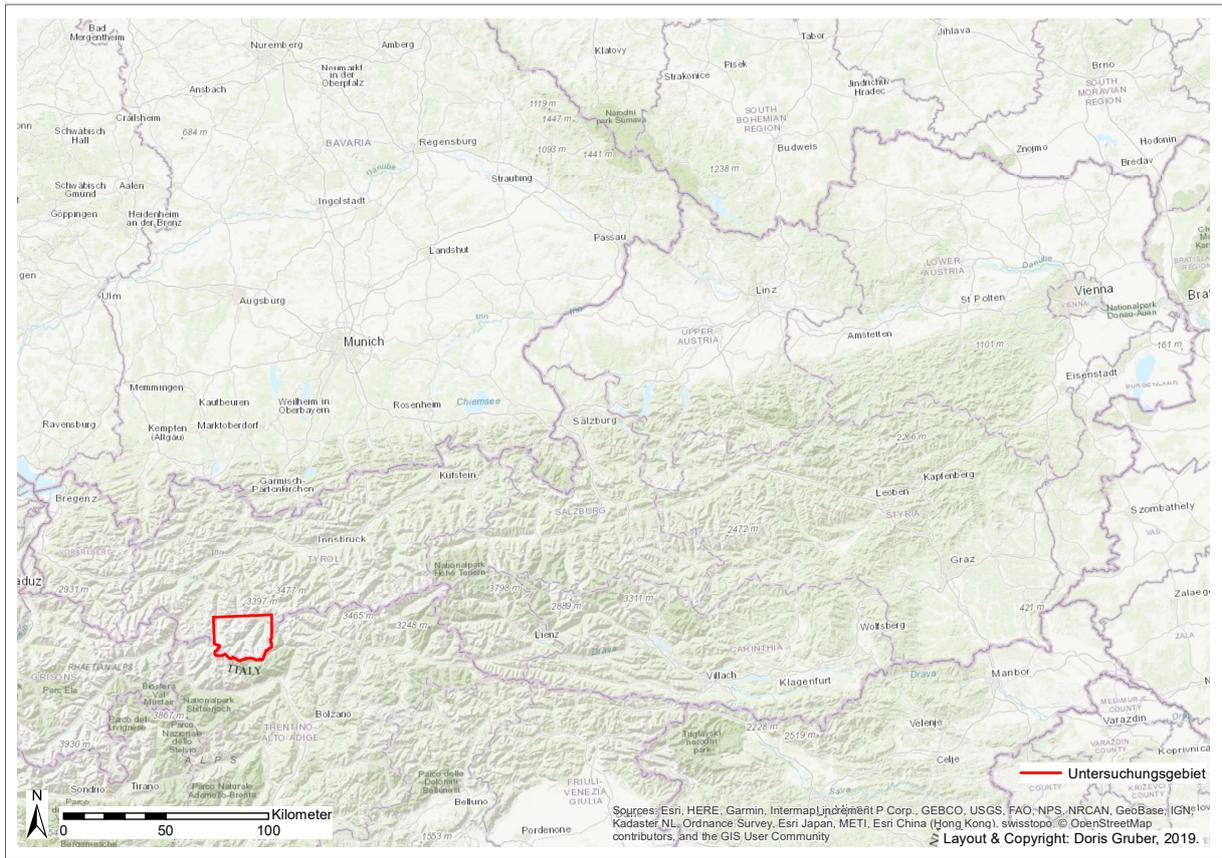


Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebietes (rot abgegrenzt) in Österreich.

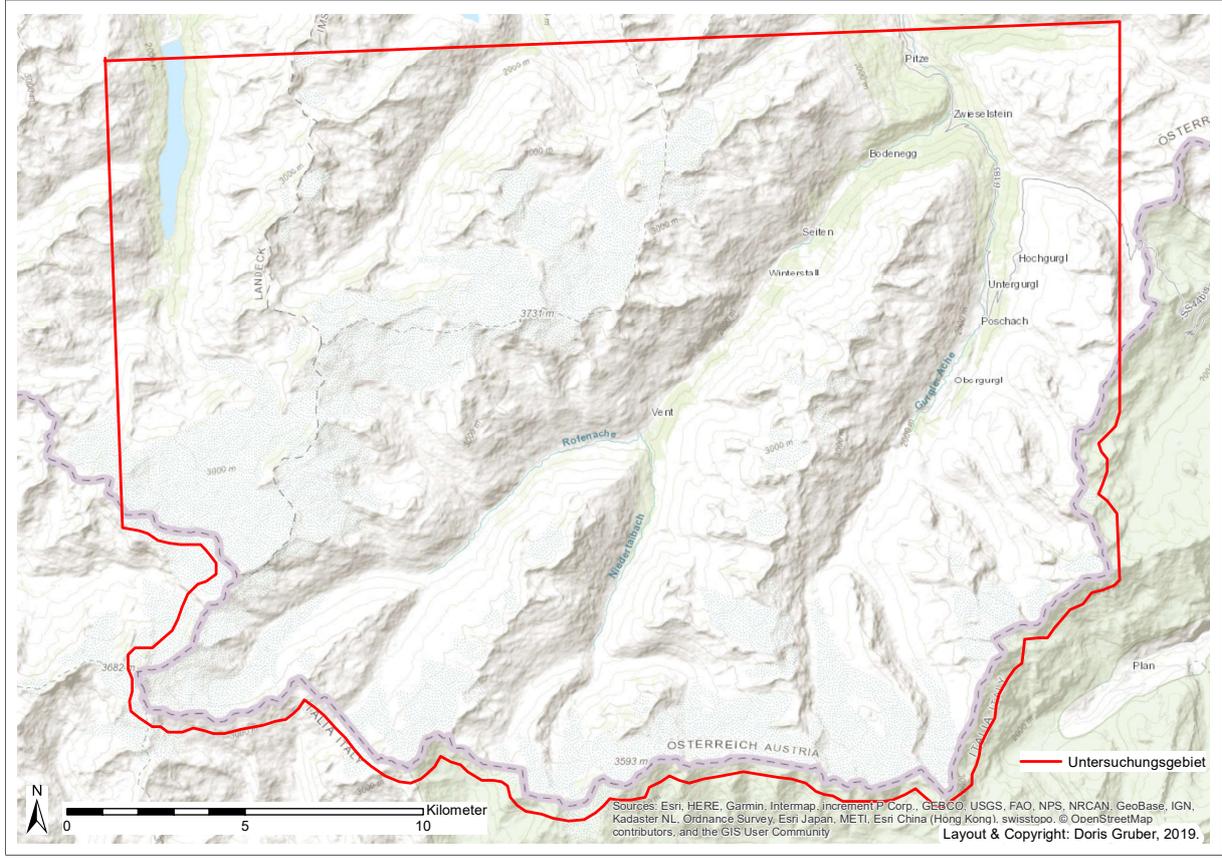


Abbildung 2: Lage des Untersuchungsgebietes (rot abgegrenzt) in den Ötztaler Alpen.

Die Ötztaler Alpen sind stark vergletschert und stellen somit einen wichtigen natürlichen Süßwasserspeicher dar (vgl. KRAINER 2010). Dies gilt generell für den gesamten Alpenraum, welchen VEIT (2002: 73) daher als „Wasserschloss Europas“ bezeichnet. Wesentlich für den Wasserreichtum der Alpen sind neben der Speicherkapazität von Gletschern auch jene von Schnee, Permafrost und Seen sowie höhere Niederschläge und geringere Evapotranspiration mit zunehmender Seehöhe (ebd.). „Der Gebietsabfluss in den Alpen beträgt durchschnittlich mehr als 50 bis 60 l/s/km<sup>2</sup>, im Vergleich zu 10 l/s/km<sup>2</sup> im Vorland“ (ebd.). Genutzt wird das Wasser als Trinkwasser, Bewässerungswasser und zur Gewinnung von Energie (ebd.). Bezüglich Energiegewinnung mittels Wasserkraft ist im Untersuchungsgebiet der Gepatschstausee im Kaunertal hervorzuheben. Dieser wurde zur Errichtung eines Pumpspeicherkraftwerkes künstlich aufgestaut und ist seit der Fertigstellung des Dammes im Jahr 1964 in Betrieb (TIWAG<sup>[11]</sup>).

Weitere anthropogene Nutzungen des Untersuchungsgebietes sind Tourismus (Winter- und Sommertourismus), Berglandwirtschaft (Acker-Alp-Betriebe und Wiesen-Alp-Betriebe) und in tieferen Höhenlagen Forstwirtschaft sowie die Nutzung als Siedlungsraum (vgl. MAYER et al. 2012, siehe VEIT 2002).

Das Gebiet wurde und wird folglich nachhaltig anthropogen überprägt, was beim Kartieren berücksichtigt werden musste. Weniger Rücksicht musste diesbezüglich auf die Vegetation genommen werden, wie in Kapitel 4.2. erläutert wird.

## 4.2. Vegetation und Klima

Das Untersuchungsgebiet breitet sich – anhand der Höhenlage bestimmt – in aufsteigender Reihenfolge über die thermischen Höhenstufen *montan*, *subalpin*, *alpin*, *subnival* und *nival* aus (PFADENHAUER & KLÖTZLI 2014: 74f, VEIT 2002: 158ff). Dementsprechend lassen sich Vegetation und Klima klassifizieren, denn mit der vertikalen Änderung von Niederschlag und Temperatur (Gradienten) geht auch eine vertikale Abfolge der Vegetationstypen einher (Vegetations-Höhenstufen) (vgl. VEIT 2002).

Die *montane* Höhenstufe definieren PFADENHAUER & KLÖTZLI (2014) nach SCHROEDER (1998) durch deutlich niedrigere Temperaturen und höheren Niederschlag als in darunter gelegenen Höhenstufen und durch eine stärker ausgeprägte Reliefenergie. Die Obergrenze der montanen Höhenstufe bildet die Waldgrenze (geschlossener Wald) (vgl. VEIT 2002). „Die Definition der *subalpinen* Höhenstufe ist uneinheitlich. Was in den Alpen teilweise als subalpiner Nadelwald bezeichnet wird, ist international häufig die hochmontane Stufe [...]“ oder die „[...] Übergangszone zwischen montaner und alpiner Höhenstufe [...]“ (ebd.: 164).

VEIT (2002: 164) definiert „[...] die subalpine Höhenstufe als der Bereich aufgelockerter Baumbestände und des Krummholzes zwischen Waldgrenze und Baumgrenze [...]“. Als *alpin* bezeichnet man Gebiete oberhalb der Baumgrenze (Baumgruppen) bis zur Rasengrenze (geschlossener Rasen) (ebd.) oder bis zum Beginn der permanenten Schneedecke (vgl. PFADENHAUER & KLÖTZLI 2014). Die *subnivale* Höhenstufe ist erneut eine Übergangszone und liegt zwischen beziehungsweise verbindet die alpine mit der nivalen Höhenstufe (vgl. VEIT 2002). Die *nivale* Höhenstufe ist schließlich die Zone der (zumindest stellenweise) permanenten Schneedecke, also jene über der klimatischen Schneegrenze (vgl. PFADENHAUER & KLÖTZLI 2014, VEIT 2002).

Hochgebirge sind prinzipiell reich an Vegetationstypen und Arten, da sie eine Vielzahl an unterschiedlichen Standortbedingungen auf kleinem Raum aufweisen, wie zum Beispiel sonn- und schattenseitige Hänge, tiefe und hohe Lagen (Niederschlags- und Temperaturgradient), unterschiedliche Böden, Stauregen- und Föhnlagen (vgl. PFADENHAUER & KLÖTZLI 2014). Die Artenzahl nimmt mit zunehmender Seehöhe aufgrund der schwierigeren Lebensbedingungen allerdings ab (vgl. VEIT 2002).

Der Hauptteil des Untersuchungsgebietes liegt oberhalb der montanen, große Teile sogar oberhalb der subalpinen Höhenstufe. Dies ist vor allem für die gewählte Forschungsmethode relevant, da die tatsächliche Geländeoberfläche somit kaum von Waldgebieten oder Baumgruppen überdeckt wird. Dominante Pflanzengruppen sind stattdessen Krummhölzer, Zwergsträucher, Krautige Pflanzen, Gräser und Grasartige Pflanzen (alpine Rasen), Polsterpflanzen, Rosettenpflanzen, Blütenpflanzen, Moose und Flechten (vgl. GÄRTNER & HOFBAUER 2012, MAYER & ERSCHBAMER 2012, MAYER et al. 2012, NAGL & ERSCHBAMER 2010, VEIT 2002).

PFADENHAUER & KLÖTZLI (2014: 454) fassen die Vegetation der Ötztaler Alpen nach ELLENBERG (1963) schematisch in folgende Stufen zusammen (in aufsteigender Reihenfolge): *nemoraler Koniferenwald, dunkle Gebirgsstaiga, Krummholz, Wiesentundra und Hochgebirgssteppen, nivale Stufe*.

In Teilen des Untersuchungsgebietes – etwa im Rotmoostal nahe Obergurgl – haben sich außerdem Moore entwickelt und weisen eine dementsprechende Vegetation auf (vgl. BORTENSCHLAGER 2010).

Klimatisch gesehen liegt das Untersuchungsgebiet im gemäßigten mitteleuropäischen Klimaraum, ist jedoch durch die inneralpine Höhenlage geprägt und weist dementsprechend geringe Temperaturen sowie im Vergleich zu den Alpenrändern geringe Niederschlagsmengen auf (vgl. FISCHER 2010, VEIT 2002). Die Topographie bedingt neben dem vertikalen Temperatur- und Niederschlagsgradienten (Temperaturabnahme und Niederschlagszunahme mit der Höhe) außerdem Staulagen bzw. Luv-Lee-Windsysteme

(geprägt durch Südföhn) und – aufgrund der Relief- und Expositionsunterschiede – unterschiedliche Strahlungsbilanzen (siehe FISCHER 2010, SCHÖNWIESE 2008, VEIT 2002). Die unterschiedlichen Strahlungsbilanzen bedingen wiederum Hangwindssysteme, Berg-Tal-Windsysteme und auf kleiner Skala sogar Gletscherwinde (siehe FISCHER 2010, SCHÖNWIESE 2008). Das Untersuchungsgebiet weist – typisch für (Hoch-) Gebirgsregionen – dementsprechend zahlreiche verschiedene Standortbedingungen auf relativ kleinem Raum auf (Mikroklima) (vgl. HARTL et al. 2013). Die in Folge vorgestellten Werte und Diagramme müssen daher mit Vorsicht betrachtet werden, da sie lediglich die Faktoren der spezifischen Standorte wiedergeben und nicht allgemein für das ganze Untersuchungsgebiet gelten. Speziell die Niederschlagsmengen können aufgrund der Staulagen lokal stark variieren. Wenn man dies berücksichtigt, kann man aber dennoch einen guten Eindruck über das Klima des Untersuchungsgebietes erhalten.

Vorgestellt werden Jahresmitteltemperaturen der Station Obergurgl-Vent und Jahresniederschlagssummen der Station Sölden-Kaisers, welche beide im Untersuchungsgebiet liegen und über relativ lange Zeiträume lückenlose Datenreihen liefern. Die Messstation Obergurgl-Vent gehört zum Messnetz der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und befindet sich in Obergurgl auf einer Höhe von 1938 Metern über Adria. Die Messstation Sölden-Kaisers wird vom Hydrographischen Dienst Tirols betrieben und ist auf einer Höhe von 1323 Metern über Adria stationiert.

Die gemittelte Jahresmitteltemperatur (gemessen in Obergurgl-Vent) betrug im Zeitraum von 1959 bis 1988 1,46°C und im Zeitraum von 1989 bis 2018 2,57°C (HISTALP, ZAMG<sup>[12]</sup>). Im Jahr 2018 betrug die Jahresmitteltemperatur in Obergurgl-Vent 3,5°C (ebd.). Abbildung 3 zeigt die in Obergurgl-Vent gemessenen Jahresmitteltemperaturen im Zeitraum von 1851 bis 2018. Sowohl die gemittelten Jahresmitteltemperaturen als auch das Diagramm zeigen einen Anstieg der Jahresmitteltemperaturen im Untersuchungsgebiet.

Die mittlere Jahresniederschlagssumme (gemessen in Sölden-Kaisers) betrug im Zeitraum von 1971 bis 2015 773,6 mm (eHYD<sup>[13]</sup>). Die vergleichsweise geringe Niederschlagssumme ist wie bereits oben erwähnt durch die inneralpine (Regenschatten-)Lage des Messstandpunktes bedingt (vgl. FISCHER 2010). Abbildung 4 zeigt die einzelnen Jahresniederschlagssummen der Messstation Sölden-Kaisers im Zeitraum von 1971 bis 2015.

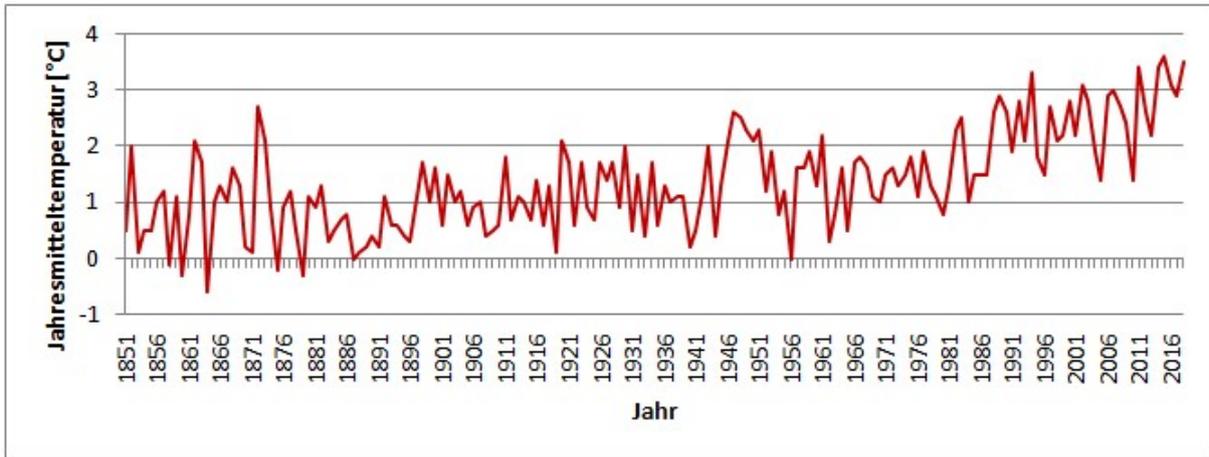


Abbildung 3: Jahresmitteltemperaturen in °C im Zeitraum von 1851 bis 2018 der Messstation Obergurgl-Vent (Datenquelle: HISTALP, ZAMG).

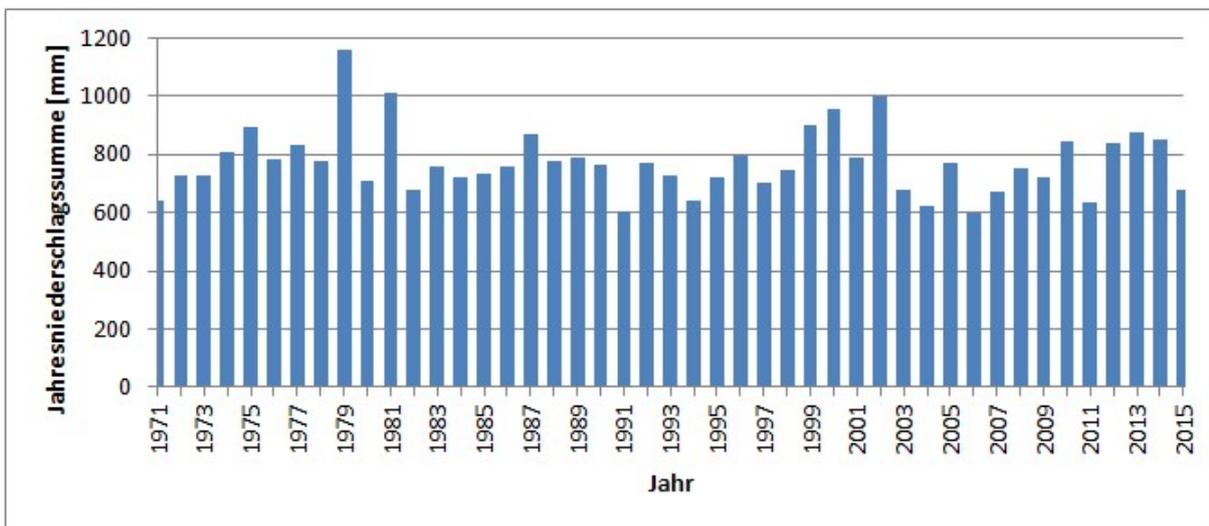


Abbildung 4: Jahresniederschlagssummen in mm im Zeitraum von 1971 bis 2015 der Messstation Sölden-Kaisers (Datenquelle: eHYD).

Den Jahrgang von Temperatur und Niederschlag in Obergurgl beschreibt FISCHER (2010: 59) folgendermaßen: „In Obergurgl tritt das Minimum der Temperatur im Mittel im Jänner auf, das Maximum im Juli [...]. Das Maximum des Niederschlags liegt im Sommer. [...] Dabei fällt auf, dass in Obergurgl in allen Sommermonaten mit einer Schneedecke zu rechnen ist und die Wahrscheinlichkeit für eine Schneedecke immer Anfang Juni noch höher ist als im September. [...] Mitte Oktober steigt die Wahrscheinlichkeit einer geschlossenen Schneedecke sehr stark an. Im Mai schmilzt der Schnee, die Wahrscheinlichkeit sinkt auf Werte unter 15 % ab.“

Betrachtet man die Klimageschichte – und hier vor allem das Pleistozän sowie das Holozän – des Untersuchungsgebietes, so zeigt sich ein Wechsel von Kalt- und Warmzeiten (vgl. KRÄINER

2010, VEIT 2002). In den Kaltzeiten (Glazialen) reichten die alpinen Gletscher, zusammengewachsen zu Eisstromnetzen, wiederholt bis ins Alpenvorland (Eiszeiten), in den Warmzeiten (Interglazialen) schmolzen sie „[...] auf heutige Größenordnungen oder teils sogar noch stärker zurück“ (VEIT 2002: 238). In den Alpen wurden mindestens vier Eiszeiten belegt, welche durch PENCK & BRÜCKNER (1901/1909) erstmals erforscht und – nach Flüssen im bayerisch-schwäbischen Alpenvorland – Günz, Mindel, Riss und Würm benannt wurden (vgl. VEIT 2002). „Die Grundlage der Quartärgliederung in den Alpen ist die ‚Glaziale Serie‘ von PENCK & BRÜCKNER (1901/1909), d.h. die morphostratigraphische Verbindung von Endmoränen mit glazifluvialen Terrassen und Taleintiefungen im Gebiet von Memmingen im deutschen Alpenvorland“ (VEIT 2002: 241). Es gibt allerdings Diskussionen und zahlreiche regionale Ergänzungen und Abwandlungen der klassischen vier Eiszeiten, da es sich eher um „Eiszeitenkomplexe“ gehandelt haben soll, also um „[...] Perioden, die jeweils in mehrere eigenständige Eis- und Warmzeiten zu untergliedern sind“ (ebd.: 243; siehe z.B. EBERL 1930, SCHAEFER 1957, SCHAEFER 1965, SCHREINER & EBEL 1981). Die maximalen Eishöhen sind dagegen anhand von Gletscherschliff und mit Hilfe von Findlingen eindeutiger festzustellen und lagen in den Zentralalpen bei bis zu 2.800 Metern über Adria, was bedeutet, dass viele Täler (relativ zum heutigen Talboden) Eismächtigkeiten von 1.000 bis 1.700 Metern aufwiesen (vgl. VEIT 2002). „Fraglich ist allerdings in der Regel, aus welcher Kaltzeit die festgestellten Eishöhen [...] stammen“ (ebd.: 241). Am besten erforscht ist im Alpenraum die letzte große Eiszeit, also die Würm-Eiszeit. Die Gletscherfläche in der Würm-Eiszeit betrug laut VEIT (2002) 126.000 km<sup>2</sup>, verglichen mit der Gletscherfläche von 3.000 km<sup>2</sup> im Jahr 2002. Mit dem Ende des Hochwürms setzte im Untersuchungsgebiet das alpine Spätglazial ein. „Schon kurz nach dem Gletscherhochstand des Hochglazials schmolzen die Eismassen zurück, und um 14.500 <sup>14</sup>C-Jahre v.h. erfolgte ein massiver Zerfall des alpinen Eisstromnetzes, wodurch das nördliche und das südliche Alpenvorland eisfrei wurden“ (VEIT 2002: 248). Der Gletscherrückgang im Spätglazial verlief jedoch nicht kontinuierlich, sondern wies mehrere Abschnitte auf: Wiederholte Kaltphasen bewirkten, dass die Gletscherströme erneut vorstießen und dabei die sogenannten *Stadiale* bildeten; Zwischenzeitliche Warmphasen, sogenannte *Interstadiale*, ließen das nunmehr in einzelne Talgletscher zerfallende Eisstromnetz weiter ins Alpeninnere zurückschmelzen (vgl. MAISCH 1982). KERSCHNER (2009) unterteilt nach der vorliegenden Moränen-Stratigraphie in folgende Stadien: der Spätglaziale Eiszerfall, das Gschnitz-Stadium, das Senders-Stadium, das Daun-Stadium, das Egesen-Stadium und das Kartell-Stadium. Nach dem Spätglazial, also dem Ende des Pleistozäns, folgte das Holozän, also die heutige Warmzeit, welche im alpinen Raum auch oft als Postglazial bezeichnet wird (vgl. VEIT 2002). Dieses zeichnet sich erneut durch Klimaschwankungen aus, welche jedoch nicht so große Dimensionen annahmen wie jene im Spätglazial (ebd.). VEIT (2002) berichtet nach PATZELT (1977) von mindestens acht postglazialen Gletscherhochstandsphasen in den Ostalpen. Die letzten, neuzeitlichen

Hochstände traten ab Beginn der kleinen Eiszeit (1.600 n.Chr.) auf (vgl. VEIT 2002). Das Gletschermaximum am Ende der kleinen Eiszeit um 1850 war beziehungsweise ist auch gleichzeitig das Maximum des Holozäns (ebd.). Danach haben die Gletscher im Untersuchungsgebiet und darüber hinaus signifikant an Fläche und Volumen verloren (vgl. ABERMANN et al. 2013). In den 1870ern, 1920ern und 1980ern konnten noch kleine Vorstöße verzeichnet werden, seitdem kann allerdings eine Beschleunigung des Gletscherrückzugs beobachtet werden, welche auf positive Temperaturanomalien zurückgeführt wird (ebd.).

Nicht unwesentlich für die Klimarekonstruktion ist die Beschaffenheit beziehungsweise die Widerstandsfähigkeit der Geländeoberfläche, also auch des anstehenden Gesteins. Das Gestein bedingt außerdem in gewissen Maßen die Topographie, welche – wie bereits erwähnt – für die Vegetation und das Klima ausschlaggebend ist. Im folgenden Unterkapitel soll daher die Geologie des Untersuchungsgebietes vorgestellt werden.

### **4.3. Geologie**

Die Ötztaler Alpen zählen zu den Zentralen Ostalpen, welche generell von silikatischen Gesteinen wie Phylliten, Glimmerschiefern, Gneisen und Amphiboliten – also metamorphen Gesteinen – dominiert werden (vgl. SCHUSTER et al. 2013). Die Geschichte der Entstehung der Alpen kann ebd. nachgelesen werden. In den Ötztaler Alpen bilden vor allem Gneise, Glimmerschiefer und Amphibolite schroffe Gebirgskämme und Gipfel (ebd.). Diese metamorphen Gesteine gehören zu einem großen Teil dem sogenannten Ötztal-Stubai-Komplex an, einer tektonischen Deckeneinheit, welche als Teil des oberostalpinen Deckensystems aufgefasst wird (vgl. KRÄINER 2010). „Hauptgesteine des Ötztal-Stubai-Komplexes sind Biotit-Plagioklasgneis (Paragneis) und mineralreiche Glimmerschiefer. Vereinzelt sind geringmächtige Quarzite eingeschaltet. Lokal werden die Gesteine von Diabasgängen durchschlagen“ (ebd.: 35). Südlich des Ötztal-Stubai-Komplexes schließt der sogenannte Schneeberg Komplex an, der ebenfalls einen Bereich des Untersuchungsgebietes aufbaut (vgl. ebd.). „Hauptgesteine [dieses Komplexes] sind Metapelite und Metakarbonate, also metamorph überprägte tonige und kalkige Sedimente. Diese Sedimente stammen aus dem Altpaläozoikum bis Präkambrium und haben ursprünglich das Altkristallin des Ötztal-Stubai-Komplexes überlagert“ (ebd.: 34f).

Die metamorphen Gesteine sind unter den im Untersuchungsgebiet vorherrschenden Umweltbedingungen nicht so stark von chemischen Verwitterungsprozessen betroffen wie etwa Kalksteine es wären und somit für die in dieser Arbeit gewählte Forschungsmethode

besser geeignet, da etwa Schliiffspuren, wie zum Beispiel Gletscherschrammen, von lange verschwundenen Gletschern auf freiliegenden Gesteinsoberflächen auch heute noch sichtbar sind (siehe AHNERT 2009). Im Gegensatz dazu birgt die physikalische Verwitterung – vor allem die Frostverwitterung – im Untersuchungsgebiet größere Herausforderungen die Forschungsmethode betreffend, da physikalische Verwitterung zu gravitativen Massenbewegungen führen kann und auch sichtlich geführt hat, welche die Morphologie stark verändern können beziehungsweise bereits verändert haben (siehe AHNERT 2009, GOUDIE 2008). Gravitative Massenbewegungen wie Felsstürze und Rutschungen können für die Untersuchung relevante Geländeformen bis zur Unkenntlichkeit abtragen, verändern oder überlagern (siehe AHNERT 2009). Obwohl dies im Untersuchungsgebiet teils der Fall ist, ist der glaziale Formenschatz von älteren Vergletscherungen für die gewählte Forschungsmethode dennoch ausreichend gut erhalten, wie in Kapitel 5 ersichtlich ist.

Nachdem einige im Untersuchungsgebiet vorkommende Geländeformen, Prozesse und Materialien bereits kurz erwähnt beziehungsweise erklärt wurden, soll die Geomorphologie im folgenden Unterkapitel noch einmal etwas genauer beleuchtet werden um einen besseren Gesamtüberblick zu gewährleisten.

#### **4.4. Geomorphologie**

Wie aus den Unterkapiteln 4.1. bis 4.3. zu schließen ist, wurde das Relief des Untersuchungsgebietes neben endogenen, geologisch-tektonischen Vorgängen vor allem durch die Vergletscherung in den Eiszeiten und den ständigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten geformt beziehungsweise überprägt (vgl. VEIT 2002). Zusätzlich prägend wirkten exogene Prozesse wie Verwitterung und Massenverlagerungen im Spät- und Postglazial (ebd.). Das Gebiet weist daher eine hohe Reliefenergie mit schroffen Gipfeln, steilen Hängen und flachen Talböden auf.

Typische glaziale Erosionsformen, welche auch alle im Untersuchungsgebiet gefunden werden können, sind Trogtäler, Hängetäler, Kare, Schliiffspuren (Gletscherschliff) und Rundhöcker (vgl. VEIT 2002; siehe EMBLETON-HAMANN 2007). Glaziale Akkumulationsformen findet man im Untersuchungsgebiet in Form von Moränen (End-, Mittel-, Seiten-, Ufer- und Grundmoränen) (vgl. VEIT 2002; siehe EMBLETON-HAMANN 2007). Desweiteren stößt man im Untersuchungsgebiet auch auf periglaziale Formen und Prozesse sowie auf Permafrost (von sporadisch über kontinuierlich bis zu fossil) und auf zahlreiche Blockgletscher (aktiv, inaktiv und fossil) (vgl. VEIT 2002; siehe AHNERT 2009). Blockgletscher entwickeln sich nach AHNERT (2009: 107) aus „besonders mächtigen Schuttanhäufungen“ wie zum Beispiel großen

Schutthalden oder Moränen, was man auch beim Betrachten der Ergebnisse in Kapitel 5 erkennen kann. Die Schutthalden sind häufig Akkumulationsgebiete von gravitativen Massenbewegungen, welche in den Alpen unter anderem durch Frostwechsel, Tauwetterperioden, Starkniederschläge oder langanhaltende Niederschläge ausgelöst werden können (vgl. VEIT 2002).

Geomorphologische Formen erlauben, mit Betracht des Materials und seiner Eigenschaften, heute Rückschlüsse auf die Prozesse und Gegebenheiten der Vergangenheit zu ziehen und die ehemalige Vergletscherung nachzuvollziehen. Sie geben nicht nur Hinweise zu deren maximaler Ausdehnung und Verteilung (Schliff versus Nunataker) sondern auch zur Fließrichtung. Wichtig ist hierbei jedoch, dass sich Formen unterschiedlichster Gletschervorstöße teilweise überlagern oder jüngere Vergletscherungen ältere sogar vollkommen ausgelöscht (überfahren) haben können. Die Altersdatierung der glazialen Geländeformen kann allerdings nur im Feld beziehungsweise im Labor mit modernen Datierungsmethoden durchgeführt werden und nicht mit der in dieser Arbeit verwendeten Methode der GIS-basierten Analyse. Das Alter der gewählten Formen ist für die Forschungsmethode der vorliegenden Arbeit allerdings nicht vorrangig, da davon ausgegangen wird, dass im Untersuchungsgebiet jüngere Vergletscherung bezüglich Fließrichtung dem während älterer Vergletscherung geschaffenen Relief untergeordnet ist.

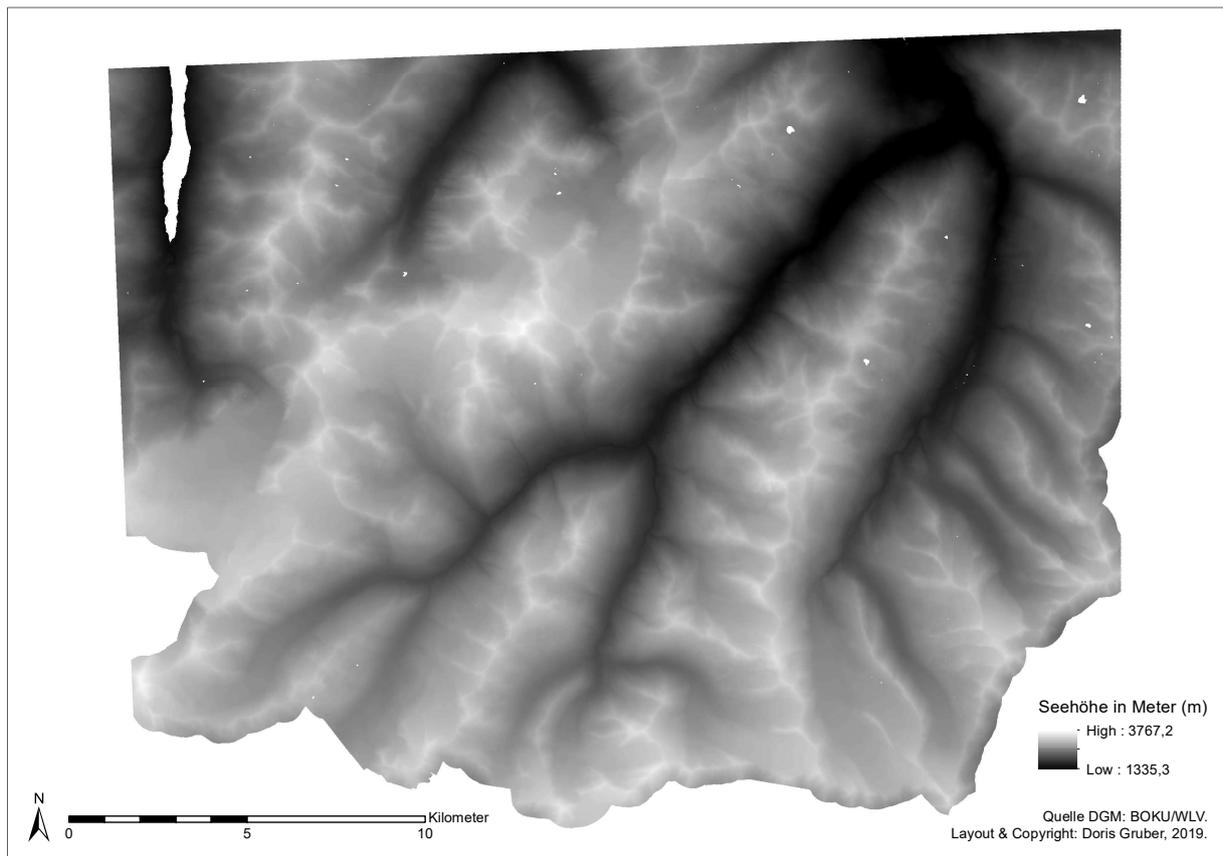
Nachdem nun ein Einblick ins Untersuchungsgebiet gegeben wurde, werden im folgenden Kapitel die Ergebnisse vorgestellt.

## 5. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der GIS-basierten Kartierung beispielhaft präsentiert und analysiert. Zuerst werden jedoch Überblickskarten des gesamten Untersuchungsgebietes gezeigt. Eine Gesamtkarte des vollständig kartierten Untersuchungsgebietes ist aufgrund des kleinen Kartenmaßstabs wenig aussagekräftig, befindet sich der Vollständigkeit halber jedoch im Anhang der vorliegenden Arbeit.

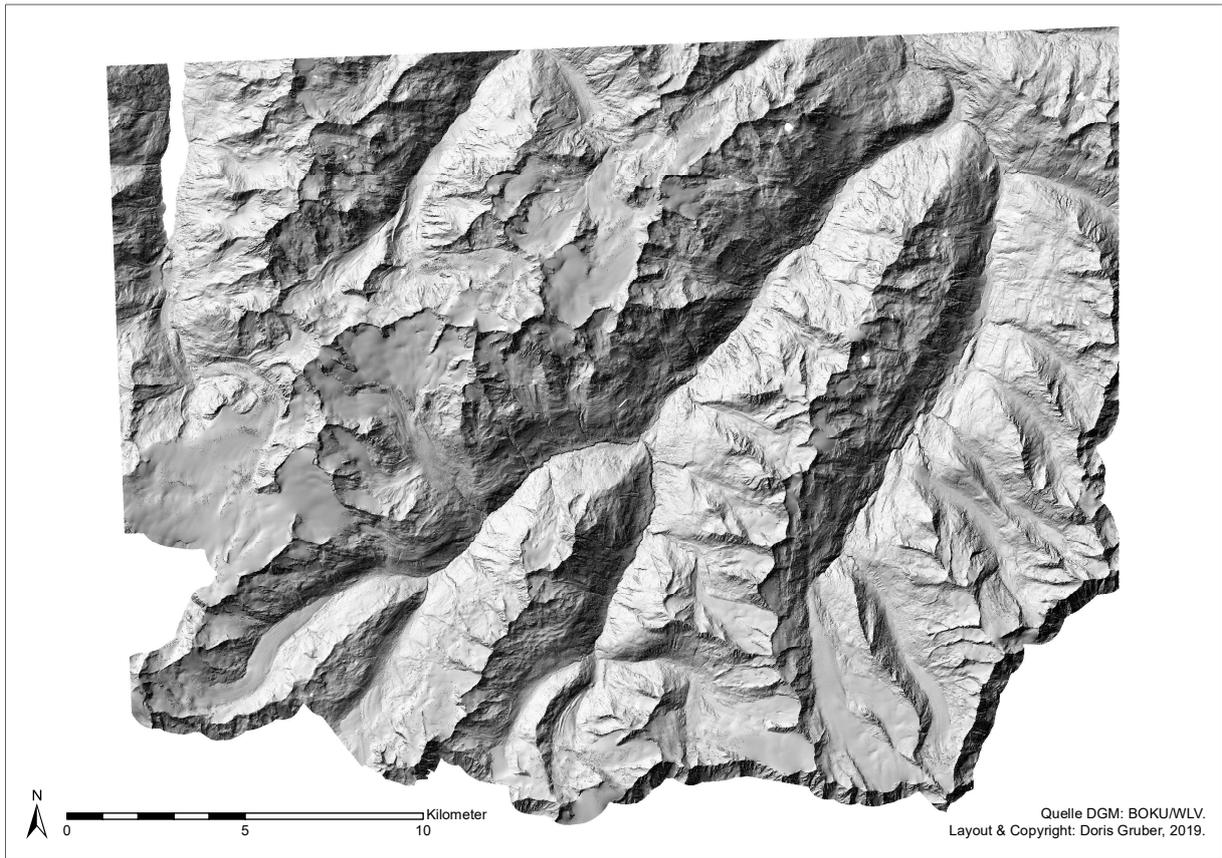
Die Abbildungen 5 bis 10 zeigen die ausgewählten Kartiergrundlagen, wobei Abbildung 5 das digitale Geländemodell, Abbildung 6 die aus dem DGM generierte Schummerungskarte, Abbildung 7 das Orthofoto, Abbildung 8 die geologische Karte und Abbildung 9 die generierte Hangneigungskarte darstellt. Abbildung 10 zeigt den zur systematischen Kartierung erstellten Raster vor der Schummerungskarte.

Der höchste Punkt des DGM wird im Datensatz mit 3767,2 Metern angegeben (siehe Abbildung 5) obwohl die Wildspitze und somit der höchste Punkt im Untersuchungsgebiet offiziell 3768 Meter hoch ist. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Punktdichte des DGM im Hochgebirge mit einem Punkt pro vier Quadratmeter geringer ist als in besiedeltem beziehungsweise verbautem Gebiet (mindestens ein Punkt pro Quadratmeter) (vgl. Land Tirol<sup>[8]</sup>). Der Höhenunterschied zwischen Realität und Modell ist allerdings vernachlässigbar, da die absolute Höhe bei der im Zuge dieser Arbeit verwendeten Forschungsmethode nicht benötigt wird – viel wichtiger sind relative Höhenunterschiede um Hangneigungen und Geländeformen abzuleiten. Das DGM weist desweiteren einige Lücken auf (zu sehen als weiße Flecken im Bild), welche die Forschungsarbeit allerdings ebenfalls nicht negativ beeinflusst haben. Die Datenlücken befinden sich mit wenigen Ausnahmen über glatten Wasseroberflächen (Gepatschstausee, Gletscherrandseen, Speicherteiche), da Wasser die Laserstrahlen bei der Datenaufnahme (ALS) absorbiert, wodurch hier keine Geländeoberfläche berechnet werden kann (vgl. Land Tirol<sup>[8]</sup>).

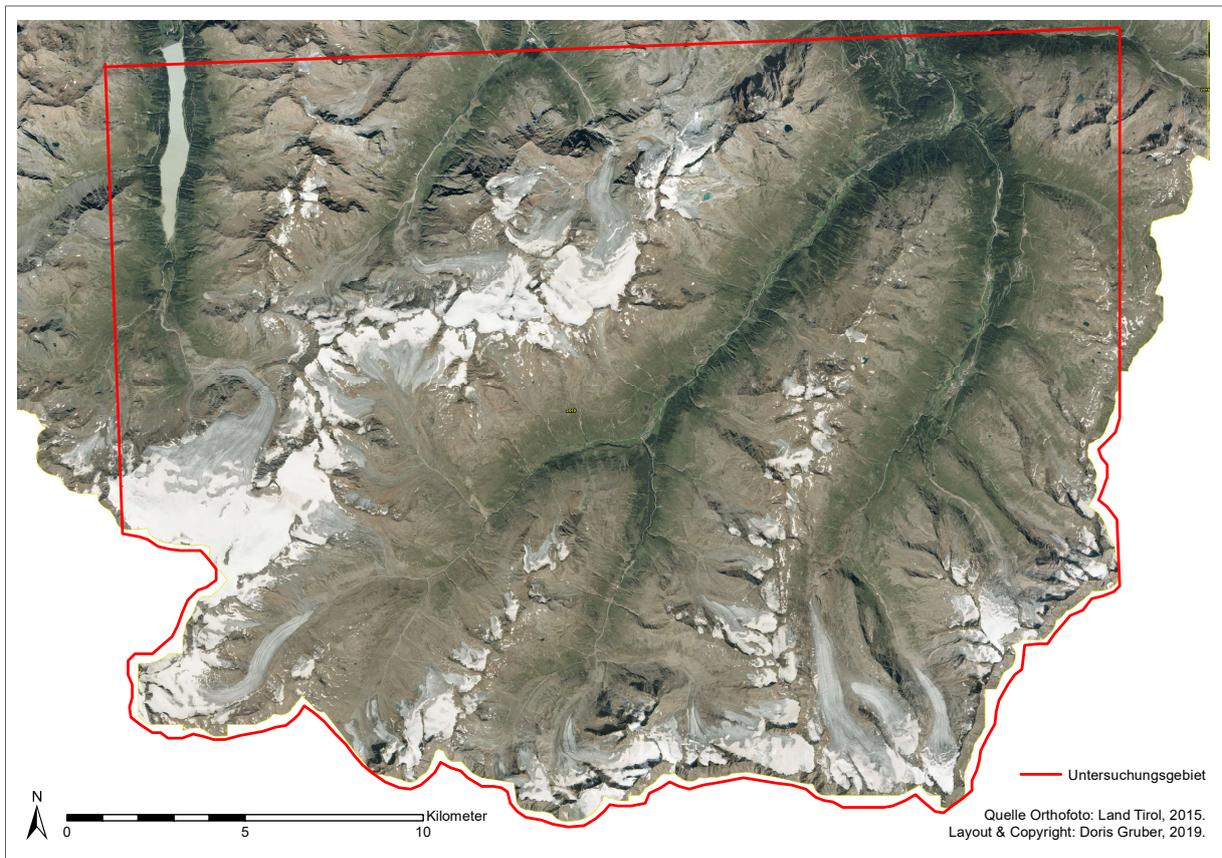


**Abbildung 5: Digitales Geländemodell des Untersuchungsgebietes.**

Die weißen Lücken sind folgerichtig auch in Abbildung 6 sichtbar. Die hier gezeigte Schummerungskarte weist eine Beleuchtungsrichtung von Nord-West auf (Azimut  $315^\circ$ , Sonnenhöhe  $45^\circ$ ). Man erkennt die hohe Reliefenergie des Untersuchungsgebietes sowie dessen vergleichsweise starke Vergletscherung. Die Vergletscherung ist im Gegensatz zur Reliefenergie auch im Orthofoto von Abbildung 7 gut sichtbar. Ebenfalls deutlich wird im Orthofoto die geringe Bewaldung des Untersuchungsgebietes, welche – erkennbar als dunkelgrüne Flächen – auf die Talböden begrenzt ist.



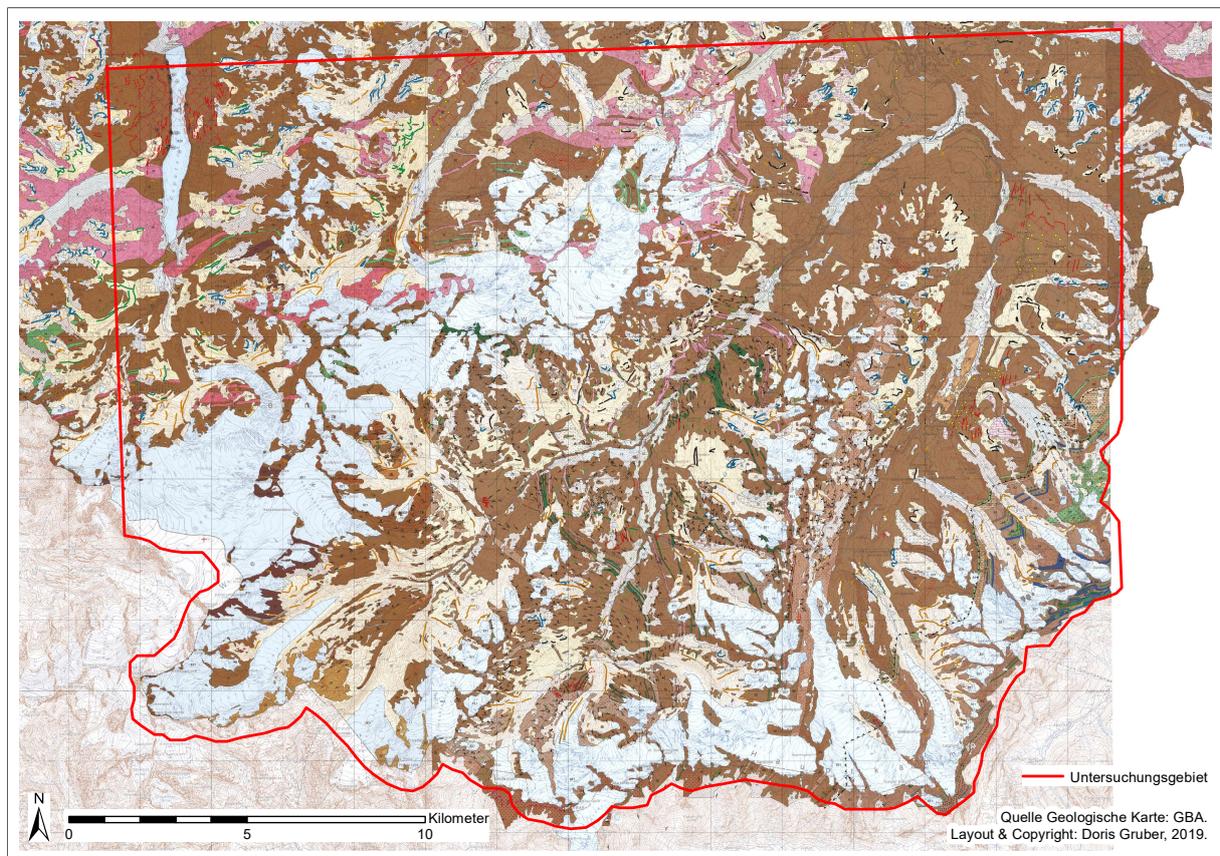
**Abbildung 6: Schummerungskarte des Untersuchungsgebietes (DGM-Derivat).**



**Abbildung 7: Orthofoto des Untersuchungsgebietes (rot abgegrenzt).**

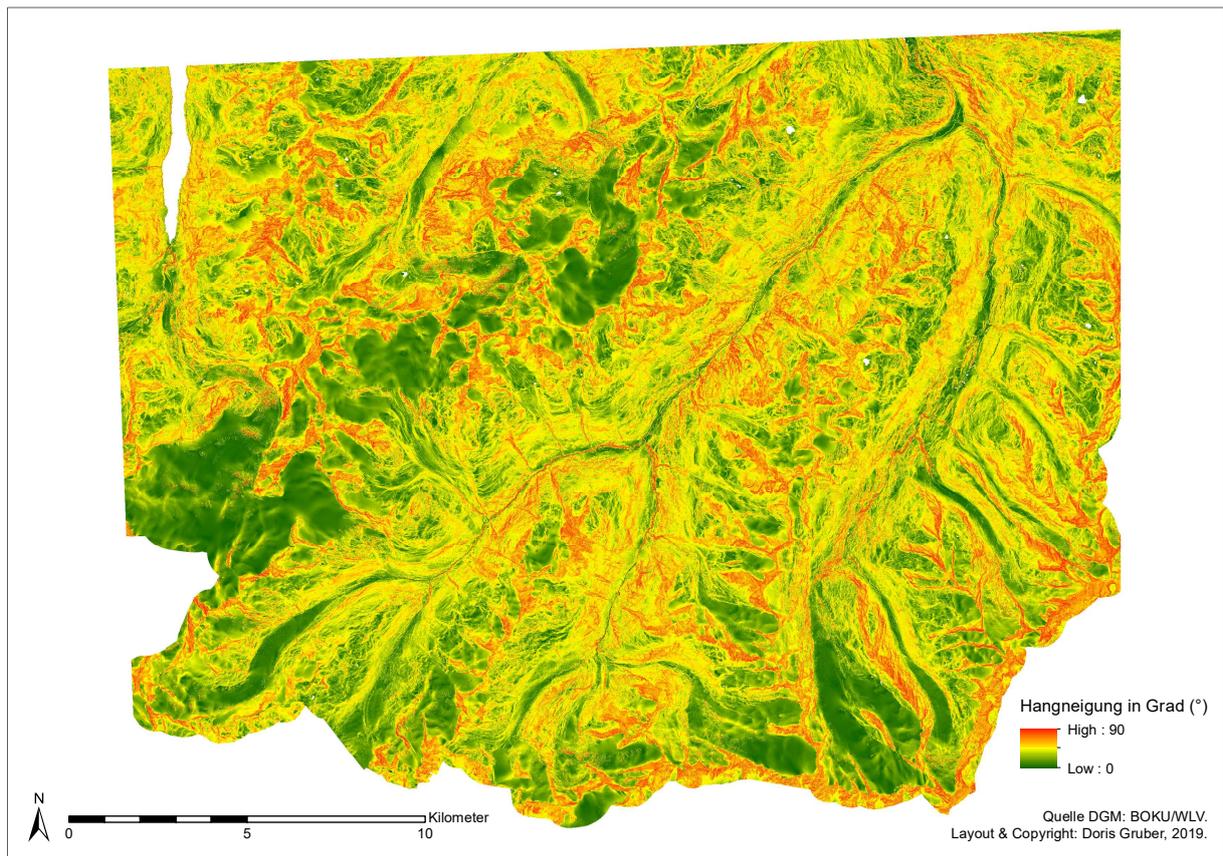
Die geologische Karte in Abbildung 8 unterstützt die Einführung in die Geologie des Untersuchungsgebietes aus Kapitel 4.3. Die bräunlich und rosa eingefärbten Flächen stellen Gneise der Ötztal-Decke beziehungsweise des Ötztal-Kristallins dar, welche zum Ötztal-Bundschuh-Deckensystem im Ostalpin gezählt werden (vgl. Legende der GEOFAST Karten).

Das Untersuchungsgebiet beinhaltet Bereiche von zwei Blattsnitten der digitalen GEOFAST-Karten (172 – *Weißkugel* und 173 – *Sölden*). Der Link zur Homepage der GBA<sup>[10]</sup> und somit zu den ausschließlich digital verfügbaren GEOFAST-Karten findet sich im Quellenverzeichnis.



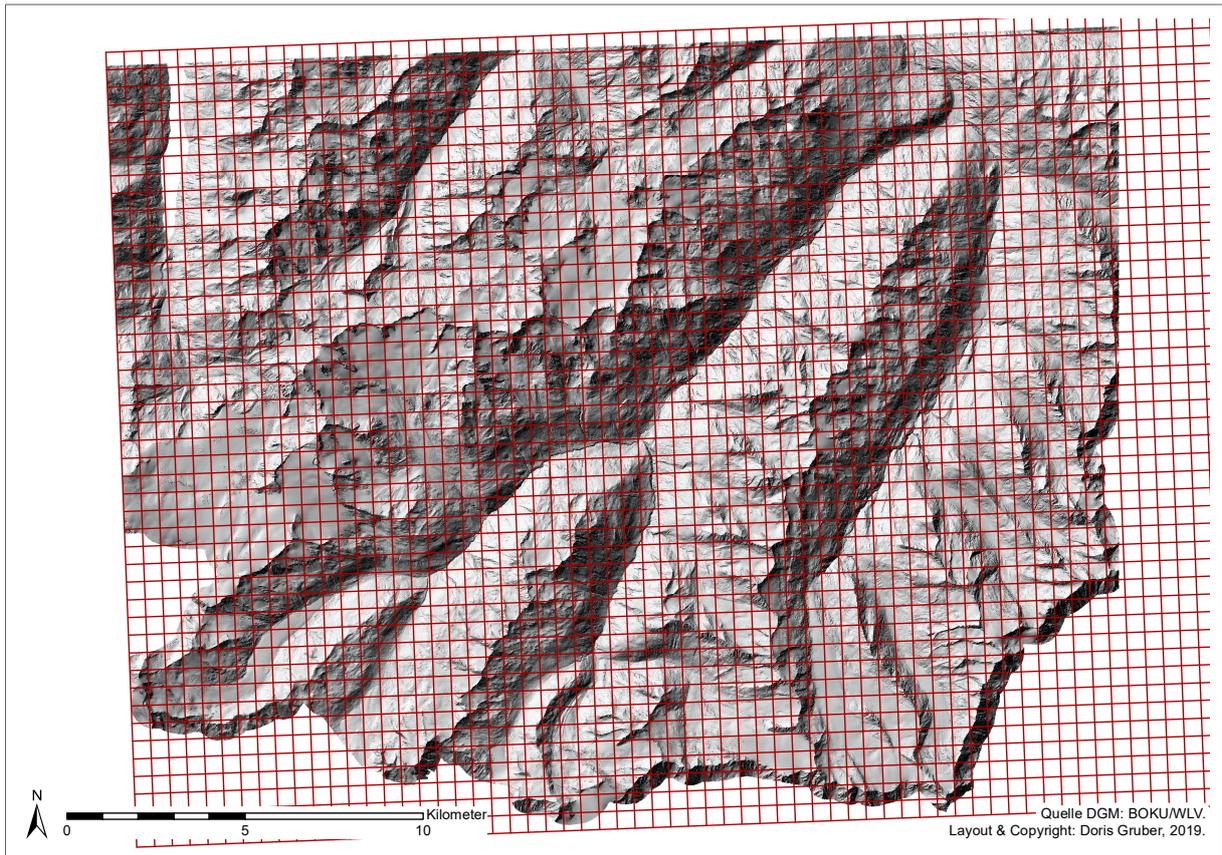
**Abbildung 8: Geologische Karte des Untersuchungsgebietes (rot abgegrenzt).**

Die grünen Bereiche der Hangneigungskarte (Abbildung 9) und somit jene mit geringer Neigung spiegeln die vergletscherten Flächen und die Talböden wider. Gelbe und rote Bereiche stellen Flächen mit mäßiger beziehungsweise starker Neigung dar. Die Karte lässt erneut die hohe Reliefenergie im Untersuchungsgebiet deutlich werden. Die steilen Berghänge stehen in starkem Kontrast mit den flachen Talböden und den Gletscherflächen.



**Abbildung 9: Hangneigungskarte des Untersuchungsgebietes (DGM-Derivat).**

Zur besseren Übersichtlichkeit und zur Ermöglichung einer systematischen Kartierung wurde, wie zuvor bereits erwähnt, ein Raster (*fishnet*) generiert und über das Untersuchungsgebiet gelegt (siehe Abbildung 10). Ein Rasterabschnitt umfasst im Originalmaßstab (1:1) einen Bereich von 500 mal 500 Metern. Kartiert beziehungsweise interpretiert wurde Rasterabschnitt für Rasterabschnitt. Abbildung 11 zeigt solch einen einzelnen Rasterabschnitt des Untersuchungsgebietes um den Kartiervorgang besser nachvollziehen zu können. Hier wird sichtbar, warum eine gute Datengrundlage mit hoher Auflösung für die gewählte Methode so wichtig ist. Die Beleuchtungsrichtung der Schummerungskarte kommt in diesem Fall von Nord-Ost (Azimut 45°, Sonnenhöhe 45°).



**Abbildung 10: Raster zur Unterteilung des Untersuchungsgebietes in gleichgroße Ausschnitte zur Erleichterung der Kartierung.**



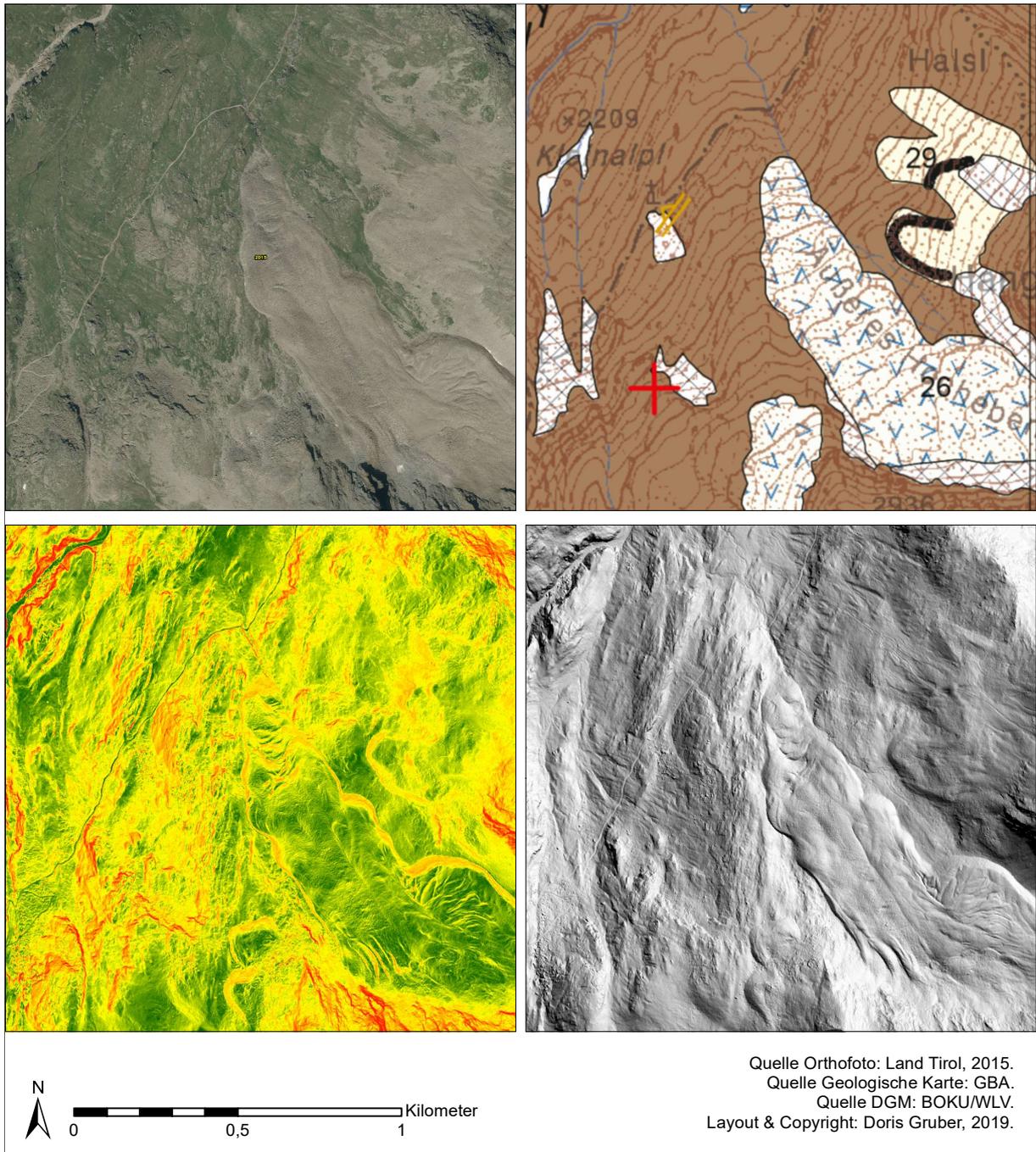
**Abbildung 11: Rasterabschnitt des Untersuchungsgebietes.**

Der gleiche Abschnitt des Untersuchungsgebietes findet sich auch in Abbildung 12 wieder, welche jedoch einen kleineren Kartenmaßstab aufweist und somit ein größeres Gebiet darstellt. Abbildung 13 zeigt die vier Kartiergrundlagen jeweils vom exakt gleichen Bereich. Der Vergleich lässt erkennen, wie sich die verschiedenen Datengrundlagen ergänzen. Eine Interpretation der Geländeformen anhand nur einer der Karten wäre wenig zielführend beziehungsweise nur begrenzt möglich.

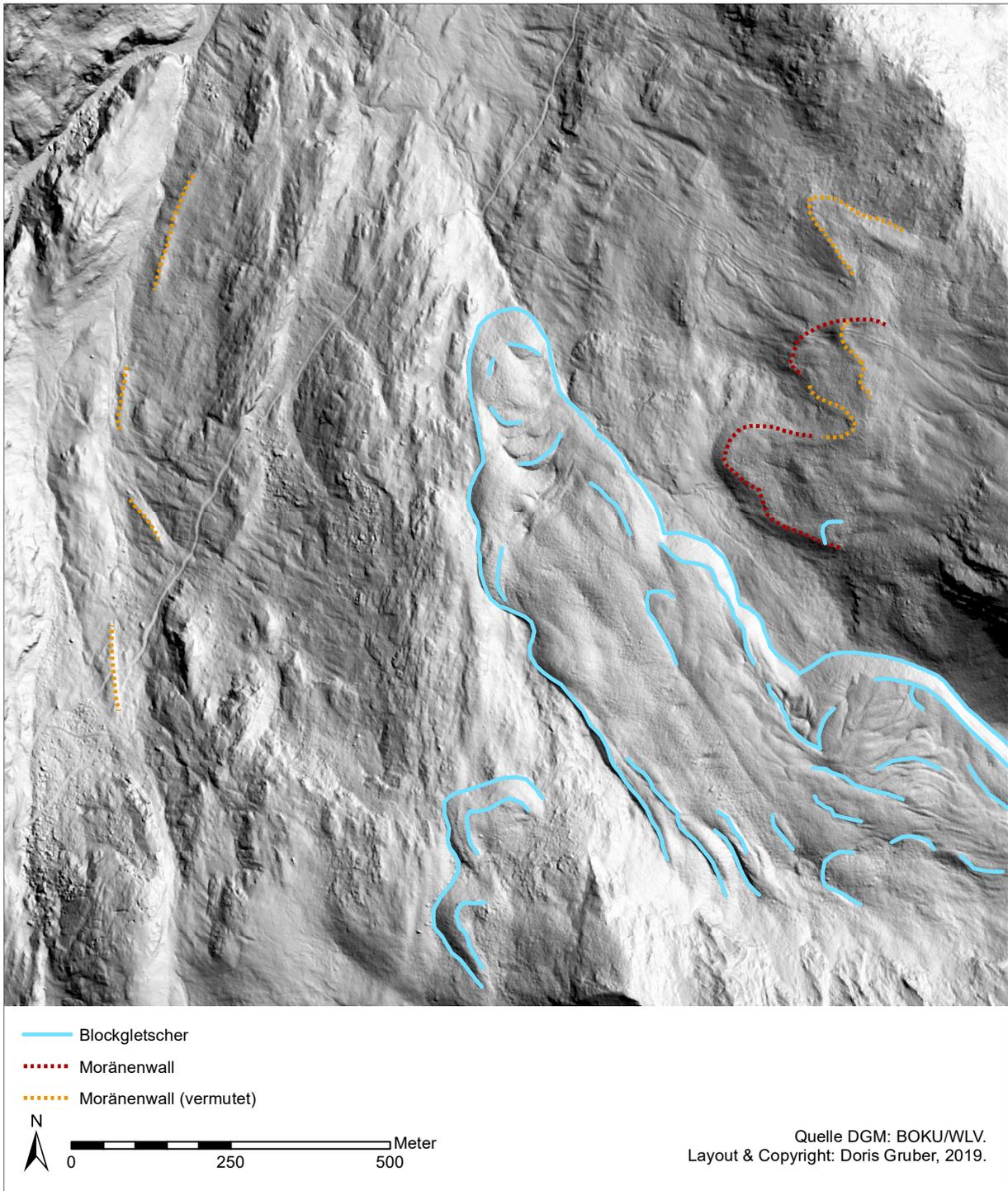
Der hier dargestellte Ausschnitt des Untersuchungsgebietes befindet sich im hinteren Gurgler Tal, süd(-westlich) von Obergurgl. Das Gewässer, welches in der den Kartenausschnitt im Nord-Westen schneidet (Fließrichtung von Süd-West nach Nord-Ost), ist die Gurgler Ache. Der Kartenausschnitt zeigt also einen orographisch rechts gelegenen Hang des Gurgler Tales, welcher gen Nord-West exponiert ist.

Der fertige kartierte Kartenausschnitt mit den eingetragenen geomorphologischen Attributen wird in Abbildung 13 gezeigt. Der Kartenausschnitt beinhaltet unter anderem die für diese Arbeit gewählten geomorphologischen Formen *Moränenwälle* und *Blockgletscher*. Die Signatur für Blockgletscher wurde bewusst linienförmig und nicht flächenförmig gewählt, damit man die darunterliegende Schummerungskarte besser erkennen kann. Die blauen Blockgletscher-Linien geben sowohl die Blockgletscherstirn als auch Stauchwülste und dergleichen an der Oberfläche der Masse wider. Die Blockgletscherstirn ist in der Mitte des Kartenausschnittes von Abbildung 13 sichtbar und zeigt an, dass der Blockgletscher in Richtung Nord-Westen fließt oder floss. Die Aktivität eines Blockgletschers kann anhand der Neigung und Farbe der Stirn abgeleitet werden – eine steile und dunkle Stirn deutet auf einen aktiven Blockgletscher hin (vgl. VEIT 2002). Eine Interpretation rein anhand von Fernerkundungsdaten ist diesbezüglich jedoch nicht zuverlässig, im Falle dieser Arbeit allerdings auch nicht notwendig. Die Moränenwälle wurden mit zwei unterschiedlichen Liniensignaturen (beide gerissen) versehen: dunkelrot bedeutet, dass diese Moränenwälle auch in der geologischen Karte eingezeichnet sind und gelten daher als bestätigt; orange bedeutet, dass diese Moränenwälle in der geologischen Karte nicht kartiert wurden, aber anhand der anderen Kartiergrundlagen (insbesondere der Schummerungskarte) so interpretiert wurden. In der Regel handelt es sich bei den kartierten Moränenwällen um End- und/oder Seitenmoränen beziehungsweise Ufermoränen vergleichsweise junger Vergletscherung (siehe geologische Karte). In diesem Beispiel (Abbildung 13) sieht man nordöstlich des Blockgletschers typisch U-förmige Endmoränen und westlich des Blockgletschers vermutlich Seitenmoränen bzw. Ufermoränen. In den Abbildungen 12 und 13 erkennt man außerdem, dass dieser Teilbereich des Untersuchungsgebietes sehr felsig ist und auch viel Lockermaterial vorhanden ist.

Die Endmoränen der großen Gletscher des Würm-Hochglazials sind im Falle dieser Arbeit in den Datengrundlagen nicht sichtbar, da sie außerhalb des Untersuchungsgebietes liegen.



**Abbildung 12: Vergleich der Kartiergrundlagen eines ausgewählten Ausschnitts des Untersuchungsgebietes (Beispiel 1).**



**Abbildung 13: Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit kartierten glazialen Geländeformen (Beispiel 1).**

Die Abbildungen 14 und 15 zeigen einen weiteren Teilbereich des Untersuchungsgebietes. Der Ausschnitt umfasst unter anderem das sogenannte *Taufkar*, welches sich an der oberen Talflanke nordwestlich der Ortschaft Vent befindet. Der Hang ist somit süd(-ost)exponiert. Die Beleuchtungsrichtung der Schummerungskarten kommt erneut von Nord-Ost (Azimut 45°, Sonnenhöhe 45°).

Neben *Moränenwällen* und *Blockgletschern* sind in diesem Abschnitt auch *Schlifflinien* erkennbar. Es handelt sich in diesem Fall um Grundmoränen in direkter Nähe der rezenten Gletscherzunge. Die linienhaften Ablagerungen, welche nach dem Abschmelzen des Gletschers zurückgelassen werden, zeigen die Richtung der ehemaligen Eisbewegung an. Diese linienhaften Ablagerungen – in der vorliegenden Arbeit eben als Schlifflinien bezeichnet (siehe Kapitel 2) – sind besonders in der Schummerungskarte sowie in der Hangneigungskarte gut zu erkennen (siehe Abbildung 14). Bei den in Abbildung 15 kartierten Moränenwällen handelt es sich wieder um Seiten- bzw. Ufermoränen (parallel zu den Schlifflinien) und Endmoränen (quer zu den Schlifflinien). Der kartierte Blockgletscher hat sich in diesem Fall aus dem vorhandenen Moränenmaterial entwickelt. Am westlichen Rand des Kartenausschnittes sieht man mittig einen aktiven Gletscher, welcher besonders in der Schummerungskarte an seinen Spalten gut zu erkennen ist (Abbildung 14). Beim Vergleich mit dem jüngeren Orthofoto ist allerdings ein Gletscherrückgang zu erkennen (geringere Gletscheroberfläche im Orthofoto). In der geologischen Karte des gleichen Untersuchungsgebietsabschnittes ist desweiteren ein Gletscher am nördlichen Rand (mittig) eingezeichnet (*Taufkar*), welcher in den DGM-Derivaten als glatte Schneefläche erkennbar ist, auf dem jüngeren Orthofoto allerdings nicht vorhanden ist. Auch wenn sich anhand der DGM-Derivate nicht feststellen lässt, ob es sich hierbei tatsächlich noch um einen Gletscher handelt oder lediglich um ein Schneefeld, zeigt der Vergleich der Datengrundlagen einen Gletscherrückgang an. Das DGM-Datenloch im südwestlichen Bereich des Ausschnittes ist durch einen kleinen Gletscherrandsee begründet, welcher die Laserstrahlen beim Erstellen des Scans absorbiert hat (siehe Abbildung 14).

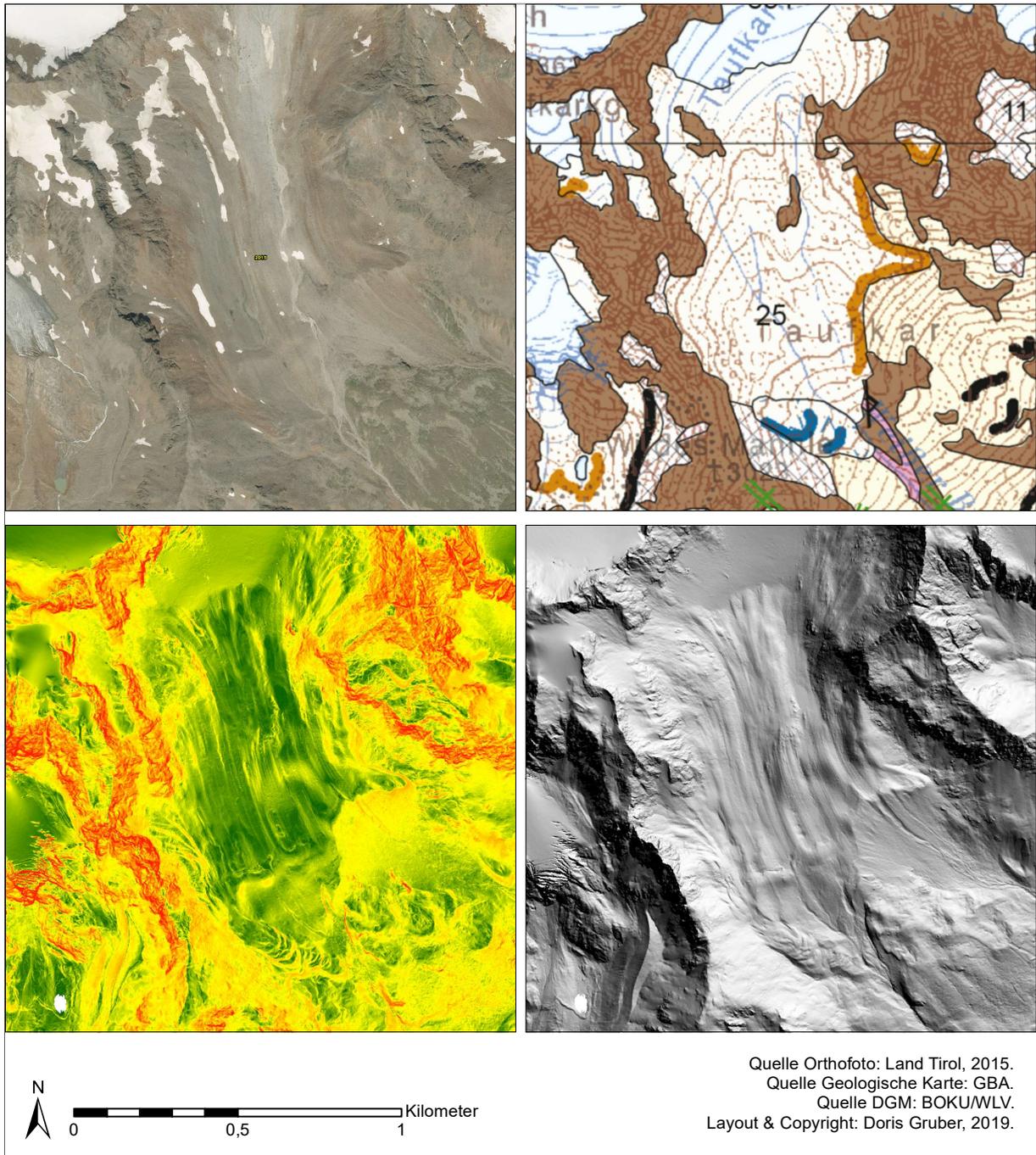
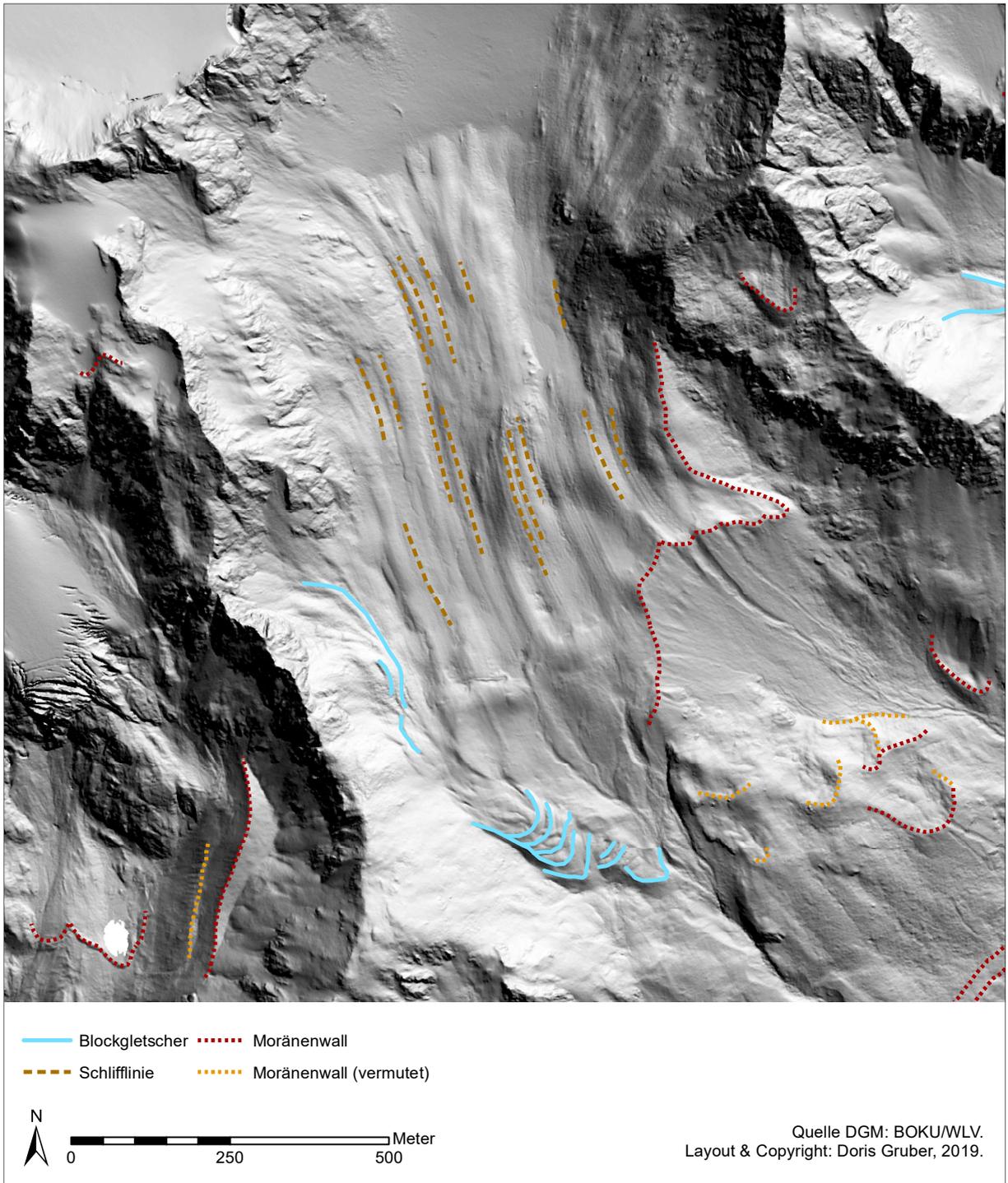


Abbildung 14: Vergleich der Kartiergrundlagen eines ausgewählten Ausschnitts des Untersuchungsgebietes (Beispiel 2).



**Abbildung 15: Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit kartierten glazialen Geländeformen (Beispiel 2).**

Abbildung 16 zeigt ein weiteres Beispiel für den dokumentierten Gletscherrückgang in den Alpen. Dieser Abschnitt des Untersuchungsgebietes liegt an der österreichisch-italienischen Grenze und zeigt die nördlichen Gletscherzungen des Hochjochferners. Das hier abgebildete Tal entwässert Richtung Norden in die Rofenache, einer der beiden Hauptzubringer der Venter Ache. Die südwestliche Ecke des Kartenausschnittes deckt zum Teil bereits italienisches Staatsgebiet ab. Beim Vergleich mit der geologischen Karte (welche die Staatsgrenze zeigt) wird erneut deutlich, dass die weiteren Datengrundlagen noch einen Übergangstreifen auch auf italienischer Seite abdecken, ehe keine Daten mehr zur Verfügung sind (weiße Ecke).

Beim Vergleich der Schummerungskarte mit dem Orthofoto zeigt sich, dass an Stellen, welche zum Zeitpunkt der Aufnahme der DGM-Daten vom Gletscher bedeckt waren, im Jahr 2015 (Aufnahmedatum des Orthofotos) kein Gletscher mehr vorhanden war sondern stattdessen Gletscherrandseen (siehe mittig östlich und links südlich im Kartenausschnitt). Die Datengrundlagen dokumentieren also einen relativ starken Gletscherrückgang in dieser kurzen Zeit.

Abbildung 17 zeigt den gleichen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit den kartierten geomorphologischen Formen. Die Beleuchtungsrichtung des DGM kommt erneut aus Nordosten (Azimut  $45^\circ$ , Sonnenhöhe  $45^\circ$ ). In diesem Beispiel sind erstmals auch Schlifflinien im Festgestein zu sehen, was auch beim Vergleich mit der geologischen Karte aus Abbildung 16 bestätigt wird.

Neben den kartierten Schlifflinien und Moränenwällen ist in Abbildung 17 die fluviale Überprägung des Gebietes deutlich sichtbar. An den Hängen sind zahlreiche Erosionsrinnen zu erkennen und am Talboden sieht man Umlagerungstrecken. Hier musste bei der Interpretation der Kartiergrundlagen daher besonders vorsichtig vorgegangen werden um die linienhaften Objekte nicht mit Moränenwällen zu verwechseln.

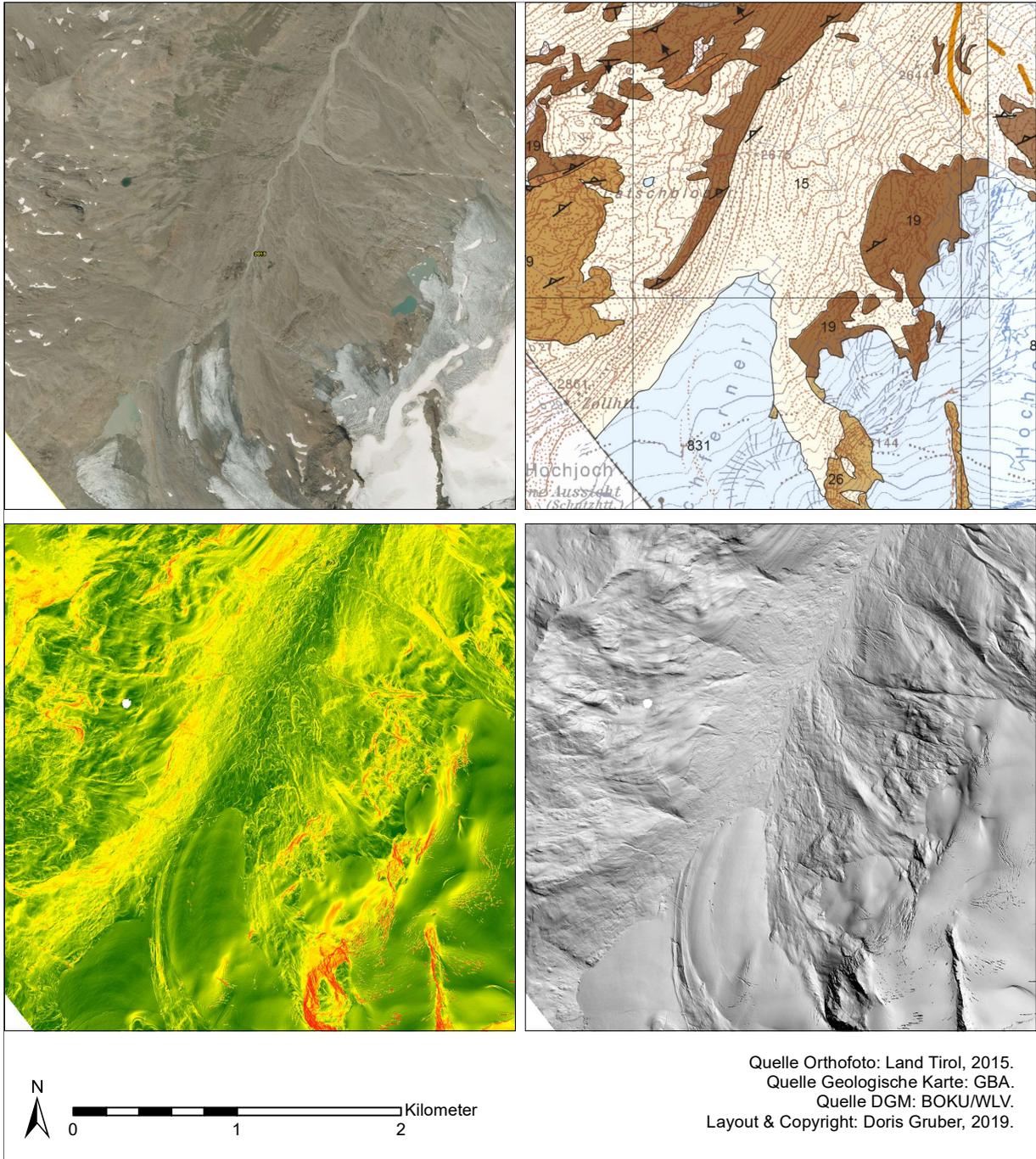
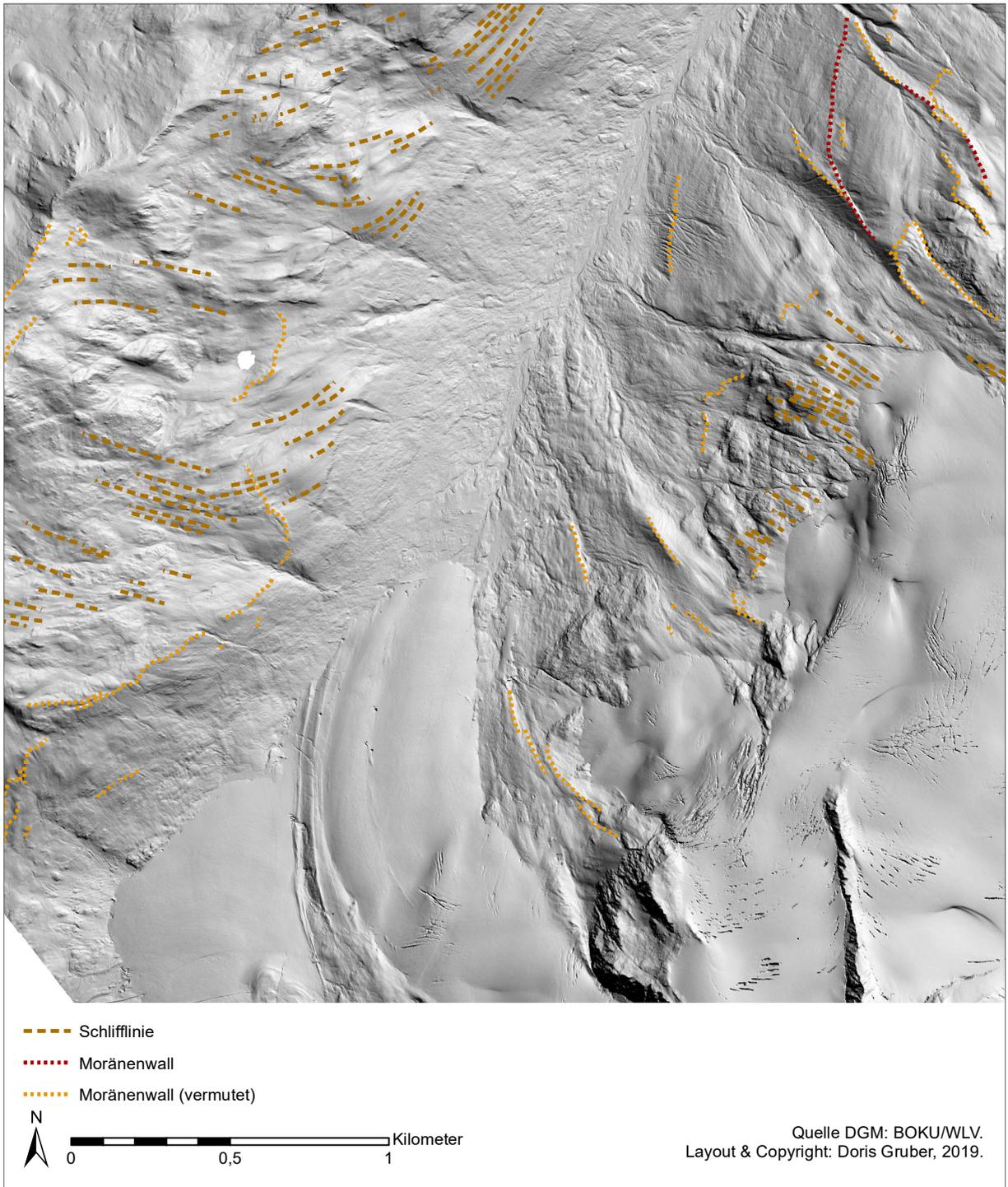


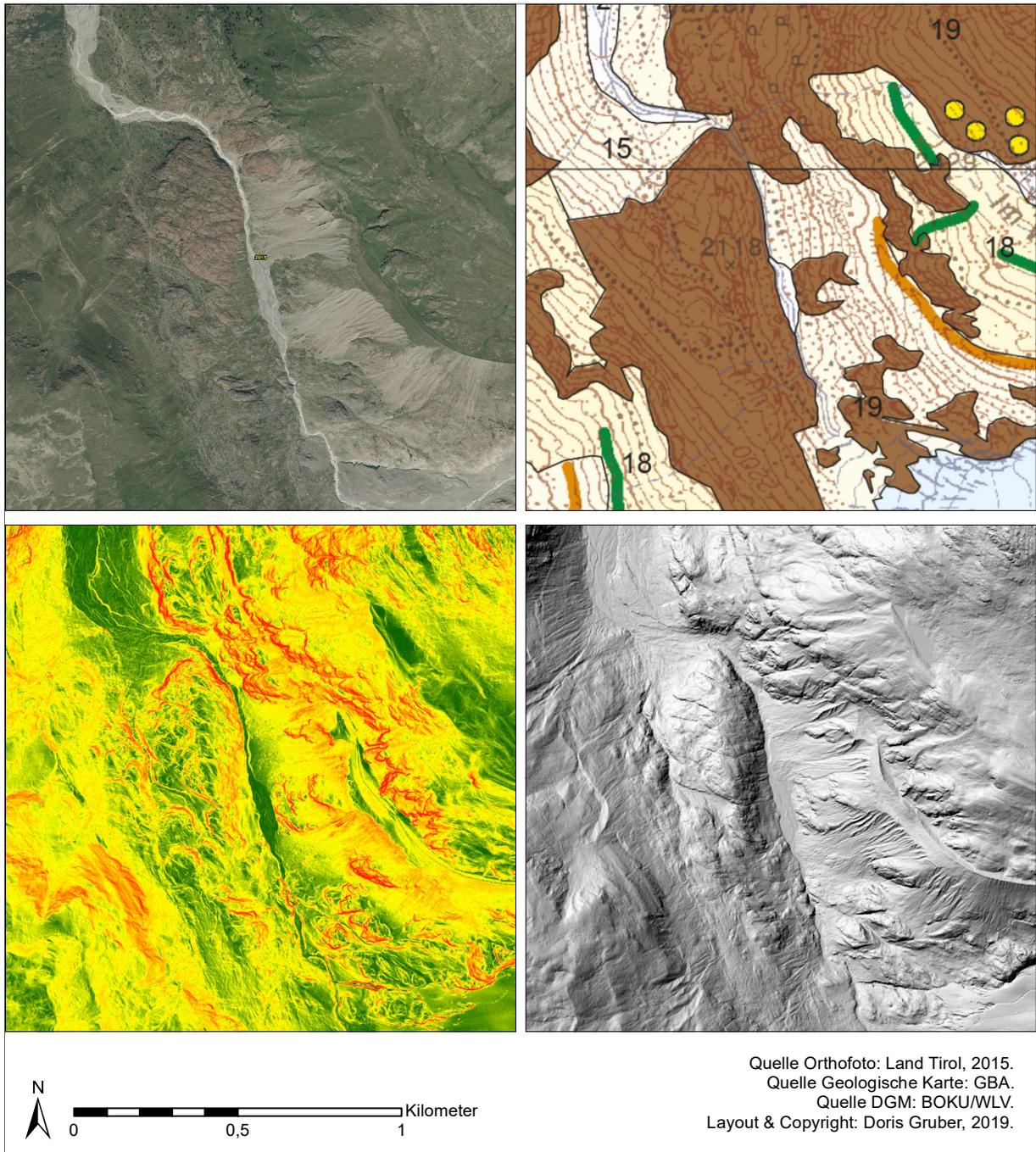
Abbildung 16: Vergleich der Kartiergrundlagen eines ausgewählten Ausschnitts des Untersuchungsgebietes (Beispiel 3).



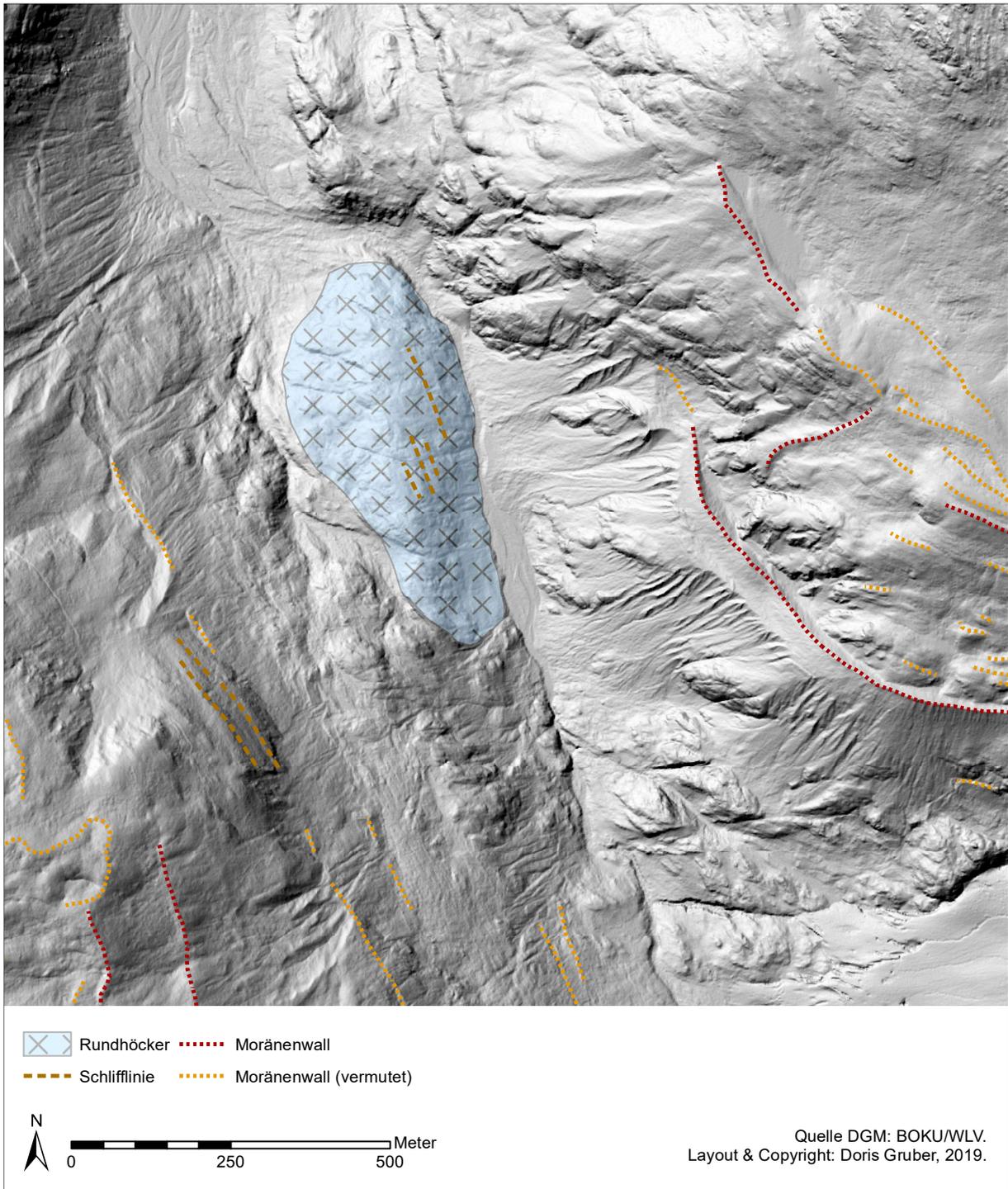
**Abbildung 17: Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit kartierten glazialen Geländeformen (Beispiel 3).**

Ein weiterer beispielhafter Teilbereich aus dem Untersuchungsgebiet wird in Abbildung 18 und Abbildung 19 gezeigt. Der Ausschnitt bildet einen Teil des hinteren Kaunertals ab. Das Gewässer, das von Süden nach Norden mittig durch den dargestellten Bereich fließt, ist die Fagge. Sie entspringt dem Gepatschferner und wird weiter nördlich mit weiteren Nebenbächen zum Gepatschstausee aufgestaut. Die Beleuchtungsrichtung der Schummerungskarten kommt in diesen beiden Abbildungen aus Nord-Westen (Azimut 315°, Sonnenhöhe 45°). Abbildung 18 zeigt wieder die unterschiedlichen Datengrundlagen des hier gewählten Ausschnitts und macht erneut deutlich, dass nur eine Kombination aller interpretierbaren Informationen aussagekräftig ist. Im Orthofoto ist zwar die Fagge eindeutig zu erkennen, die Nebenbäche sieht man allerdings in der geologischen Karte am besten. Zusätzlich wirkt das Gelände im Orthofoto eher flach, wohingegen die Schummerungskarte markante Formen aufzeigt. Die Hangneigungskarte zeigt ergänzend, wie steil die Hänge sind. Die Hangneigungskarte in Kombination mit der Schummerungskarte lässt einen großen *Rundhöcker* westlich der Bildmitte erkennen, welcher in Abbildung 19 kartiert ist.

Die Höckerform ist in der Schummerungskarte ersichtlich, während die Hangneigungskarte typische Merkmale eines Rundhöckers aufzeigt, nämlich geringere Neigungen auf der dem Gletscher zugewandten Luv-Seite und stärkere Neigungen auf der abgewandten Lee-Seite (vgl. EMBLETON-HAMANN 2007). Es sind auch strukturgeologische Eigenschaften und eine jüngere geomorphologische Überprägung erkennbar, prinzipiell ist allerdings eine eindeutige Richtung der Eisbewegung erkennbar, welche anzeigt, dass der Gletscher in diesem Fall von Süden gen Norden geflossen ist. Dies stimmt auch mit dem rezenten Gletscher, mit dem Talverlauf und mit den weiteren glazialen Formen überein. Neben dem Rundhöcker sind in Abbildung 19 auch imposante Moränenwälle und Schlifflinien kartiert.



**Abbildung 18: Vergleich der Kartiergrundlagen eines ausgewählten Ausschnitts des Untersuchungsgebietes (Beispiel 4).**



**Abbildung 19: Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit kartierten glazialen Geländeformen (Beispiel 4).**

Die Abbildungen 20 und 21 zeigen einen Teil des Schigebiets Sölden. Der Abschnitt liegt südwestlich der Gemeinde Sölden auf der orographisch linken Seite des Venter Tals, ober Heiligenkreuz. Die Schummerungskarte hat eine Beleuchtungsrichtung aus Nord-West (Azimut 315°, Sonnenhöhe 45°). Es handelt sich hierbei um ein stark anthropogen überprägtes Gebiet. Zu erkennen sind vor allem in Abbildung 20 Liftanlagen, ein Parkplatz und Schipisten. Im Orthofoto ist im südwestlichen Bildbereich zusätzlich eine Wasserfläche zu sehen, welche weder in den Derivaten, noch in der geologischen Karte vorhanden ist. Das künstliche Gewässer, vermutlich ein Speicherteich zur Herstellung von Kunstschnee, wurde folglich in der Zeit zwischen der Aufnahme des DGM und jener des Orthofotos angelegt. Der See wurde – wie der Vergleich des Orthofotos mit der geologischen Karte zeigt – zum Teil ins anstehende Gestein gegraben, was die Intensität der anthropogenen Veränderung des Reliefs verdeutlicht. Die zuvor erwähnten Schipisten sind daran zu erkennen, dass hier sichtbar die Geländeoberfläche geglättet wurde, also deutlich weniger Rauigkeit aufweist. Liftanlagen erkennt man anhand der Gebäude und zum Teil anhand der Liftrassen, welche als gerade Linien vom sonst wenig geometrischen Formenschatz deutlich hervorstechen. Der Parkplatz zeigt sich als glatte Fläche mittig rechts im Kartenausschnitt, welche vor allem in der Hangneigungskarte durch die einheitliche, dunkelgrüne Färbung auffällt (= sehr geringe Neigung). Liftanlagen und Parkplatz sind außerdem in der geologischen Karte eingezeichnet. Die weißen Datenlücken in den DGM-Derivaten spiegeln weitere kleine Stehgewässer und ein Gebäude wider, wie im Orthofoto ersichtlich ist. Aufgrund der starken anthropogenen Überprägung konnten die Geländeformen dieses und ähnlicher Bereiche des Untersuchungsgebietes nur sehr eingeschränkt interpretiert werden. In Abbildung 21 wurden daher nur die auch in der geologischen Karte eingezeichneten Moränenwälle (inklusive vermuteter Ergänzungen) sowie Schlifflinien im Festgestein abseits des Schigebiets kartiert.

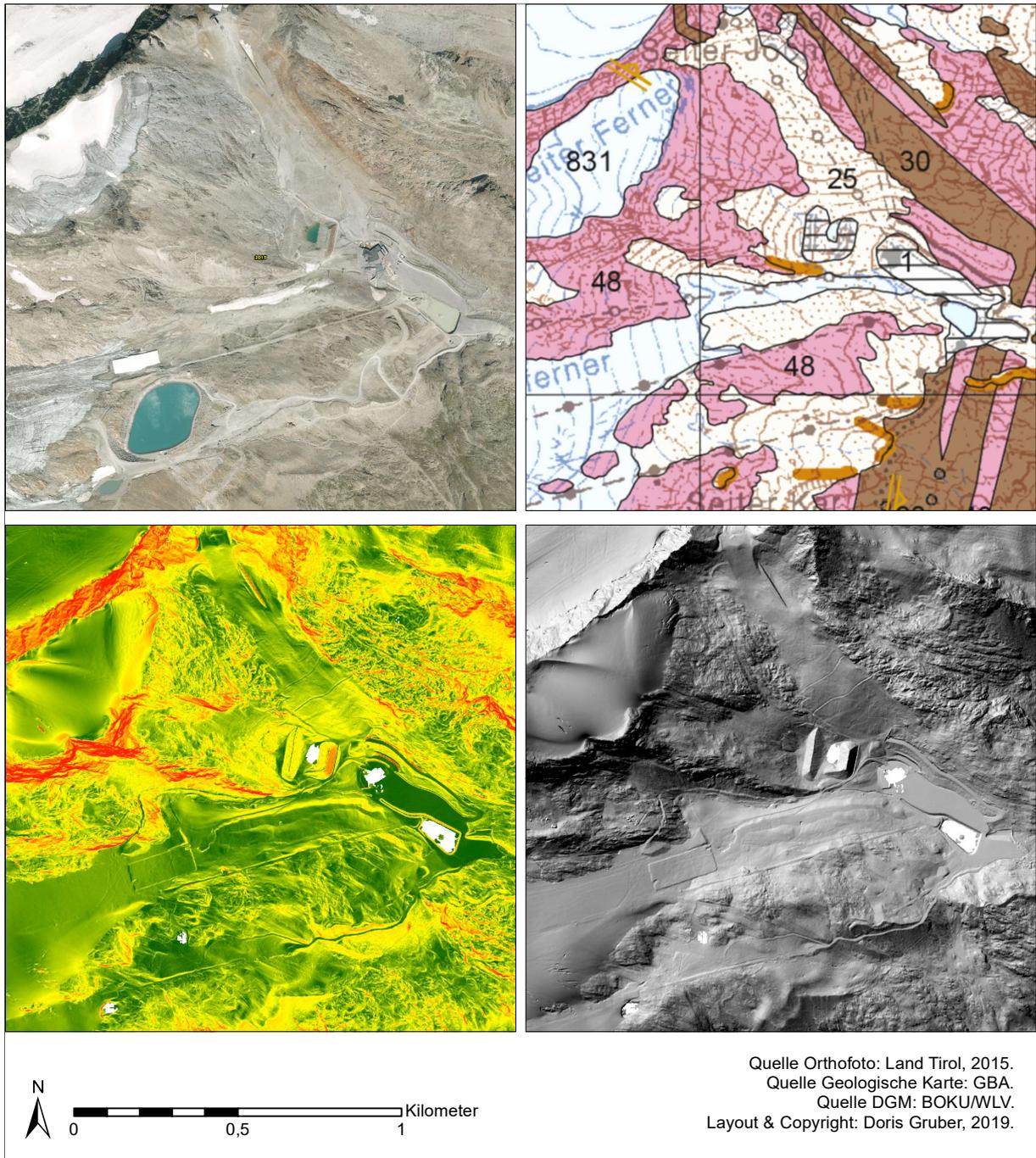


Abbildung 20: Vergleich der Kartiergrundlagen eines ausgewählten Ausschnitts des Untersuchungsgebietes (Beispiel 5).

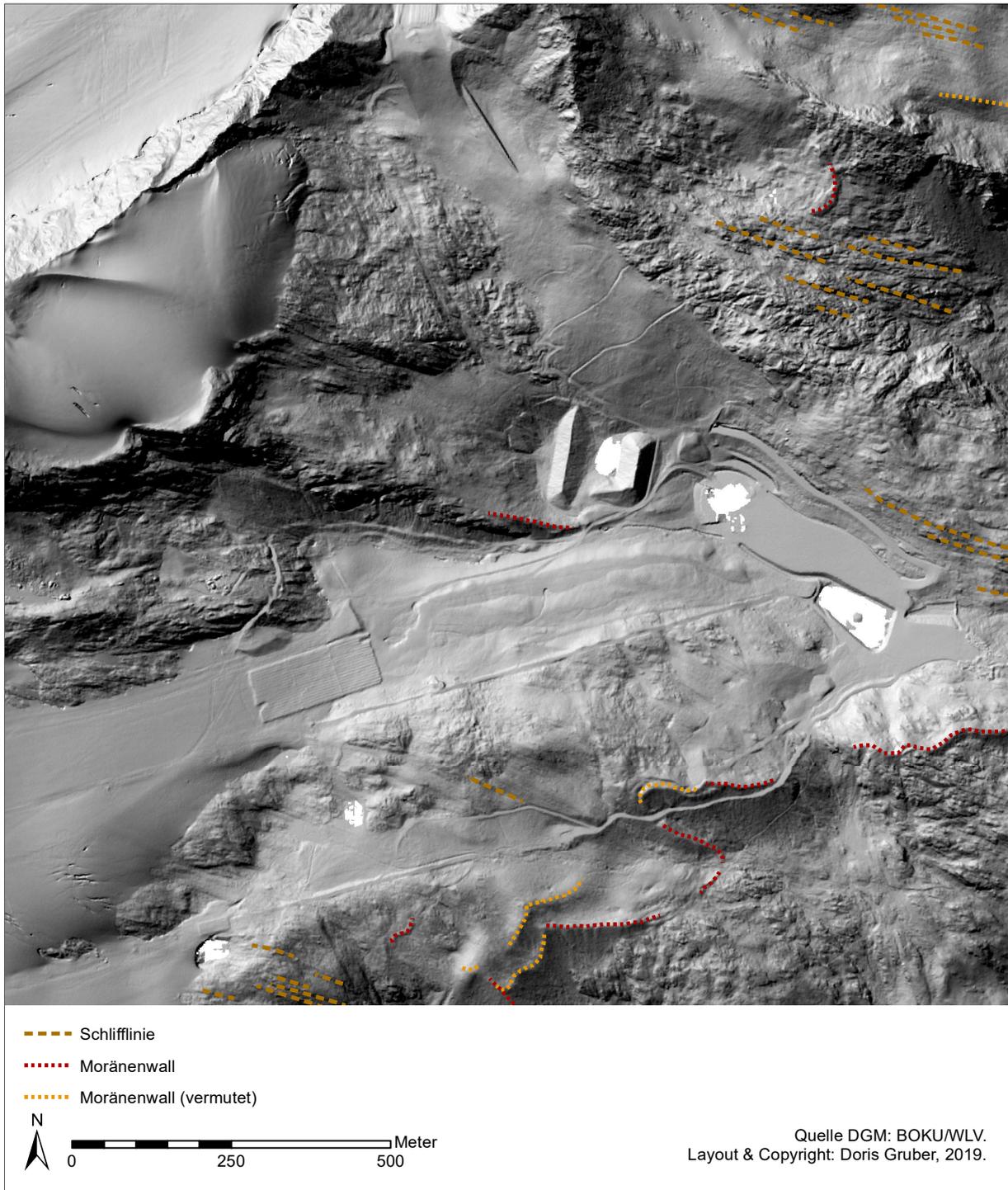


Abbildung 21: Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit kartierten glazialen Geländeformen (Beispiel 5).

Der in den Abbildungen 22 bis 24 dargestellte Abschnitt des Untersuchungsgebietes wurde gewählt, da hier deutlich wird, warum Schummerungskarten mit verschiedenen Beleuchtungsrichtungen benötigt werden. Der Ausschnitt zeigt einen Bereich des hinteren Pitztals (südöstlich von Mittelberg), wobei die Pitze den Abschnitt in nordwestliche Richtung durchfließt. Die Beleuchtungsrichtung der Schummerungskarte in Abbildung 22 kommt aus Nord-West (Azimut  $315^\circ$ , Sonnenhöhe  $45^\circ$ ). Die Hangneigungskarte macht den flachen Talboden sowie die in der geologischen Karte eingezeichneten und in allen weiteren Kartiergrundlagen ebenfalls erkennbaren Moränenwälle deutlich.

Abbildung 23 zeigt die vier verschiedenen Beleuchtungsrichtungen der Schummerungskarte für den gleichen Bereich, wobei die Sonnenhöhe bei  $45^\circ$  gleichbleibend ist. Der Azimut unterscheidet sich hingegen folgendermaßen: Kärtchen a) weist eine Beleuchtungsrichtung aus Nord-Ost (Azimut  $45^\circ$ ), Kärtchen b) aus Süd-Ost (Azimut  $135^\circ$ ), Kärtchen c) aus Süd-West (Azimut  $225^\circ$ ) und Kärtchen d) aus Nord-West (Azimut  $315^\circ$ ) auf. Die Abbildung macht deutlich, dass die Geländeformen bei veränderter Beleuchtung unterschiedlich stark sichtbar sind und dass nur eine einzige Beleuchtungsrichtung für die Interpretation der Geländeoberfläche nicht ausreichend wäre.

Abbildung 24 stellt schließlich den fertig kartierten Abschnitt dar. Zu sehen ist eine zungenförmige Anordnung von Moränenwällen (End- und Seiten- beziehungsweise Ufermoränen), welche einen früheren Gletscherstand nachzeichnen. Dieser Gletscher floss demnach ebenfalls Richtung Nord-Westen. Die Beleuchtungsrichtung kommt erneut aus Nord-West-Richtung (Azimut  $315^\circ$ , Sonnenhöhe  $45^\circ$ ).

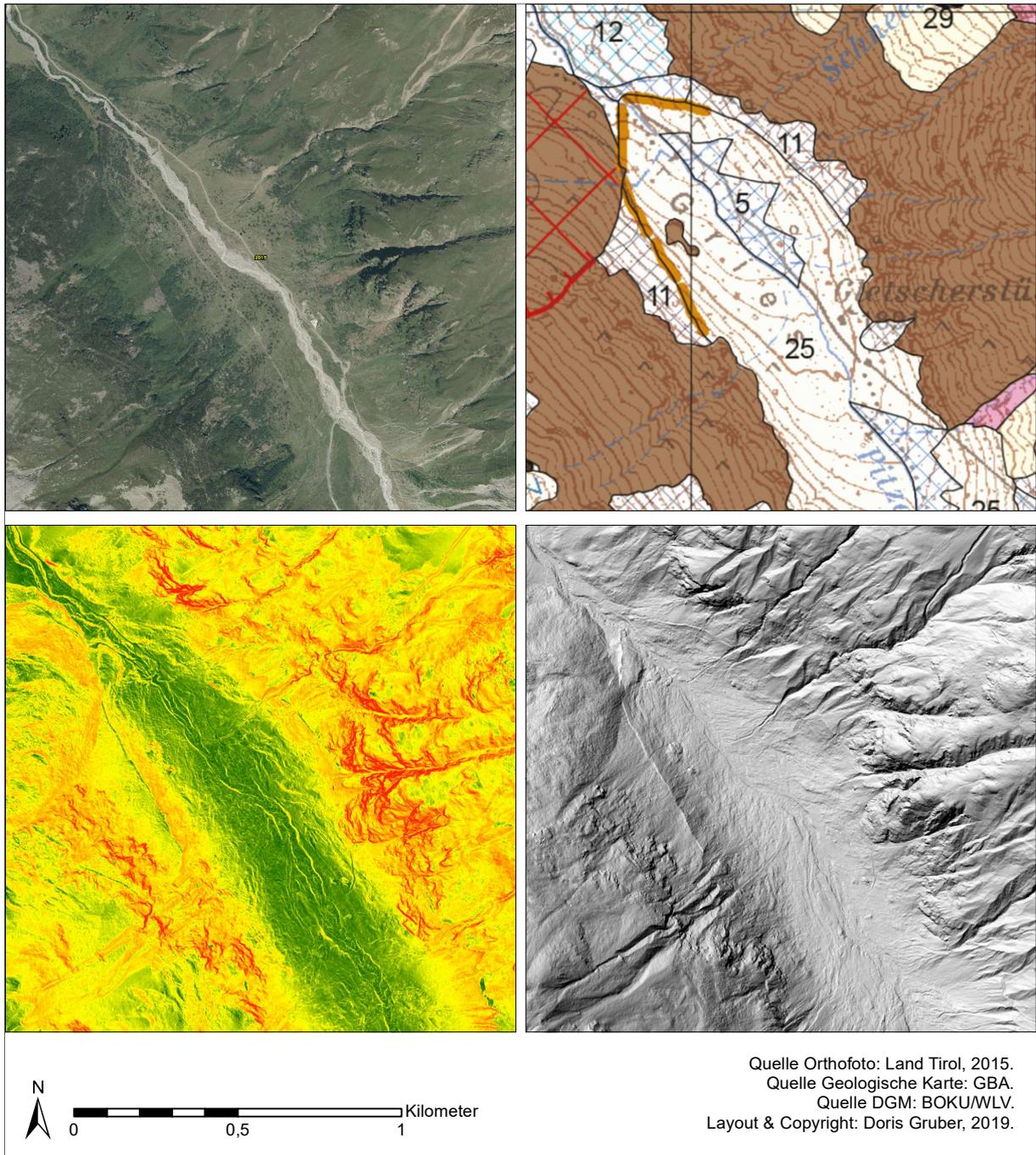
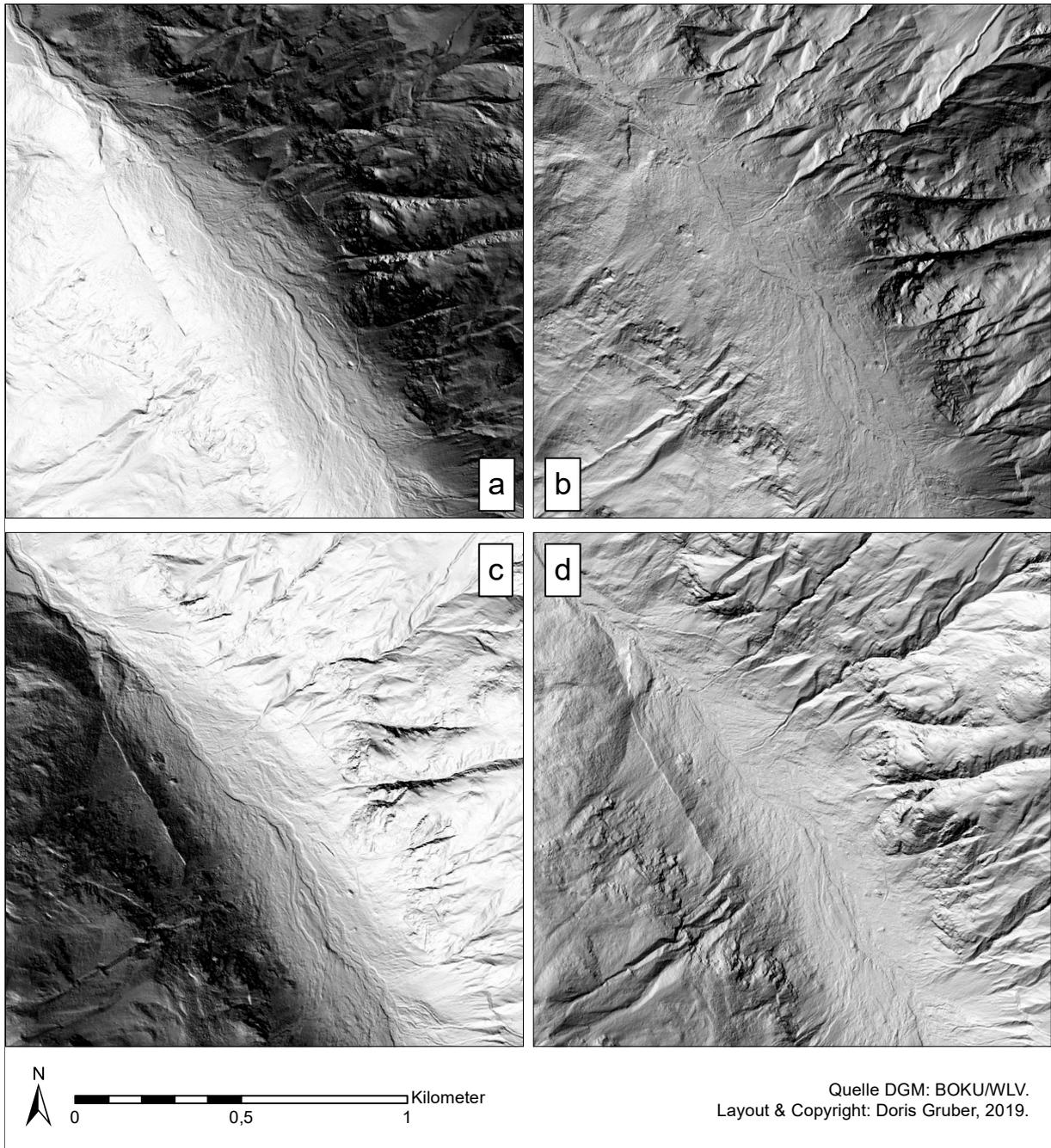


Abbildung 22: Vergleich der Kartiergrundlagen eines ausgewählten Ausschnitts des Untersuchungsgebietes (Beispiel 6).



**Abbildung 23: Vergleich der unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen der Schummerungskarte eines Abschnitts des Untersuchungsgebietes (Beispiel 6). a) Azimut 45°; b) Azimut 135°; c) Azimut 225°; d) Azimut 315°; Sonnenhöhe gleichbleibend 45°.**

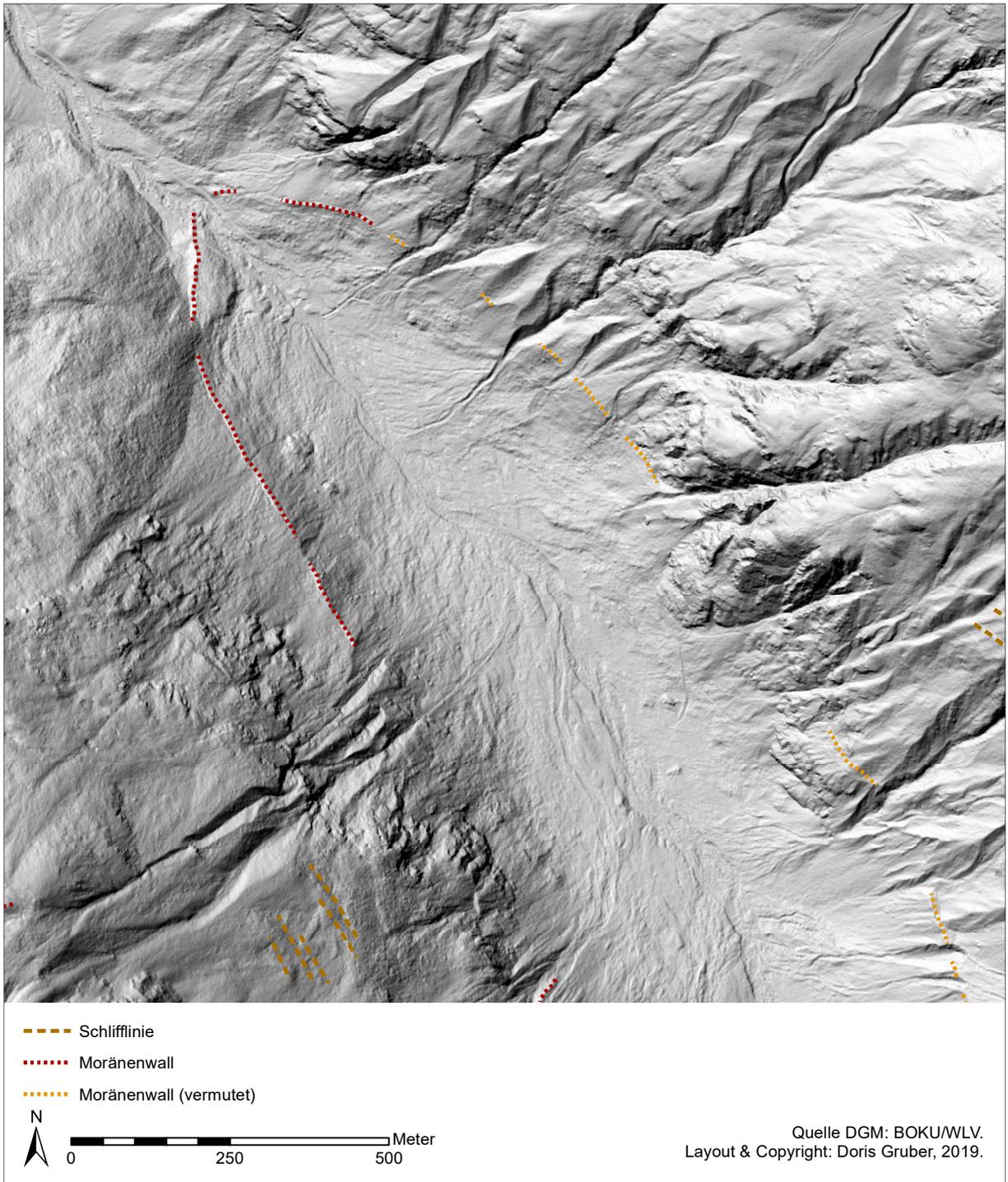


Abbildung 24: Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit kartierten glazialen Geländeformen (Beispiel 6).

Mithilfe der Schummerungskarten und der anderen Kartiergrundlagen wurden nicht nur die gezeigten Beispiele kartiert, sondern das gesamte Untersuchungsgebiet (siehe Anhang).

Im Zuge dieser Kartierung/Interpretation konnten zwar zahlreiche glaziale Formen gut erkannt und ehemalige Gletscher-Fließrichtungen nachvollzogen werden, jedoch wurde mit der verwendeten Methode im Untersuchungsgebiet kein Bereich gefunden, welcher eindeutig auf einen während der letzten Eiszeit bestehenden Eisdome hinweisen würde. Ebenso wenig war die genaue Festlegung von Schriffgrenzen möglich. Dennoch konnten im Zuge der Forschungsarbeit wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, welche in den beiden folgenden Kapiteln behandelt werden.

## 6. Diskussion

In diesem Kapitel werden die verwendete Forschungsmethode, die gewählten Datengrundlagen sowie die Ergebnisse diskutiert und kritisch hinterfragt.

Als Methode zur Untersuchung der Forschungsfrage wurde die GIS-basierte Kartierung gewählt, da GIS in bisherigen Studien hauptsächlich zur Verortung und Darstellung der Ergebnisse herangezogen wurde, jedoch nicht zur Analyse von Fernerkundungsdaten. GIS-basierte Kartierung steht in dieser Arbeit als Synonym für die Kartierung durch Interpretation eines hochaufgelösten Laserscan-Geländemodells und dessen Derivate mittels GIS.

Die Methode hat im Allgemeinen den Vorteil, große Gebiete in vergleichsweise kurzer Zeit zu untersuchen. Sie kann desweiteren wetter- und jahreszeitenunabhängig durchgeführt werden, was vor allem für Untersuchungsgebiete im Hochgebirge einen wichtigen Vorteil bringt. Unwegsames Gelände kann mithilfe der Methode ebenfalls schneller und einfacher ergründet werden als durch Feldbegehung. Die Interpretation von DGMs ermöglicht außerdem, großflächige Gebiete wie das Untersuchungsgebiet vollflächig zu kartieren und zu untersuchen. Im Falle dieser Arbeit sind all diese eben genannten Vorteile geltend geworden, da die Kartierung aus zeitlichen Gründen im Winter durchgeführt wurde und keine Möglichkeit für die ursprünglich geplante stichprobenartige Feldbegehung gegeben war. Dies rückt aber auch einen Nachteil der GIS-basierten Kartierung ins Licht: Unsicherheiten, welche in der anschließenden Feldbegehungen nachkontrolliert beziehungsweise beseitigt werden hätten sollen, konnten im Zuge dieser Arbeit nun nicht überprüft werden. Feldbegehung oder Feldforschung ist folglich nicht ersetzbar und sollte, wenn möglich, ergänzend zur gewählten Methode durchgeführt werden. Die Interpretation und Analyse von DGMs ist dennoch eine wichtige Forschungsmethode in der Geographie und seinen Nachbardisziplinen, da so Gebiete identifiziert und eingegrenzt werden können, in denen weitere Forschung notwendig scheint. Neben der Analyse von Geodaten sind geographische Informationssysteme außerdem auch bei der Darstellung der Ergebnisse nicht mehr wegzudenken. Auch wenn es immer wieder Datenlücken gibt (etwa in bebautem Gebiet, oder über Wasserflächen), so sind diese im Vergleich mit der Fülle der nutzbaren Daten vernachlässigbar klein. Vorteile und Nachteile bringt die Methode in bewaldeten Gebieten, da die Bewaldung einerseits weggerechnet werden kann und die tatsächliche Geländeoberfläche dargestellt werden kann; andererseits bringt dieser Rechenvorgang auch mögliche Fehlerquellen mit sich. Im Falle dieser Arbeit brachten die bewaldeten Flächen jedoch keine Probleme, da deren Flächenanteil im Untersuchungsgebiet aufgrund der Seehöhe sehr gering ist. Mehr Schwierigkeiten brachte hingegen die Schneebedeckung, da die speziell für die hier untersuchte Forschungsfrage wichtigen Schlifffgrenzen oft unter der Schneebedeckung versteckt und somit nicht bestimmbar waren. Die Methode ist

schlussendlich voll und ganz von den vorhandenen Datensätzen abhängig, welche – vor allem bei der benötigten hohen Datenqualität und Auflösung – oft auch teuer in der Anschaffung sein können. Die GIS-basierte Kartierung benötigt außerdem eine geeignete, spezifische Software, welche ebenfalls erworben werden muss. Hier gibt es allerdings auch kostenlose Alternativen, welche ebenso gute Ergebnisse bringen können. Kenntnisse in der Bedienung des Programms werden allerdings bei jeder Software benötigt. Dennoch bringt die Analyse und Interpretation von Fernerkundungsdaten mittels GIS eine enorme Informationsfülle, welche auf anderem Wege nur mühsam oder gar nicht zu gewinnen wäre. Die Interpretation der Daten verlangt ebenfalls Fachwissen und Kenntnis der geomorphologischen Formen und ist an sich subjektiv, weshalb eine genaue Dokumentation und Erklärung der Vorgehensweise sowie eindeutige Definitionen bei dieser Methode von höchster Wichtigkeit sind. Die Dokumentation ist nicht nur für die Nachvollziehbarkeit durch Außenstehende wichtig, sondern auch für die Kartierung während der Forschungsarbeit selbst von Vorteil. Denn nur so können auch große Untersuchungsgebiete – deren Untersuchung längere Zeit in Anspruch nimmt – über einen langen Zeitraum hinweg möglichst homogen kartiert werden.

Die Datenanschaffung an sich kann sich ebenfalls entweder als einfach oder als schwierig herausstellen. Einerseits werden heutzutage viele Daten kostenlos und für alle erhältlich zur Verfügung gestellt (open source), andererseits sind diese oft in ihrer Qualität eingeschränkt, etwa durch geringere Auflösung oder durch das Fehlen von Metadaten. Gerade hochauflösende Laserscan-Daten sind oftmals schwierig zu erhalten beziehungsweise bringen in ihrer Anschaffung hohe Kosten. Im Falle dieser Arbeit wurden sie für Forschungszwecke jedoch freundlicherweise kostenlos zur Verfügung gestellt. Die Verfügbarkeit und Kosten der DGM-Daten unterscheiden sich in Österreich prinzipiell von Bundesland zu Bundesland. Ein weiterer möglicher Nachteil der Verwendung von nicht selbst erhobenen Daten beziehungsweise Sekundärdaten wie Laserscan-Daten ist, dass deren Qualität nicht immer nachprüfbar ist und man voll und ganz auf deren Güte angewiesen ist. Die Datenquellen beziehungsweise die Urheber sollten daher vor der Verwendung der Daten im Zweifelsfall auf deren Seriosität überprüft werden. Stammen die Daten – wie in diesem Fall – von allgemein anerkannten Quellen, so kann man diese gewissenhaft weiterverwenden. Hat man schließlich qualitativ hochwertige Daten zur Verfügung, kann man oftmals viele verschiedene Informationen aus einem Datensatz gewinnen (zum Beispiel die Derivate aus einem DGM). Im Zuge dieser Arbeit wurden neben dem DGM noch das Orthofoto und die geologischen Karten verwendet, welche als open source Datensätze kostenlos und einfach zu finden und auch herunterzuladen waren. Die geologischen Karten waren zwar bei der Bestätigung der Moränenwälle hilfreich, jedoch wurden im Zuge dieser Arbeit auch viele Moränen kartiert, welche in den DGM-Derivaten eindeutig erkennbar, in den geologischen Karten allerdings nicht eingezeichnet waren. Die

GEOFAST-Karten werden desweiteren überwiegend aus Archivunterlagen der GBA erstellt, welche nicht durch zusätzliche Geländebegehungen überprüft werden. Es kann daher zu Diskontinuitäten zwischen den verwendeten Kartenunterlagen verschiedener Autoren kommen, welche sich beispielsweise als Sprünge in den Konturlinien oder voneinander abweichende Benennungen gleicher Flächen äußern (vgl. GBA<sup>[10]</sup>). Im Falle der vorliegenden Arbeit betraf das vor allem die Moränen, welche in Blatt 172 (Weißkugel) anders klassifiziert sind als in Blatt 173 (Sölden), wie in Tabelle 2 zu sehen ist. Die Klassifikation und Benennungen der Moränen der GEOFAST-Karten zeigen auch, dass deren Datierung nur sehr grob erfolgte und auch hier – benötigte man genauere Zeitangaben – weitere Feldforschung beziehungsweise Feldarbeit betrieben werden müsste, etwa Radio-Datierung mithilfe kosmogener Nuklide (siehe IVY-OCHS et al. 2008).

**Tabelle 2: Vergleich der unterschiedlichen Moränen-Klassifikation der GEOFAST-Karten (Blatt 172 – Weißkugel und Blatt 173 – Sölden) (siehe GBA).**

	Blatt 172 - Weißkugel	Blatt 173 - Sölden
Holozän	Junge Moräne (Moränen der neuzeitlichen Gletscherhochstände)	Junge Moränen (der neuzeitlichen Gletscherhochstände)
Pleistozän (Würm)	Moränen (undifferenziert, auch umgelagert)	Moränenstreu
	Moränenstreu	Moränenstreu vermischt mit Hangschutt
	Moränen der Seitentalgletscher, Rückzugsstadien (Spätglazial)	Moränen (Würm – postglazial)

Die geologischen Karten waren im Zuge der Kartierung dennoch hilfreich und wichtig, da mit ihrer Hilfe anhand des DGMs so interpretierte Moränenwälle bestätigt werden konnten. Die geologischen Karten dienten sozusagen zur Validierung der Interpretation. Sie zeigen außerdem Störungslinien, Zerrspalten, Abrisskanten und dergleichen an, welche anhand der anderen verwendeten Kartiergrundlagen teilweise nur schwer oder gar nicht von anderen linienförmigen Objekten (wie zum Beispiel Erosionsrinnen, Moränenwälle, Schlifflinien) zu unterscheiden waren. Die verwendeten Datengrundlagen (DGM, Orthofoto und geologische Karten) ergänzten sich folglich sinnvoll für die Interpretation beziehungsweise Kartierung der ausgewählten geomorphologischen Formen.

Mithilfe aller Datengrundlagen waren die ausgewählten geomorphologischen Formen im Untersuchungsgebiet daher gut sichtbar und erkennbar. Es waren sowohl ehemals vergletscherte Bereiche als auch die Fließrichtung des Eises ablesbar, allerdings konnten mithilfe der gewählten Forschungsmethode weder Anzeichen auf einen ehemals

existierenden Eisdome noch genaue Schlifffgrenzen festgestellt werden. Diese wurden entweder, bedingt durch physikalische Verwitterung, bereits abgetragen oder überlagert. Oft sind die gesuchten Bereiche außerdem durch die auch im Sommer vorhandene Schneebedeckung versteckt, was diese Methode in Hochgebirgsregionen allgemein limitiert. Man könnte mithilfe der verwendeten Methode und den verfügbaren Daten im Untersuchungsgebiet daher maximal einen breiten Streifen definieren, in welchem sich die Schlifffgrenze theoretisch befinden könnte. Da selbst das jedoch noch sehr unsicher erscheint und weitere Untersuchungen – vor allem Feldforschung – notwendig wären, welche den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden, wurde davon abgesehen. Weitere Forschung wäre auch für die Datierung der kartierten Formen notwendig, da dies mittels Interpretation von Fernerkundungsdaten selbstverständlich nicht möglich ist. Da, wie zu Beginn erwähnt, im Zuge dieser Arbeit allerdings davon ausgegangen wird, dass die jüngere Vergletscherung im Untersuchungsgebiet den durch ältere Vergletscherungen vorgegebenen Formen und Tälern folgt, wurde hier kein großer Wert auf das Alter der Formen gelegt. Man muss sich aber bewusst sein, dass es sich bei einem großen Teil der kartierten Objekte um relativ junge Ablagerungs- und Erosionsformen handeln wird, da ältere Formen im Laufe des langen Zeitraumes seit der letzten Eiszeit teils bis zur Unkenntlichkeit überprägt werden konnten.

Die Ergebnisse der Kartierung können außerdem nur beispielhaft dargestellt werden, da es sich im Zuge dieser Arbeit um ein sehr großes Untersuchungsgebiet handelt (rund 560 km<sup>2</sup>) und ein geeigneter Kartenmaßstab für die Darstellung notwendig ist, um die ausgewählten glazialen Geländeformen erkennbar darzustellen. Die Auswahl der in der Arbeit abgebildeten Teilbereiche ist wiederum subjektiv und kann die Einschätzung der Ergebnisse durch Außenstehende stark beeinflussen. Um dies zu verhindern wurde versucht, die Ergebnisse anhand von für das ganze Gebiet aussagekräftigen Beispielen in Kartenform darzustellen und diese möglichst objektiv (lediglich nach Lage, Ausrichtung und Aussehen) zu beschreiben. Neben den Ausschnitten des fertig kartierten Untersuchungsgebietes wurden aus diesem Grund zusätzlich auch stets die Kartiergrundlagen des gleichen Bereichs gezeigt. Eine Gesamtkarte des kartierten Untersuchungsgebietes findet sich der Vollständigkeit halber im Anhang.

Obwohl die verwendete Methode und die verfügbaren Datengrundlagen im Untersuchungsgebiet die Definition von Schlifffgrenzen nicht zulassen und auch keine Anzeichen eines heute verschwundenen, eiszeitlichen Eisdoms gefunden werden konnten, sind die Ergebnisse dieser Arbeit dennoch aussagekräftig und nützlich. Ein Ergebnis ist etwa, dass die Interpretation von DGMs zwar prinzipiell viele Informationen bringt, es aber auch einige Limitierungen gibt und Feldforschung in vielerlei Hinsicht nicht ersetzbar ist. Die mithilfe der verwendeten Methode erlangten Informationen können Feldforschung unterstützen und vereinfachen, da für bestimmte Forschungsthematiken interessante Bereiche im Vorhinein abgegrenzt werden können und die Feldbegehung somit

zielorientierter durchgeführt werden kann. Die erhaltene Informationsmenge und -qualität ist allerdings stark von den verfügbaren Daten abhängig, welche im Zuge dieser Arbeit einfach zu erhalten und zielführend waren. Generelle Informationen zum Untersuchungsgebiet, wie sie in Kapitel 4 vorgestellt werden, sind ebenfalls wichtig für die gewählte Methode und die Interpretation der Ergebnisse. Eine weitere Voraussetzung für die Funktionalität der Methode ist die Gegebenheit des Untersuchungsgebietes generell, wobei sich Hochgebirgsregionen prinzipiell gut eignen, da geringe Bebauung und Bewaldung – also wenig störende Faktoren im DGM – sicherlich von Vorteil sind. Nachdem Feldforschung in Hochgebirgsregionen wie den Öztaler Alpen große Herausforderungen und Anstrengungen bedeutet, ist die Interpretation von Laserscan-Daten im Vorhinein eine hilfreiche und nicht zu unterschätzende Forschungsmethode.

Neben der im Zuge dieser Arbeit vollzogenen *direkten* Analyse von Laserscan Daten (= visuelle DGM-Interpretation) können diese auch *indirekt* analysiert werden (vgl. HÖFLE & RUTZINGER 2011). Diese indirekte Analyse basiert auf einer vorhergehenden Abstraktion und Verarbeitung der Daten, wie zum Beispiel einer automatisierten Klassifikation oder Objekterkennung (vgl. ebd.). Eine Möglichkeit wäre hier die Bestimmung der Oberflächenrauigkeit, welche im Zuge dieser Arbeit jedoch bewusst nicht durchgeführt wurde, da die Oberflächenrauigkeit zum einen häufig (wie ursprünglich) zur Unterscheidung von unterschiedlicher Landbedeckung herangezogen wird (welche im hier verwendeten Datensatz bereits zuvor weggefiltert worden ist und dieser somit nur eingeschränkt zur Verfügung stand) (vgl. ebd.); zum anderen ist die Bodenauflösung der verfügbaren Laserscan Daten mit einem mal einem Meter zu gering um die gesuchten Schriffspuren oder Schriffgrenzen anhand der Oberflächenrauigkeit zu erkennen. Eine visuelle, nicht automatisierte Untersuchung der Daten des Untersuchungsgebietes – bei der auch gleich die geomorphologischen Formen kartiert wurden – war daher unumgänglich. Bei anderen Fragestellungen mit großflächigeren Untersuchungsobjekten – wie zum Beispiel bei der Untersuchung von gravitativen Massenbewegungen – ist die Berechnung der Oberflächenrauigkeit beziehungsweise eine automatisierte Objekterkennung aber sicherlich gewinnbringend (siehe z.B. BOOTH et al. 2009, GLENN et al. 2006). HÖFLE & RUTZINGER (2011) nennen weitere Anwendungsbeispiele. Schließlich wäre eine verlässliche, automatisierte Objekterkennung für die Bestimmung von geomorphologischen Geländeformen prinzipiell nützlich, da sie die Interpretation der Laserscan Daten nochmals beschleunigen und vor allem objektiver sowie für Außenstehende besser nachvollziehbar machen würde. Grundvoraussetzungen sind diesbezüglich eine hohe Datenqualität (Auflösung) und die generelle Verfügbarkeit von Laserscan Daten für das zu untersuchende Gebiet. Wie beim manuellen Interpretieren von Geländeformen ist aber auch bei der

automatisierten Objekterkennung Expertenwissen notwendig um die Analyse-Software dementsprechend zu programmieren.

Im folgenden und letzten Kapitel werden abschließend Schlussfolgerungen und Zukunftsperspektiven gegeben sowie die zu Beginn formulierte Forschungsfrage beantwortet.

## 7. Schlussfolgerungen und Zukunftsperspektiven

Neben der Beantwortung der Forschungsfrage soll die vorliegende Arbeit im letzten Kapitel in das aktuelle Forschungsspektrum eingebettet und in Perspektive gebracht werden. Desweiteren soll deren Nutzen für das Forschungsfeld hervorgehoben werden.

Das Hauptziel dieser Masterarbeit war, die Methode der GIS-basierten geomorphologischen Kartierung zur Findung eines während der letzten Eiszeit bestehenden Eisdoms zu testen. Durch Interpretation von Laserscan-Daten (DGM inklusive Derivate) und deren Vergleich mit Orthofotos und geologischen Karten, sollte der ursprünglich von SEGUINOT et al. (2018) in den Öztaler Alpen postulierte Eisdom anhand ausgewählter geomorphologischer Formen gefunden und bestätigt werden. GIS wurde in bisherigen Studien zu diesem Thema hauptsächlich zur Verortung und Darstellung von im Feld gewonnenen Ergebnissen verwendet, nicht jedoch zur tatsächlichen Datengewinnung beziehungsweise -analyse. Geplant war, eine Abgrenzung von ehemals vergletscherten zu noch nie vergletscherten Bereichen (Schliff versus Nunataker) durchzuführen, also Schlifffgrenzen zu finden und zu kartieren. Folgende Forschungsfrage sollte untersucht werden:

- Kann der in den Öztaler Alpen postulierte eiszeitliche Eisdom mithilfe von GIS-basierter Kartierung von ausgewählten glazialen Geländeformen gefunden bzw. bestätigt werden?

Im Zuge dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass diese Frage mit der verwendeten Methode zumindest im hier gewählten Untersuchungsgebiet mit den verfügbaren Daten verneint werden muss. Limitierend wirkten vor allem die starke geomorphologische Überprägung (durch jüngere Vergletscherungen und gravitative Massenbewegungen) des Gebietes in dem langen Zeitraum seit der letzten Eiszeit sowie die Schneebedeckung in den zur Beantwortung der Forschungsfrage relevanten Höhenlagen.

Die vorliegende Masterarbeit zeigt aber dennoch, dass die Einsatzmöglichkeiten der Methode der GIS-basierten geomorphologischen Kartierung noch nicht ausgeschöpft sind und mit ihrer Hilfe wichtige Erkenntnisse gewonnen werden können. Vor allem in Kombination mit Feldforschung kann sie gewinnbringend sein, da auch große und/oder schwer zugängliche Gebiete in vergleichsweise kurzer Zeit und relativ einfach untersucht werden können. Es können also zeitsparend und witterungsunabhängig thematisch interessante Gebiete herausgefiltert werden um gezieltere Feldforschung zu ermöglichen.

Es kann außerdem nicht prinzipiell ausgeschlossen werden, dass unter bestimmten Grundvoraussetzungen ehemals existierende eiszeitliche Eisdome tatsächlich mithilfe von Fernerkundungsdaten und deren Aufbereitung im GIS gefunden und kartiert werden können. Die Grundvoraussetzungen sind dabei eine gute Datenqualität (hohe Datenauflösung), wenig beziehungsweise keine Schneebedeckung, geringer anthropogener Einfluss auf das Relief und ein geeigneter geologischer Untergrund.

Die Festlegung von exakten Schlifffgrenzen mittels GIS-basierter Kartierung scheint jedoch selbst bei guter Datenauflösung kaum möglich, da das Relief in den letzten Jahrtausenden durch jüngere Vergletscherungen und gravitative Massenbewegungen zu stark überprägt wurde. Es könnten daher höchstens breite Bereiche angegeben werden, in denen sich die Schlifffgrenze befinden könnte. Die genaue Abgrenzung von Schriff und Nunataker wie sie etwa von VAN HUSEN in seiner Vergletscherungskarte (1987) vollzogen wurde ist daher zumindest mit der für diese Arbeit gewählten Methode nicht möglich. Stellenweise kann eine genaue Schlifffgrenze sicherlich erhoben werden, Feldforschung ist hierfür jedoch unumgänglich. Um Gewissheit darüber zu erlangen, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Im Nachhinein gesehen müsste man eventuell das Untersuchungsgebiet vergrößern, um die Chance zu erhöhen, Geländeformen, welche auf einen eiszeitlichen Eisdome hindeuten, zu finden. Es sollten zumindest die gesamten Ötztaler Alpen (inklusive Südtiroler Teil) untersucht werden, was allerdings bei der Datenbeschaffung und Datenverarbeitung Schwierigkeiten bringen kann, da die Datenmengen enorm wären. Dies würde auch den Rahmen einer Masterarbeit sprengen und kann in zukünftigen Projekten abschnittsweise untersucht werden.

Ein Blick in die Zukunft zeigt daher großes Forschungspotenzial auf diesem Gebiet um die Geschichte unseres Landes besser kennen- und verstehen zu lernen. Es könnte beispielsweise ein Ansatz entwickelt werden, um die ausgewählten glazialen Geländeformen anhand von Fernerkundungsdaten mithilfe von geeigneten Computer-Programmen automatisch zu identifizieren, zu klassifizieren und zu kartieren. Dies würde die Erforschung von noch größeren Untersuchungsgebieten in noch kürzerer Zeit ermöglichen.

Auch wenn mit der angewandten Methode die Forschungsfrage nicht bejaht werden konnte, so kann man abschließend dennoch sagen, dass GIS-basierte Kartierung zweifellos hilft, zeitsparend thematisch interessante Gebiete herauszufiltern um gezieltere Feldforschung zu ermöglichen. Die Arbeit mit Fernerkundungsdaten ist daher ein wichtiges Mittel der modernen Forschung und wird voraussichtlich auch in Zukunft noch große Vorteile bringen.



## Quellen- und Literaturverzeichnis

ABERMANN J., KUHN M., LAMBRECHT A. & HARTL L. (2013): Gletscher in Tirol, ihre Verteilung und jüngsten Veränderungen. – In: KOCH E.-M. & ERSCHBAMER B. (Hrsg.): Klima, Wetter, Gletscher im Wandel. – Innsbruck University Press, Kapitel 3, S.49-67.

AHNERT F. (2009): Einführung in die Geomorphologie. – 4. Auflage, Stuttgart.

BOOTH A.M., ROERING J.J. & PERRON J.T. (2009): Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon. – In: *Geomorphology* 109, S.132-147.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.027>

BORTENSCHLAGER S. (2010): Vegetationsgeschichte im Bereich des Rotmoostales. – In: KOCH E.-M. & ERSCHBAMER B. (Hrsg.): Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl. – Innsbruck University Press, Kapitel 4, S.77-91.

EBERL B. (1930): Die Eiszeitenfolge im nördlichen Alpenvorland (Iller-Lech-Gletscher). – Augsburg.

ELLENBERG H. (1963): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. – 1. Auflage, Stuttgart.

EMBLETON-HAMANN C. (2007): Geomorphologie in Stichworten. III Exogene Morphodynamik. – 6. neubearbeitete Auflage, Stuttgart.

EMBLETON-HAMANN C., VON ELVERFELDT K. & KEILER M. (2013): Geomorphologie in Stichworten. I Theorie - Methoden - Endogene Prozesse und Formen. – 7. neubearbeitete Auflage, Stuttgart.

FISCHER A. (2010): Klima und Gletscher in Obergurgl. – In: KOCH E.-M. & ERSCHBAMER B. (Hrsg.): Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl. – Innsbruck University Press, Kapitel 3, S.53-72.

GÄRTNER G. & HOFBAUER W. (2012): Zur Diversität der Flechten und Moose der subalpinen Stufe im Raum Obergurgl. – In: KOCH E.-M. & ERSCHBAMER B. (Hrsg.): An den Grenzen des Waldes und der menschlichen Siedlung. – Innsbruck University Press, Kapitel 7, S.163-179.

GLENN N.F., STREUTKER D.R., CHADWICK D.J., THACKRAY G.D. & DORSCH S.J. (2006): Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. – In: *Geomorphology* 73, S.131-148.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.006>

GOUDIE A. (2008): *Physische Geographie. Eine Einführung.* – 4. Auflage, Sonderausgabe, Heidelberg.

HARTL L., KAUFMANN R., SCHALLHART N. & ERSCHBAMER B. (2013): Das Mikroklima waldfreier Standorte in der subalpinen, alpinen und subnivalen Stufe in Obergurgl. – In: KOCH E.-M. & ERSCHBAMER B. (Hrsg.): *Klima, Wetter, Gletscher im Wandel.* – Innsbruck University Press, Kapitel 7, S.165-186.

HÖFLE B. & RUTZINGER M. (2011): Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective. – In: *Zeitschrift für Geomorphologie* 55 (2), S.1-29.

IVY-OCHS S., KERSCHNER H., REUTHER A., PREUSSER F., HEINE K., MAISCH M., KUBIK P.W. & SCHLÜCHTER C. (2008): Chronology of the last glacial cycle in the European Alps. – In: *Journal of Quaternary Science* 23 (6-7), S.559-573.

DOI: <https://doi.org/10.1002/jqs.1202>

KELLY M.A., BUONCRISTIANI J.-F. & SCHLÜCHTER C. (2004): A reconstruction of the last glacial maximum (LGM) ice-surface geometry in the western Swiss Alps and contiguous Alpine regions in Italy and France. – In: *Eclogae Geologicae Helvetiae* 97, S.57-75.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s00015-004-1109-6>

KERSCHNER H. (2009): Gletscher und Klima im Alpenen Spätglazial und frühen Holozän. – In: SCHMIDT R., MATULLA C. & PSENNER R. (Hrsg.): *Klimawandel in Österreich. Die letzten 20.000 Jahre ...und ein Blick voraus.* – In: *Alpine Space – Man & Environment* 6, S.5-26.

KRAINER K. (2010): Geologie und Geomorphologie von Obergurgl und Umgebung. – In: KOCH E.-M. & ERSCHBAMER B. (Hrsg.): Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl. – Innsbruck University Press, Kapitel 2, S.31-52.

MAISCH M. (1982): Zur Gletscher- und Klimageschichte des alpinen Spätglazials. – In: Geographica Helvetica 37 (2), S.93-104.

DOI: <https://dx.doi.org/10.5169/seals-58303>

MAYER R. & ERSCHBAMER B. (2012): Lärchen-Zirbenwälder und Zwergstrauchheiden. – In: KOCH E.-M. & ERSCHBAMER B. (Hrsg.): An den Grenzen des Waldes und der menschlichen Siedlung. – Innsbruck University Press, Kapitel 4, S.99-124.

MAYER R., NAGL F. & ERSCHBAMER B. (2012): Subalpine Wiesen und Weiden – die Kulturlandschaften der subalpinen Stufe. – In: KOCH E.-M. & ERSCHBAMER B. (Hrsg.): An den Grenzen des Waldes und der menschlichen Siedlung. – Innsbruck University Press, Kapitel 1, S.11-37.

NAGL F. & ERSCHBAMER B. (2010): Vegetation und Besiedlungsstrategien. – In: KOCH E.-M. & ERSCHBAMER B. (Hrsg.): Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl. – Innsbruck University Press, Kapitel 6, S.121-143.

PATZELT G. (1977): Der zeitliche Ablauf und das Ausmaß postglazialer Klimaschwankungen in den Alpen. – In: FRENZEL B. (Hrsg.): Dendrochronologie und postglaziale Klimaschwankungen in Europa. – In: Erdwissenschaftliche Forschung Band 13, Wiesbaden, S.248-259.

PENCK A. & BRÜCKNER E. (1901/1909): Die Alpen im Eiszeitalter. – 3 Bände, Leipzig.

PFADENHAUER J. S. & KLÖTZLI F. A. (2014): Vegetation der Erde. Grundlagen, Ökologie, Verbreitung. – Berlin, Heidelberg.

DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41950-8>

PFEIFER N. & MANDLBURGER G. (2009): LiDAR data filtering and DTM generation. – In: SHAN J. & TOTH C.K. (Hrsg.): Topographic Laser Ranging and Scanning - Principles and Processing. – CRC Press, Taylor & Francis, London, S.307-334.

DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420051438>

SCHAEFER I. (1957): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Augsburg und Umgebung 1:50.000, mit einem paläontologischen Beitrag von R. DEHM. – Geologisches Landesamt, München.

SCHAEFER I. (1965): The succession of fluvioglacial deposits in the northern alpine foreland. – In: University of Colorado Studies, Series of Earth Sciences 7, S.9-14.

SCHÖNWIESTE C.-D. (2008): Klimatologie. – 3. Auflage, Stuttgart.

SCHREINER A. & EBEL R. (1981): Quartärgeologische Untersuchungen in der Umgebung von Interglazialvorkommen im östlichen Rheingletschergebiet (Baden-Württemberg). – In: Geologisches Jahrbuch, Reihe A, 59, S.3-64.

SCHROEDER F.-G. (1998): Lehrbuch der Pflanzengeographie. – Verlag Quelle & Meyer, Wiesbaden.

SCHUSTER R., DAURER A., KRENMAYR H.G., LINNER M., MANDL G.W., PESTAL G. & REITNER J.M. (2013): Rocky Austria. Geologie von Österreich – kurz und bunt. – Geologische Bundesanstalt, Wien.

SEGUINOT J., JOUVET G., HUSS M., FUNK M., IVY-OCHS S. & PREUSSER F. (2018): Modelling last glacial cycle ice dynamics in the Alps. – Manuscript under review for: The Cryosphere.

DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-2018-8>

SITHOLE G. & VOSSELMAN G. (2004): Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. – In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 59 (1-2), S.85-101.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2004.05.004>

VAN HUSEN D. (1987): Die Ostalpen in den Eiszeiten. – Geologische Bundesanstalt, Wien.

VEIT H. (2002): Die Alpen. Geoökologie und Landschaftsentwicklung. – Stuttgart.

ZUAN M. (2008): GIS-basierte geomorphologische Kartierung im Sihlwald mittels hochauflösendem Laserscan-Geländemodell. – Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich.

## Weiterführende Literatur

BALLANTYNE C.K., MCCARROLL D. & STONE J.O. (2007): The Donegal ice dome, northwest Ireland: dimensions and chronology. – In: *Journal of Quaternary Science* 22 (8), S.773-783.

DOI: <https://doi.org/10.1002/jqs.1116>

BARRY R.G. (2012): Recent advances in mountain climate research. – In: *Theoretical and Applied Climatology* 110, S.549-553.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0695-x>

BUONCRISTIANI J.-F. & CAMPY M. (2011): Quaternary Glaciations in the French Alps and Jura. – In: EHLERS J., GIBBARD P.L. & HUGHES P.D. (Hrsg.): *Developments in Quaternary Science*, Vol. 15, S.117-126, Amsterdam.

COHEN D., GILLET-CHAULET F., HAEBERLI W., MACHGUTH H. & FISCHER U.H. (2018): Numerical reconstructions of the flow and basal conditions of the Rhine glacier, European Central Alps, at the Last Glacial Maximum. – In: *The Cryosphere* 12, S.2515-2544.

DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-12-2515-2018>

DÜRST STUCKI M. & SCHLUNEGGER F. (2013): Identification of erosional mechanisms during past glaciations based on a bedrock surface model of the central European Alps. – In: *Earth and Planetary Science Letters* 384, S.57-70.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.10.009>

GJERMUNDSEN E.F., BRINER J.P., AKÇAR N., SALVIGSEN O., KUBIK P., GANTERT N. & HORMES A. (2013): Late Weichselian local ice dome configuration and chronology in Northwestern Svalbard: early thinning, late retreat. – In: *Quaternary Science Reviews* 72, S.112-127.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.04.006>

HECKMANN T. & MORCHE D. (Hrsg.)(2019): *Geomorphology of Proglacial Systems*. – In: *Geography of the Physical Environment*.

LUKAS S. (2006): Morphostratigraphic principles in glacier reconstruction – a perspective from the British Younger Dryas. – In: *Progress in Physical Geography* 30 (6), S.719-736.

DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133306071955>

MEY J., SCHERLER D., WICKERT A.D., EGHOLM D.L., TESAURO M., SCHILDGEN T.F. & STRECKER M.R. (2016): Glacial isostatic uplift of the European Alps. – In: *Nature Communications* 7, S.1-9.

DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms13382>

NAPIERALSKI J., HARBOR J. & LI Y. (2007): Glacial geomorphology and geographic information systems. – In: *Earth-Science Reviews* 85, S.1-22.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.06.003>

NORTON K.P., ABBÜHL L.M. & SCHLUNEGGER F. (2010): Glacial conditioning as an erosional driving force in the Central Alps. – In: *Geology* 38 (7), S.655-658.

DOI: <https://doi.org/10.1130/G31102.1>

PREUSSER F., REITNER J.M. & SCHLÜCHTER C. (2010): Distribution, geometry, age and origin of overdeepened valleys and basins in the Alps and their foreland. – In: *Swiss Journal of Geosciences* 103, S.407-426.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s00015-010-0044-y>

SEGUINOT J., IVY-OCHS S., JOUVET G., HUSS M., FUNK M. & PREUSSER F. (2018): Modelling last glacial cycle ice dynamics in the Alps. – In: *The Cryosphere* 12, S.3265-3285.

DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-12-3265-2018>

STERNAI P., HERMAN F., CHAMPAGNAC J.-D., FOX M., SALCHER B. & WILLETT S.D. (2012): Pre-glacial topography of the European Alps. – In: *Geology* 40 (12), S.1067-1070.

DOI: <https://doi.org/10.1130/G33540.1>

## Internetquellen

- [1] Esri: [www.esri.com](http://www.esri.com)
- [2] ScienceDirect: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [3] Wiley Online Library: [www.onlinelibrary.wiley.com](http://www.onlinelibrary.wiley.com)
- [4] ResearchGate: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)
- [5] Google Scholar: [scholar.google.at](http://scholar.google.at)
- [6] Bibliothek Uni Wien: [usearch.univie.ac.at](http://usearch.univie.ac.at)
- [7] Bibliothek Uni Innsbruck: [bibsearch.uibk.ac.at](http://bibsearch.uibk.ac.at)
- [8] Land Tirol: [www.tirol.gv.at/data](http://www.tirol.gv.at/data)
- [9] Open Government Data: [www.data.gv.at](http://www.data.gv.at)
- [10] GBA: [www.geologie.ac.at](http://www.geologie.ac.at)
- [11] TIWAG: [www.tiwag.at](http://www.tiwag.at)
- [12] HISTALP, ZAMG: [www.zamg.ac.at/histalp](http://www.zamg.ac.at/histalp)
- [13] eHYD: [ehyd.gv.at](http://ehyd.gv.at)

*(alle zuletzt aufgerufen am 29.06.2019)*

## **Eidesstattliche 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 25.07.2019



## Anhang

### Gesamtkarte des kartierten Untersuchungsgebietes

