

Bachelorarbeit

# **Interaktionen zwischen der Geomorphologie und Vegetation im Gletschervorfeld des Ödenwinkelkees, Stubachtal, Hohe Tauern**

Untersuchung geomorphologischer und ökologischer Gegebenheiten im Gletschervorfeld unter Erstellung eines methodischen Workflows aus Kombination multispektraler Datenaufnahme, GIS Analyse und Referenzdaten der Feldmessung

Zur Erlangung des Grades  
Bachelor of Science

eingereicht von:

Karoline Asta Sol Kraus (11820869)  
karoline.kraus@stud.sbg.ac.at  
am 25.02.2022

Unter Leitung von:

Ass. Prof. Jan-Christoph Otto



## **Abstract**

Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit wird das von den Auswirkungen des Klimawandels betroffene Gletschervorfeld des Ödenwinkelkees auf die Interaktionen zwischen Geomorphologie und Vegetation untersucht. Forschungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel sind von Relevanz, da das gewonnene Wissen im Umgang bei zukünftigen unumgänglichen Entwicklungen Hilfestellung bietet. Im Zuge dessen ist die Generierung und Bereitstellung einer nachhaltigen Forschungsgrundlage für zukünftige Projekte von ForscherInnen essentiell. Zudem kann mit dieser Forschungsarbeit zu einer interdisziplinären Wissensakkumulation in den Bereichen der Geomorphologie und Ökologie sowie deren Wechselwirkungen im alpinen Raum beitragen werden.

Das Ziel der Arbeit ist es die Interaktionen zwischen Geomorphologie und Vegetation im Gletschervorfeld zu analysieren. Gletschervorfelder stellen hochalpine Lebensräume dar, die nach dem Abschmelzen der Gletscher für eine erneute Besiedlung durch Pflanzen und Tiere zur Verfügung stehen. Die Besiedlung oder Wiederbesiedlung dieser Flächen wird stark beeinflusst durch die geomorphologische Prozessdynamik und die lokalen Standortbedingungen. Das Gletschervorfeld wird charakterisiert durch große Mengen an geringverfestigten Sedimenten, die durch den Gletscher und die Schmelzwasseraktivität abgelagert werden. Solange diese Sedimentablagerungen unbewachsen sind können geomorphologische Erosionsprozesse, wie Abspülung, Muren und Rutschungen zu großen Sedimentumlagerungen führen. Diese Prozessdynamik stellt einen Störungsimpuls für die Ansiedlung von Pflanzenarten dar und führt zu einer kleinräumigen Differenzierung zwischen gestörten und nicht-gestörten Arealen, in denen die Besiedlung durch Pflanzen und die Entwicklung der Pflanzengemeinschaften erschwert, beziehungsweise erleichtert wird.

Im Zuge der Studie soll die räumliche Struktur der geomorphologischen Prozesse und Materialien sowie Bedeckungsgrad und die Verteilung der Vegetation im Gletschervorfeld des Ödenwinkelkees erfasst und analysiert werden. Dieses Muster wird anhand von multispektralen Luftbildern für das gesamte Gletschervorfeld kartiert. In Kombination mit einer Aufnahme der geomorphologischen Prozessaktivität wird die Verbreitung der Vegetationsklassen untersucht.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	7
1.1 Hinführung .....	7
1.2 Zielsetzung, Forschungsfrage und Vorgehensweise .....	7
1.3 Aufbau der Arbeit .....	8
<b>2. Theoretische Hintergründe</b> .....	9
2.1 Grundlagen der Biogeomorphologie .....	9
2.1.1 Historie und Definition .....	9
2.2.1 Sukzession .....	9
2.2.2 Störung .....	14
2.2.3 Ökosystemingenieure .....	15
2.2.4 Biogeomorphologisches Rückkopplungsfenster .....	16
2.2.5 Biogeomorphologische Interaktionen .....	17
2.3 Fernerkundung und Vegetation .....	18
2.3.1 Historie und Definition .....	18
2.3.2 Grundlagen der Strahlungsphysik .....	19
2.3.3 Physiologie der Pflanzen .....	20
<b>3. Einführung in das Untersuchungsgebiet</b> .....	27
3.1 Allgemeine Informationen zum Untersuchungsgebiet .....	27
3.2 Vorarbeiten im Untersuchungsgebiet .....	29
<b>4. Methodik</b> .....	31
4.1 Datenaufnahme .....	32
4.2 Datenverarbeitung .....	33
4.3 Klassifikation .....	33
<b>5. Ergebnisse</b> .....	34
5.1 Ergebnisse der geomorphologischen Kartierung .....	34
5.2 Ergebnisse der Punktdatenaufnahme .....	36
5.2.1 Geomorphologische Ergebnisse .....	36
5.2.2 Ökologische Ergebnisse .....	37
5.2.3 NDVI-Werte der Plots .....	39
5.3 Ergebnisse der Klassifikation .....	42
5.3.1 Bedeckungsklassen .....	42
5.3.2 Referenzpunkte .....	44
<b>6. Diskussion und Fazit</b> .....	46
6.1 Methoden .....	46
6.2 Verteilung der Bedeckungsklassen .....	46
6.3 Fehler .....	48
6.4 Fazit .....	50

<b>Literaturverzeichnis</b> .....	52
<b>Anhang</b> .....	55
<b>Eidesstattliche Erklärung</b> .....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Darstellung der Sukzessionsstadien im Zusammenhang mit abiotischen und biotischen Sukzessionstrends der Primärvegetation eines Gletschervorfelds, Quelle: (Eichel, 2019).....	12
Abbildung 2: Konzeptuelles Modell der Biogeomorphologischen Sukzession. Quelle: (Corenblit et al., 2015). .....	13
Abbildung 3: Entstehung biogeomorphologischer Rückkopplungen unter Einbezug der geomorphologischen Prozessfrequenz und -magnitude sowie Resistenz und Resilienz der Pflanzenarten, Quelle: (Eichel, 2016)..	16
Abbildung 4: Schematische Darstellung des passiven Aufnahmeverfahrens der Fernerkundung und möglichem Strahlungsverlust. Quelle: (Jones und Vaughan, 2010). .....	18
Abbildung 5: Elektromagnetisches Spektrum mit den Parametern Frequenz, Wellenlänge und Energie. Quelle: (Jones und Vaughan, 2010) .....	19
Abbildung 6: Schematischer Querschnitt eines Blattes. Zu erkennen sind die enthaltenen Organe sowie vorherrschende Strahlungsverhältnisse. Quelle: (Jacquemoud und Ustin, 2019). .....	22
Abbildung 7: Reflektion (rot), Transmission (blau) und Absorption (Fläche innerhalb der Graphen) einen Blattes der Populus Cadensis. Quelle: (Jacquemoud und Ustin, 2019). .....	23
Abbildung 8: Schematische Darstellung möglicher Strahlungsinteraktionen einer geschlossenen Pflanzendecke, Quelle: (Jones und Vaughan, 2010). .....	24
Abbildung 9: Das Untersuchungsgebiet mit den Gletscherständen der Jahre 1850 bis 2013 mit 1) der Lage, 2) dem Klimadiagramm der letzten 30 Jahre und 3) einem Foto des Trogtals. Quelle: eigene Darstellung mit Daten der ZAMG und Universität Salzburg. ....	28
Abbildung 10: Methodologische Vorgehensweise. Sie ist unterteilt in fünf Gliederungspunkte mit den jeweiligen Schritten. Quelle: eigene Darstellung. ....	31
Abbildung 11: Foto von plot_3 im nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebiets. Quelle: eigene Darstellung. ....	32
Abbildung 12: Geomorphologische Karte des Gletschervorfelds des Ödenwinkelkees. Quelle: eigene Darstellung. ....	35
Abbildung 13: Deskriptive Statistik der Korngrößenverteilung in den Plots. Quelle: eigene Darstellung. ....	36
Abbildung 14: Deskriptive Statistik der Verteilung des Untersuchungsparameters Rundungsgrad in den Plots. Quelle: eigene Darstellung. ....	36
Abbildung 15: Deskriptive Statistik des Vorkommens der Lithologie in den Plots. Quelle: eigene Darstellung. ....	37

Abbildung 16: Deskriptive Statistik der auftretenden Prozessdomänen in den Plots. Quelle: eigene Darstellung. ....	37
Abbildung 17: Deskriptive Statistik des Bedeckungsgrads der Plots. Quelle: eigene Darstellung. ....	38
Abbildung 18: Deskriptive Statistik der NDVI-Wertebereiche der Plots, Quelle: eigene Darstellung. ....	39
Abbildung 19: Darstellung der Plots und deren NDVI-Wertebereiche sowie den Gletscherständen. Quelle: eigene Darstellung. ....	40
Abbildung 20: Thematische Karte des Untersuchungsgebiets. Die Bedeckungsklassen, die Gletscherrückzugsstadien von 1850 bis 2013 und die Referenzpunkte sind enthalten. Quelle: eigene Darstellung. ....	43
Abbildung 21: Deskriptive Statistik des Flächenanteils der Bedeckungsklassen. Quelle: eigene Darstellung. ....	44
Abbildung 22: Screenshots falsch klassifizierter Bereiche des Untersuchungsgebiets. Quelle: eigene Darstellung. ....	49

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Vorhandene Arten in den Plots und Einteilung in Vegetationsklassen. Quelle: eigene Darstellung. ....	38
Tabelle 2: Deskriptive Statistik der Plotanzahl pro NDVI-Klasse und deren Wertebereich. Quelle: eigene Darstellung. ....	39
Tabelle 3: Deskriptive Statistik des Geländealters der Plots. Quelle: eigene Darstellung. ....	41
Tabelle 4: NDVI-Wertebereiche der erstellten Bedeckungsklassen. Quelle: eigene Darstellung. ....	42
Tabelle 5: Deskriptive Statistik der Anzahl und des Anteils der Referenzpunkte pro Bedeckungsklasse. Quelle: eigene Darstellung. ....	44
Tabelle 6: Abgleich der Referenzpunkte in deren vorgegebenen Bedeckungsklasse und der tatsächlichen Bedeckung. Quelle: eigene Darstellung. ....	45

## **Formelverzeichnis**

Formel 1: Summenformel der Reflektion (R), Transmission (T) und Absorption (A). Quelle: (Jacquemoud und Ustin).....	20
Formel 2: Berechnung des NDVI. Quelle: (Jones und Vaughan, 2010.).....	26

# 1. Einleitung

## 1.1 Hinführung

Die erheblichen Abschmelzraten alpiner Gletscher - ausgelöst durch den Klimawandel - haben seit mehr als 170 Jahren ausgedehnte Oberflächen im Hochgebirge freigelegt (Knight und Harrison, 2014), die als Gletschervorfelder bezeichnet werden. Diese sind durch große Mengen an gering verfestigten Sedimenten, durch die Ablagerung von Gletschern und Schmelzwasser charakterisiert. Diese Prozesse sind Teil der sogenannten paraglazialen Anpassung des Systems, welche die Umgebung beim Gletscherrückzug erfährt. Merkmale sind unter anderem häufig auftretende geomorphologische Erosionsprozesse, wie Abspülung, Muren und Rutschungen, die zu großen Sedimentverlagerungen und Sedimentaustträgen führen (Dikau et al., 2019a). Mit dem Gletscherrückzug stehen die Gletschervorfelder für die Besiedlung durch Pflanzen und Tiere zur Verfügung und bilden damit neue Lebensräume sowie Initialräume für die Entwicklung von Biodiversität (Gewolf, 2004).

Allerdings stellt die bestehende geomorphologische Prozessaktivität eines paraglazialen Systems einen signifikanten Störungsimpuls für die Besiedlung und Entwicklung der Pflanzengemeinschaften dar. Die unterschiedlichen Entwicklungsstufen lassen sich durch heterogene Muster im Gebiet erkennen. Die Sukzession im Gletschervorfeld verläuft daher nicht linear zum Eisrückzug, sondern ist abhängig vom räumlichen Auftreten, der Frequenz und dem Ausmaß der geomorphologischen Störungsimpulse. Dieser Zusammenhang wird auch als Interaktion beziehungsweise Rückkopplung zwischen der Geomorphologie und der Vegetation bezeichnet und stellt ein aktuelles Forschungsfeld dar (Dikau et al., 2019b).

Die Untersuchung eines alpinen Gebietes mit diversen aktiven Prozessdomänen, wie dem Gletschervorfeld des Ödenwinkelkees, stellt eine große Chance dar, um die Vegetationsentwicklung in paraglazialen Systemen zu verstehen. Diese werden, durch die Folgen des Klimawandels, zukünftig häufig in weiten Teilen des alpinen Raumes auftreten. Daher ist es umso wichtiger diese Prozesse zu beobachten, zu untersuchen und zu verstehen, um Prognosen für die Zukunft treffen zu können.

## 1.2 Zielsetzung, Forschungsfrage und Vorgehensweise

Das zentrale Thema der Bachelorarbeit ist die Landschaftsentwicklung im Gletschervorfeld des Ödenwinkelkees unter Berücksichtigung geomorphologischer und ökologischer Aspekte. Insofern sollen die Interaktionen zwischen Geomorphologie und Vegetation analysiert werden. Ziel der Bachelorarbeit ist es zunächst eine umfassende Datengrundlage für das Gletschervorfeld des Ödenwinkelkees zu schaffen und in einer thematischen Karte mit Fokus auf geomorphologischer Prozesse und Material sowie Vegetationsbedeckung zu visualisieren. Es sollen methodische Grundlagen im beschriebenen Kontext zugunsten zukünftiger Forschungsprojekte bereitgestellt werden, die ein Monitoring der Veränderungen innerhalb des Gletschervorfelds im Jahresvergleich ermöglichen. Mit der Arbeit wird eine einfache Methodik entwickelt auf Basis von neu aufgenommenen Luftbildern und multispektralen Daten, um geomorphologische Veränderungen und die Besiedlungsdynamik des Gletschervorfelds schnell und akkurat analysieren und quantifizieren zu können.

Die entwickelte Methodik lässt sich auch in anderen Gletschervorfeldern der Hohen Tauern anwenden und bietet somit die Möglichkeit, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Entwicklung der Gletschervorfelder in den Hohen Tauern räumlich zu erfassen und Unterschiede in der Reaktion auf die variierenden Umweltbedingungen herauszuarbeiten. Im Rahmen der Arbeit sollen die folgenden Fragen beantwortet werden.

- Welche räumliche Struktur haben geomorphologische Prozesse und Materialien sowie Vegetationsklassen im Gletschervorfeld des Ödenwinkelkees?
- Beeinflusst das Auftreten geomorphologischer Prozesse und Materialien die Art der Vegetationsklassen?
- Welche Informationen können multispektrale Luftbilder über die Verbreitung von Oberflächenmaterialien und Vegetationsklassen im Gletschervorfeld liefern?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden Geländeaufnahmen als Teil der Fernerkundung, im Englischen auch als *Remote Sensing* bezeichnet, mit GIS Analysen kombiniert. Die Studie basiert zum einem auf sehr hochauflösten, multispektralen Bilddaten, die mit einer Drohne aufgenommen werden sollen. Somit wird die Analyse von Bildinformationen verschiedener Spektralbereiche ermöglicht. Mit diesen lassen sich unterschiedliche Vegetationsparameter erfassen und automatisiert ableiten, wobei die Auflösung der Bildinformationen im Zentimeterbereich liegt. Zum anderen werden zur Analyse und Klassifikation der Luftbildinformationen Referenzflächen im Gelände kartiert. Im Gletschervorfeld werden 1\*1m große Flächen geomorphologisch und ökologisch aufgenommen. Die Referenzflächen dienen dazu, die Spektralinformationen zu interpretieren und gegebenenfalls auszubessern, damit das räumliche Muster in verschiedene Bedeckungsklassen automatisiert differenziert werden kann. Zusätzlich werden geomorphologische Prozesse im Gletschervorfeld aufgenommen und in einer geomorphologischen Karte dargestellt sowie die existierenden Daten zu den Rückzugsstadien des Ödenwinkelkees aufgezeigt. Die so gewonnenen Informationen sollen Erkenntnisse liefern, wie die Vegetationsverbreitung innerhalb der zeitlichen Entwicklung des Gletschervorfelds, durch unterschiedliches Oberflächenmaterial und durch die Verbreitung von geomorphologischen Prozessen beeinflusst wird.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Nach dem Einleitungskapitel wird zunächst der aktuelle Forschungsstand und im Anschluss die theoretischen Hintergründe des Untersuchungsgebiets, die Grundlagen der Biogeomorphologie und der Fernerkundung erläutert. Hierbei werden zunächst die Historie und Definitionen dargelegt, gefolgt von den Grundlagen der Strahlungsphysik, der Physiologie der Pflanzen und den spektralen Indizes. Das Aufgreifen und die Erklärung dieser Zusammenhänge sollen als Basis zum Verständnis des Kapitels zur Methodik dienen. Die Herangehensweise wird anhand des erstellten Workflows im Methodik Kapitel erläutert. Die Untersuchungsergebnisse und GIS Analysen werden im folgenden Kapitel in Form einer thematischen Karte dargestellt. Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert und ein Fazit gezogen.

## 2. Theoretische Hintergründe

### 2.1 Grundlagen der Biogeomorphologie

#### 2.1.1 Historie und Definition

Die Biogeomorphologie beschreibt eine Subdisziplin der Geomorphologie (Larsen *et al.*, 2021). Sie ist die Schnittstelle der Geomorphologie, Biologie und Ökologie und untersucht die gegenseitig wirkenden Interaktionen zwischen biotischen und abiotisch-dynamischen Landschaftselementen, wie unter anderem geomorphologischen Prozessen, Relief sowie Pflanzen- und Vegetationsentwicklung (Corenblit *et al.*, 2015; Dikau *et al.*, 2019b). Die Disziplin wurde in den 1970er Jahren begründet (Larsen *et al.*, 2021) und 1988 durch die Geomorphologin Heather Viles vorgestellt und etabliert (Dikau *et al.*, 2019b).

Im Laufe der Zeit wurden relevante theoretische, methodologische und thematische Fortschritte erzielt. Jedoch stellt die Entwicklung von Theorien und Methoden sowie die Quantifizierung von Prozessen eine Herausforderung aufgrund der vorliegenden Interdisziplinarität und dem ehemals geringen Austausch zwischen den Disziplinen dar (Larsen *et al.*, 2021). Infolgedessen ist ein Großteil der Wechselwirkungen zwischen biotischen und abiotischen Faktoren noch nicht vollständig erforscht (Haselberger *et al.*, 2021) und eine Favorisierung von Untersuchungsgebietstypen lässt sich in der Vergangenheit erkennen. Zu ihnen zählen sedimentäre Küstenumgebungen, fluviale und ufernahe Umgebungen sowie Hänge. Im Gegensatz dazu wurden paraglaziale Umgebungen - wie Gletschervorfelder - in der Vergangenheit weniger häufig untersucht, was einen Anreiz zur vertiefenden Erforschung dieser Räume schafft (Larsen *et al.*, 2021; Miller and Lane, 2019).

Die Betrachtung biogeomorphologischer Prozesse ist relevant, um die Entwicklung diverser Naturräume zu verstehen und gegebenenfalls vorhersagen zu können. Diese Prozesse spielen sich in biogeomorphologischen Ökosystemen ab, welche bedeutende biogeomorphologische Interaktionen mit der Landschaftsentwicklung und deren hoch aktiven Dynamiken der Geomorphologie und Vegetation beinhalten. Sie sind charakterisiert durch eine hohe geomorphologische Instabilität und gleichzeitiger Aktivität. Zudem werden ökologische Strukturen und Funktionen durch Formen der Rückwirkung - als biogeomorphologische Rückkopplungen bezeichnet - stark bestimmt (Dikau *et al.*, 2019b). Ein Beispiel hierfür sind Gletschervorfelder mit einer charakteristisch hohen geomorphologischen Aktivität und Vegetationsentwicklung (Corenblit *et al.*, 2015).

Um das Verständnis der Biogeomorphologie zu vertiefen werden im Folgenden relevante Konzepte und Prozesse der Sukzession, Störungen und Ökosystemingenieuren, welche die Grundlage für biogeomorphologische Rückkopplungsfenster sind, erläutert. Abschließend werden ausgewählte biogeomorphologische Interaktionen vorgestellt.

#### 2.2.1 Sukzession

##### *Definition*

Die Vegetationssukzession ist eine graduell, ausgerichtete Veränderung der Artenzusammensetzung und -struktur, die über einen längeren Zeitraum betrachtet wird. In diesem Prozess folgen sich verschiedene Pflanzengesellschaften mit unterschiedlichen Artenzusammensetzungen in einem spezifischen Raum. Die Initiierung der Vegetationssukzession auf Gletschervorfeldern erfolgt durch die erfolgreiche Migration von Samen, welche sich verteilen, keimen und überleben müssen. Die Migration der Samen ist abhängig von den allgemein vorhandenen Samen in der Umgebung des Gletschervorfelds - dem sogenannten *seed pool* - und der Verbreitungsfähigkeit der Arten. Die Keimung und das Überleben der Samen wird als Ökese bezeichnet und ist stark abhängig von den vorherrschenden Umweltbedingungen, wie beispielsweise Standort, Böden,

Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit sowie Hangneigung und Exposition. Zudem ist die am Standort vergangene Zeit nach dem Gletscherrückzug von Bedeutung. Diese Faktoren führen schließlich zum Sukzessionsantrieb und der Ökosystementwicklung. Die Sukzession kann jedoch auch durch Störungen des Ökosystems ausgelöst werden. Entsprechend dem Grad des biologischen Erbes, welches nach der Störung vorliegt, wird die Sukzession in eine primäre oder sekundäre eingeteilt. Die primäre Sukzession ist gekennzeichnet durch Pflanzen und Tiere, die den betreffenden Standort noch nie zuvor kolonialisiert haben. Hingegen beschreibt die sekundäre Sukzession eine Änderung der Artenzusammensetzung und anderen biotischen Faktoren in bereits bestehenden Ökosystemen nach der Störung. In Gletschervorfeldern wird die Sukzession meist als primär bezeichnet, da die vom Gletschereis freigegebene blanke Fläche häufig kein organisches Material aufweist (Matthews, 1992).

In diesem Zusammenhang sind die zwei Begriffe der Resistenz und der Resilienz zu erläutern, welche zu den Artenmerkmalen gehören. Die Resistenz beschreibt die Widerstandskraft einer Art gegenüber Störungen und weiteren schädlichen Umwelteinflüssen. Die Resilienz beschreibt die Fähigkeit einer Art sich von äußeren schädigenden Einflüssen zu erholen (Gunderson, 2000).

### *Sukzessionsstadien*

Die Vegetationssukzession kann in vier aufeinanderfolgende Stadien eingeteilt werden, die auf der vorherrschenden spezifischen Artenzusammensetzung basieren (Matthews, 1992).

Zu Beginn steht die **Pionierstufe**, welche sich bis zu 15 Jahre nach der Deglaziation ausbildet. Die vorkommenden Arten werden durch deren Merkmale und die Standortbedingungen bestimmt. Die Ausgangsbedingungen sind abiotisch, wie Substrateigenschaften, Klima und Topographie (Matthews, 1992; Matthews und Whittaker, 1987). Nach dem Gletscherrückzug ändern sich die Substrateigenschaften durch Deflations- und Frostsorptionsprozesse und das Pflanzenwachstum, die Artenzusammensetzung und die Sukzessionspfade erfahren eine starke Einflussnahme anhand klimatischer Bedingungen, wie niedrigen Temperaturen aufgrund der Höhenlage und vorherrschenden Gletscherwinden (Matthews, 1992; Raffl *et al.*, 2006). Auf einem kleinem Maßstab betrachtet - im Zentimeter bis Meter Bereich - sind die Samenkeimung und die Etablierung der Pflanzen häufig mit mikrotopographisch geschützten und sicheren Zonen verbunden, wie größere Steine oder Senken (Erschbamer und Nagl, 2010). Diese garantieren meist geringere Windgeschwindigkeiten, Sonneneinstrahlung und höhere Bodenfeuchte (Jumpponen *et al.*, 1999). Pionierarten sind robust. Sie keimen und überleben unter kalten, feuchten Bedingungen. Zusätzlich können sie hohe Sonneneinstrahlungsraten und niedrige Stickstoffraten tolerieren. Sobald sie etabliert sind zeigen sie hohe Wachstumsraten auf, jedoch ist die Mortalität der Keimlinge und Jungpflanzen ausgeprägt (Marcante *et al.*, 2009). Trotz der generell geringen Individuumsdichte mit 3-4 Pflanzen pro m<sup>2</sup> und dem somit geringen Bedeckungsgrad (Erschbamer und Nagl, 2010) erschaffen sie nach ihrer Etablierung einen neuen Lebensraum für nachfolgende Arten. So gibt es Pionierarten, die atmosphärischen Stickstoff aufnehmen und diesen neben anderen Elementen wie Kohlenstoff speichern können. Als Folge werden im Laufe der Zeit die Böden nährstoffreicher (Raffl *et al.*, 2006). Charakteristische Pionierarten sind *Achillea nana* (Eichel *et al.*, 2013) *Linaria alpina*, *Campanula cochlearifolia* und *Saxifraga aizoides*, welche durch eine hohe Fruchtbarkeit und eine großen Menge - etwa mehreren tausend - an kleinen windübertragenden Samen typisiert werden (Erschbamer und Nagl, 2010). Weitere wichtige Pionierarten sind Flechten, Moose und Algen (Burga *et al.*, 2010).

Die zweite Stufe ist die **Frühe Sukzessionsstufe**, welche etwa nach 15 Jahren bis 40 Jahre nach dem Gletscherrückgang beginnt. Aufgrund des altersbedingten Absterbens der Pionierpflanzen und durch mögliche Änderungen der Umweltbedingungen, wie klimatischen Gegebenheiten oder biotischen Faktoren etablieren sich neue Arten. Es ist jedoch möglich, dass manche Pionierarten auch bis in spätere Stadien überleben. Bedingungen dafür sind ein koloniales Wachstum und eine hohe phänotypische Formbarkeit

(Stöcklin und Bäumler, 1996). Die Arten der frühen Sukzessionsstufe sind dominant wegen den verbesserten Umweltbedingungen, wie höheren Temperaturen, verbesserter Bodenentwicklung und stabilisiertem Substrat (Matthews und Vater, 2015). Sie sind meist ruderales oder fortgeschrittene Strategen und verfügen über Wurzeln mit assoziierten Bakterien, welche neben der Stabilisierung zusätzlich Stickstoff im entwickelnden Boden halten können (Caccianiga et al., 2006). Durch diese Erleichterungen können sich weitere Arten etablieren und die Artenzahl nimmt zu, sodass die Vegetationsbedeckung meist 30 - 50 % beträgt (Matthews, 1992). Beispiele für Arten der frühen Sukzessionsstufe sind *Anthyllis vulneraria*, *Poa alpina* und *Trifolium pallescens* (Eichel, 2019). Haselberger et al., (2021) vertritt jedoch die These, dass die möglichen Sukzessionspflanzenarten weniger durch auftretende geomorphologische Störungen sondern vorwiegend durch den bestehenden Samenpool bestimmt sind.

Die anschließende **Fortgeschrittene Sukzessionsstufe** setzt etwa 40 Jahre bis 80 Jahre nach dem Gletscherrückzug ein. In dieser Stufe moderater geomorphologischer Aktivität beginnen biotische und abiotische Prozesse miteinander zu interagieren und die biogeomorphologischen Interaktionen sind im Vergleich zu den anderen Stadien am ausgeprägtesten (Eichel et al., 2013). In dieser Stufe kommen die meisten Arten vor und eine hohe Vegetationsbedeckung von 60 % bis 70 % wird erzielt. Arten des fortgeschrittenen Sukzessionsstadiums - wie *Dryas octopetala* - tragen häufig zur Bodenbildung, durch die Produktion organischer Materie oder aufgrund der Stickstoffretention bei (Eichel et al., 2016). Wegen der hohen Individuenzahl bilden sich vermehrt Pflanzengesellschaften, die in Koexistenz zueinander stehen (Ellenberg und Leuschner, 2010). Eine besonders häufig auftretende Gesellschaft ist des ursprünglichen Graslands *Elynetum*, welches häufig von Zwergsträuchern, wie *Dryadeto-Firmetum* dominiert wird. Diese beeinflussen die geomorphologischen Prozesse stark (Eichel et al., 2013).

Die unterschiedlichen Sukzessionsstadien treten im Zusammenhang mit dem Geländealter, charakteristischen Arten sowie den Ausprägungen von abiotischen und biotischen Sukzessionstrends einer Primärvegetationssukzession auf, welche im folgenden Abschnitt mithilfe von Abb. 1 verdeutlicht werden sollen.

#### *Biotische und abiotische Sukzessionstrends*

Abiotische Sukzessionstrends beschreiben Veränderungen in der abiotischen Umwelt im Laufe der Zeit mit sich verbessernden Umweltbedingungen für Pflanzenarten im zunehmenden Geländealter. Beispiele sind fortlaufende Bodenentwicklung und höhere Temperaturen, durch abnehmende Gletscherwinde aufgrund des Gletscherrückzugs. Die Abnahme der abiotischen Prozesse erlaubt die Zunahme biotischer Prozesse und folglich biotischer Sukzessionstrends. Diese beschreiben Veränderungen der Vegetationseigenschaften im zeitlichen Verlauf im Hinblick auf biotische Faktoren. Biotische Sukzessionstrends sind mit den abiotischen verbunden. Im zeitlichen Verlauf nehmen Vegetationsbedeckung und Biomasse zu und die Vegetation teilt sich in unterschiedliche Schichten nach Physiognomie und Vegetationsentwicklung in beispielsweise Flechten und krautartige Pflanzen auf. In dem Zeitraum von 40 bis 80 Jahren nach dem Gletscherrückzug treten die meisten Pflanzen auf der eisfreien Fläche auf. Sobald dieser zeitliche Rahmen abgeschlossen ist verringert sich jedoch die Artenzahl erneut (Matthews, 1999). Dies ist durch die relativ schnelle Sukzession der ersten Arten bestimmt, welche, im Anschluss, von langsam wachsenden Pflanzen der späteren Sukzessionsstadien, abgelöst werden. Zudem führt der erhöhte Ressourcenverbrauch zu einer geringeren Artendichte (Eichel, 2019).

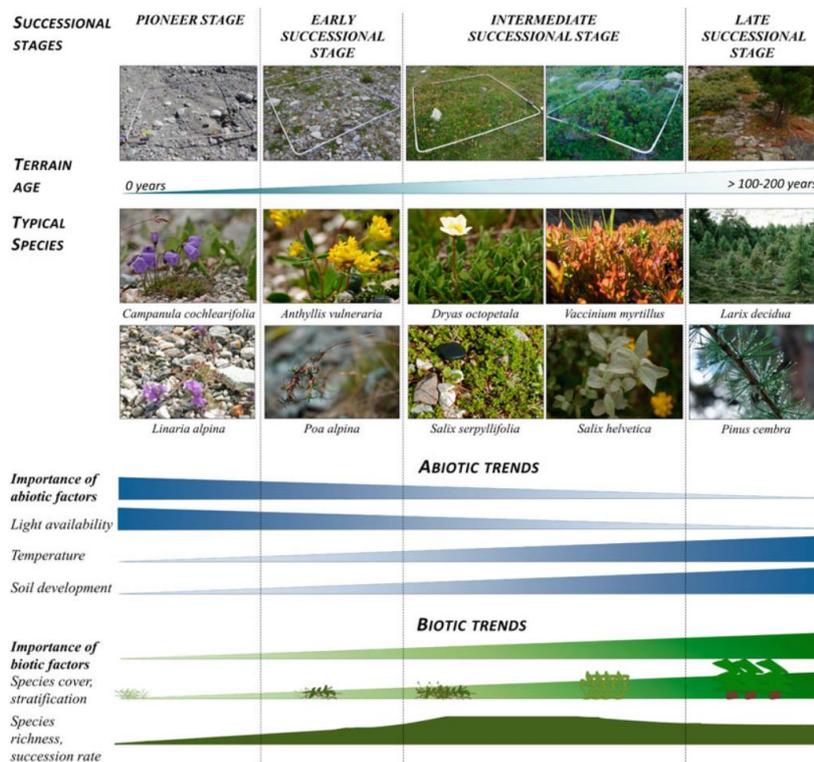


Abbildung 1: Darstellung der Sukzessionsstadien im Zusammenhang mit abiotischen und biotischen Sukzessionstrends der Primärvegetation eines Gletschervorfelds, Quelle: (Eichel, 2019).

### Sukzessionsmodelle

Um die Sukzession zu verstehen wurden in der Vergangenheit diverse Modelle entwickelt. Zu den relevantesten zählen das Geoökologische Modell nach Matthews, (1992), die Strategiebasierten Modelle nach Kirkby et al., (1968) und Grime, (1977) und das konzeptuelle Modell nach Corenblit et al., (2015).

Das **Geoökologische Modell** nach Matthews, (1992) beschreibt zunächst die Ausgangssituation mit zahlreichen geomorphologischen Störungen sowie generell niedrigem Nährstofflevel und einer daher geringen Vegetationsentwicklung. Jedoch sind Pionierpflanzen in der Lage sich unter diesen Bedingungen zu etablieren und setzten den Grundstein für die folgenden Pflanzen. So wird im Laufe der Zeit eine Zunahme im Artenreichtum und der Vegetationsbedeckung erzielt. Weiterführend erhöht sich die Vegetationsentwicklung und die abiotischen Prozesse werden rezessiv. Schließlich kann eine Abnahme der Bedeutung der abiotischen Faktoren mit einer gleichzeitigen Zunahme der Wirkungskraft biotischer Faktoren im Laufe der Zeit festgestellt werden.

**Strategiebasierte Modelle** basieren auf der Annahme einer Beziehung zwischen den Artenmerkmalen, wie Wachstum, Fruchtbarkeit und Überlebensfähigkeit. So stellen die r- und K-Strategen nach Kirkby et al., (1968) zwei Typen mit unter anderem unterschiedlichen Ressourcenbedürfnissen und Wachstumsraten dar. Das Modell beschreibt, dass schnell wachsende r-Strategen von konkurrenzfähigen K-Strategen mit intensiven Ressourcenbedarf abgelöst werden. Somit kann die Artenfolge erklärt werden.

Die CSR Strategie nach Grime, (1977) behauptet, dass Stress und Störungsintensität sogenannte Pflanzen Strategietypen beeinflussen. Grimes stellt verschiedene Pflanzenstrategietypen basierend auf Stress- und Störungsanpassung vor. Somit treten in sich verändernden paraglazialen Gebieten mit klimatischen Veränderungen zunächst störungsadaptierte Ruderalarten (R) auf, welche von konkurrenzfähigen Strategen (C) mit niedriger Störungstoleranz und zugleich hohem Ressourcenverbrauch abgelöst werden. Zuletzt treten Stress Strategen (S) in der ressourcenarmen Umwelt auf. Ein simultanes Bestehen der Arten ist jedoch möglich.

Nach dem **Konzeptuellen Modell** von Corenblit et al., (2015) in Abb. 2 ist eine Beschreibung der biogeomorphologischen Sukzession möglich, welche die gemeinsame Entwicklung geomorphologischer Prozesse und Formen mit der Artenzusammensetzung beschreibt (Dikau et al., 2019b). Das Modell betrachtet die ökologischen und geomorphologischen Entwicklungen von Jahrzehnten bis Jahrhunderten und von ha bis km<sup>2</sup> auf einer großen Zeit- und Raumskala. Aufgrund der gegenseitigen Einflussnahme der Geomorphologie und Vegetation sowie der dominierenden Prozessdomäne ändern sich die Umstände und Bedingungen der biogeomorphologischen Sukzession stetig (Corenblit et al., 2015). Das Modell wurde auf Grundlage fluvialer oder küstennaher Untersuchungsgebiete sowie deren Interaktionen erstellt, ist jedoch auf eine Vielzahl biogeomorphologischer Ökosysteme anwendbar, wie dynamische Flusssysteme, Küstengebiete und paraglaziale Gebiete (Corenblit et al., 2015).

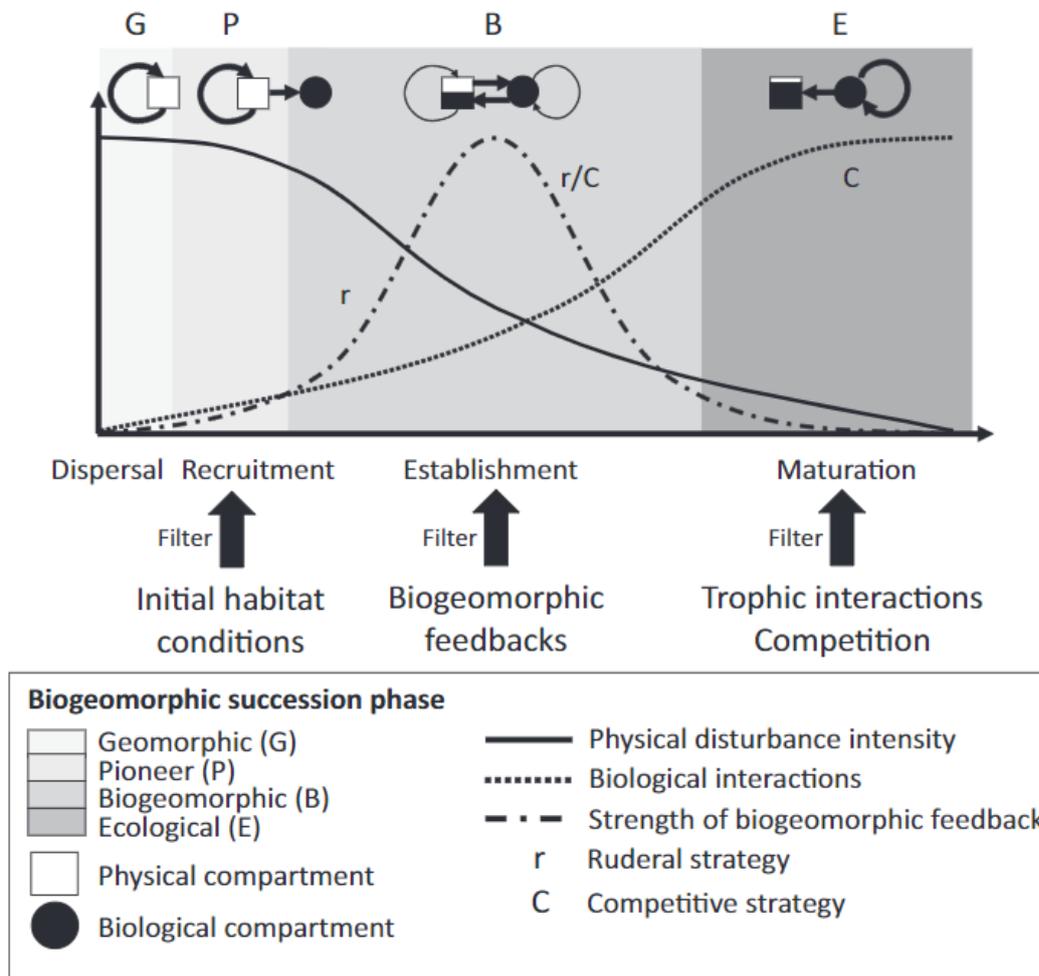


Abbildung 2: Konzeptuelles Modell der Biogeomorphologischen Sukzession. Quelle: (Corenblit et al., 2015).

Wie in Abb. 2 zu erkennen stellt die erste Phase die geomorphologische Phase dar, welche die häufige Vegetationsregeneration nach einer äußerlichen Einwirkung unter Bedrohung lebenswichtiger Grundlagen - der sogenannten Störung - beschreibt. In dieser Phase wirken geomorphologische Kräfte dominierend. In der Pionierphase besiedelt die Vegetation neugeformte freigelegte Flächen, jedoch sind überlebenswichtige Faktoren, wie die Samenkeimung, deren Überleben und Wachstum noch stets von geomorphologischen Gegebenheiten bestimmt. In der dritten Phase, der biogeomorphologischen Phase, treten aufgrund erhöhter Vegetationsbedeckung, Rückkopplungen zwischen Pflanzen und geomorphologischen Dynamiken auf. So interagieren biomechanische und morphologische Charakteristika

der Pflanzen mit dem vorhandenen Substrat. Durch die zunehmende Abwesenheit von einflussreichen geomorphologischen Störungen treten vermehrt Rückkopplungen der Pflanzen auf, und die geomorphologische Umwelt verändert sich unter dem zunehmenden Pflanzeneinfluss. Zuletzt tritt eine Stabilisierung des Ökosystems in der Ökologischen Phase ein, in der biotische Interaktionen vorherrschend sind (Corenblit *et al.*, 2015). In diesem Modell werden zudem die C- und R- Strategen von Grime, (1977) des CSR- Modells berücksichtigt, welche im folgenden Kapitel erläutert werden sollen.

Sukzessionssequenzen laufen jedoch kaum gleichmäßig und linear ab. Sie werden durch Störungen gehindert, limitiert, abgeändert oder für mehrere Jahrzehnte bis zu Jahrhunderte verzögert. So können aktive geomorphologische Prozesse zu jedem Zeitpunkt lokale und landschaftliche Vegetationsmuster zerstören und somit den zeitabhängigen Vegetations Sukzessionsgradienten schwächen (Dikau *et al.*, 2019b) und folglich die Sukzession verlangsamen (Eichel, 2019).

## 2.2.2 Störung

### *Definition*

Störungen sind äußere Einwirkungen mit schädigender Wirkung, die Ökosysteme oder Teile von ihnen, wie Gesellschaften und Populationsstrukturen, beeinträchtigen. Sie bringen Veränderungen der Ressourcen, Substratverfügbarkeit oder der physischen Umwelt mit sich und kosten die betreffenden Individuen, Energie und Zeit (Pickett und White, 1985). Zudem unterbrechen oder verändern sie lebenswichtige Aktivitäten, wie Nahrungsaufnahme, Fortpflanzung sowie Entwicklungsabläufe und Ruhephasen. Man ging in der Vergangenheit anhand von Chronosequenzen davon aus, dass Pflanzen mit zunehmender Entfernung zum Gletscher ein höheres Alter aufweisen und folglich der Sukzessionsgradient von den äußeren Bereichen in das Gletschervorfeld und zum Gletscher hin führt. Dies wurde jedoch widerlegt, da das Auftreten sekundärer Störungen die Sukzessionspfade und -raten beeinflussen und eine kleinräumige Umorientierung auslösen (Matthews, 1999). Sekundäre Störungen sind wiederholte Störungsprozesse, die Arten schädigen können. Sie betreffen bis zu 50% der Flächen von Gletschervorfeldern und spielen daher eine fundamentale Rolle in der Primärsukzession. Beispiele sekundärer Störungen sind Modifizierungen der Substrate mittels Erosion als auch Deposition, Durchmischung, Verletzung der Pflanzen und Beeinflussung der Nährstoffverfügbarkeit (Matthews, 1992). In diesem Kontext ist das Geomorphologische Störungsregime zu erwähnen. Dieses beschreibt die Frequenz des Auftretens geomorphologischer Prozesse mit schädlicher Wirkung (Turner und Gardner, 2015).

### *Maßstab*

Störungen können auf unterschiedlichen Skalen betrachtet und eingeordnet werden. Auf lokalem Maßstab betrachtet beeinflussen vor allem abweichende und variable Umweltbedingungen die Sukzessionspfade und -raten, welche eine Kolonialisierung begünstigen oder hemmen können (Burga *et al.*, 2010). So sind Unterschiede in Bodentextur und -feuchtigkeit verantwortlich für kleinmaßstäbige Vegetationsmuster. Feines Material ermöglicht durch die hohe Wasserretentionskapazität eine stetige Wasserversorgung. Demnach können sich Pflanzen auf diesen Untergründen besser etablieren (Erschbamer und Nagl, 2010). Grobes Material hingegen wird langsamer kolonialisiert, da meist nur eine eingeschränkte Wasser- und Nährstoffversorgung vorhanden ist (Ellenberg und Leuschner, 2010). Im Verlauf werden diese klein skalierten Einwirkungen jedoch zunehmend unwichtiger und die Sukzessionspfade laufen zusammen (Prach und Rachlewicz, 2012). Im landschaftlichen Maßstab bestimmt die Topographie die unterschiedlichen Sukzessionsdynamiken, wie unter anderem durch Hangneigung, Windexposition und Feuchtigkeitsbedingungen (Dikau *et al.*, 2019b). Im regionalen Maßstab betrachtet wird die Sukzession von

bioklimatischen Gradienten, wie Höhenlage und Kontinentalität als Klimacharakteristika kontrolliert (Raffl et al., 2006). So wachsen manche Arten, wie zum Beispiel Laubbäume, nur bis zu einer bestimmten Höhe und sind somit in höher gelegenen Gebieten nicht anzutreffen (Eichel, 2019).

### Störungsarten

Störungen kann man differenzieren und unterteilen. So klassifiziert Matthews, (1999) Störungen in Gletschervorfeldern in die vier verschiedenen Störungsarten der glazialen, glazial-abhängigen, glazial-bedingten und glazial-unabhängigen Störungen.

**Glaziale Störungen** oder Gletscherstörungen beschreiben den direkten Kontakt zwischen dem Gletschereis und dem Ökosystem. Beispiele sind die Überlagerung von Pflanzen durch einen Gletschervorstoß oder die Ablagerung von supraglazialen Material. **Glazial abhängige Störungen** beschreiben Gebiete die durch indirekte Einflüsse des Gletschers Störungen erfahren. Beispiele sind glazieklimatische Störungen, die jedoch meist nur Gebiete nahe des Gletschers betreffen, wie Gletscherwinde und glaziohydrologische Störungen, wie erhöhte Bodenfeuchtigkeit in der Nähe des Gletschers durch Schmelzwasservorkommen oder glaziofluviale Störungen durch Schmelzwasserströme. Besonders glaziofluviale Prozesse verzögern und verhindern die Sukzession und sollen die Artenzusammensetzung stärker determinieren können als das Geländealter. **Glazial bedingte Störungen** sind Störungen aufgrund der paraglazialen Anpassung. Diese treten nach dem Gletscherrückzug auf und sind für die Materialmerkmale, wie die periglazialer Räume, folgenreich (Matthews, 1999). Zu diesen zählen ein erhöhter Sedimentabtrag (Eichel, 2019), äolische Deflation, Loess ähnliche Umlagerung, Musterbodenentwicklung und Durchmischung der oberflächennahen Bodenschichten durch Gefrierungs- und Auftauungsprozesse, als Kryoturbation bezeichnet (Matthews, 1999). Besonders letztere führen zu starken Wurzelschädigungen und verlegen die Kolonialisierung somit zeitlich nach hinten. Weitere Pioniere der vaskulären Pflanzenarten, wie zum Beispiel Gräser oder Seggen, können diese Gebiete erst kolonialisieren, sobald der Bodenfrost abgenommen hat. So kann die Etablierung bis zu Jahrzehnten später erfolgen, da periglaziale Prozesse über einen längeren Zeitraum aktiv sind (Eichel, 2019). **Glazial unabhängige Störungen** sind geomorphologische Störungen, die exogen in das Gletschervorfeld von naheliegenden Hängen eindringen. Beispiele sind Lawinen, Schuttströme oder andere gravitative Prozesse. Weitere Beispiele exogener Störungen sind langanhaltende Schneebedeckungen – als Nivation bezeichnet -, Windwurf oder tierische und anthropogene Störungen (Matthews, 1999).

In Räumen dieser scheinbar widersprüchlichen und fortwährend ablaufenden Prozesse treten einflussreiche Arten auf, welche ihre Umgebung stark verändern und zur Vegetationssukzession stark beitragen.

### 2.2.3 Ökosystemingenieure

Als Ökosystemingenieure - engl. *ecosystem engineers* - werden Tier- und Pflanzenarten wie auch Mikroben und Pilzarten beschrieben (Miller und Lane, 2019), die das Umfeld ihres Besiedlungsstandorts in einem relativ kurzen Zeitraum von Tagen bis hin zu Jahrzehnten in einem klein maßstäbigen Raum im Bereich von wenigen cm<sup>2</sup> bis hin zu m<sup>2</sup> verändern (Dikau et al., 2019b) und dadurch die Lebensgrundlage für neue weitere Arten schaffen. Sie treten meist bei einer Verringerung der geomorphologischen Aktivität auf (Eichel, 2019). Dies ermöglicht es den Ingenieurarten sich in störungsfreien Perioden den Gelegenheitsfenstern – engl. *windows of opportunity* – unter besseren Umweltbedingungen ohne oder mit geringer geomorphologischer Aktivität über einen großen Zeitraum zu etablieren. Allgemein hin sind Ingenieurarten durch die spezifischen Ausprägungen und Verbindungen der Artenresilienz und -resistenz in Bezug auf geomorphologische Störungsregime charakterisiert (Eichel et al., 2016). Pflanzenarten, die als Ökosystemingenieure gelten müssen drei Eigenschaften aufweisen. Diese beschreiben (I) die Eigenschaft sich in Lebensräumen aktiver geomorphologischer Prozesse dauerhaft ansiedeln zu können, (II) die Fähigkeit besitzen die vorherrschenden

geomorphologischen Prozesse, Formen und Material zu beeinflussen und (III) mit den selbst bezweckten Veränderung umgehen zu können (Dikau *et al.*, 2019b). Nachdem die Arten einen bestimmten Bedeckungsgrad erreicht haben oder eine bestimmte Menge an Biomasse im Untergrund vorhanden ist – meist Jahre bis Jahrzehnte nach der ersten Etablierung- beginnen sie aktiv die geomorphologischen Prozesse zu beeinflussen. Die geomorphologische Aktivität verringert sich stark und das Rückkopplungsfenster sowie spätere Sukzessionsarten wie Bäume, etablieren sich in der stabilisierten Umwelt. Weitere Funktionen sind Veränderungen der chemischen Zusammensetzung, wie bei der Bindung von Stickstoff in Kombination mit Bakterien (Eichel *et al.*, 2016).

## 2.2.4 Biogeomorphologisches Rückkopplungsfenster

Ein biogeomorphologisches Rückkopplungsfenster – engl. *Biogeomorphic Feedbackwindow* – beschreibt ein Konzept, bei dem biogeomorphologische Interaktionen unter spezifischen Bedingungen entstehen, welche durch Artenmerkmale sowie der Frequenz und Magnitude der geomorphologischen Ereignisse bestimmt sind (Dikau *et al.*, 2019b). Damit biogeomorphologische Interaktionen auftreten können müssen sich zunächst Ökosystemingenieure etablieren und einen bestimmten Grad an Vegetationsbedeckung als auch Biomasse erreichen und folglich eine Änderung des Störungsregime bezwecken. Zudem treten biotische Faktoren als treibende Kraft zur Etablierung biogeomorphologischer Rückkopplungsfenster auf (Miller und Lane, 2019).

In der Grafik unter Abb. 3 von Eichel *et al.*, (2016) sind die Wechselwirkungen der geomorphologischen Prozesse der Frequenz und der Magnitude - also des Ausmaß - sowie der ökologischen Merkmale der Pflanzenresistenz und -resilienz dargestellt. Man erkennt, dass sich Rückkopplungen im Rahmen geomorphologischer Prozesse in geringem Ausmaß aber bis zu einer mäßig hohen Frequenz unter Einfluss von Ingenieurarten mit relativ hoher Resistenz neben mäßiger Resilienz bilden können.

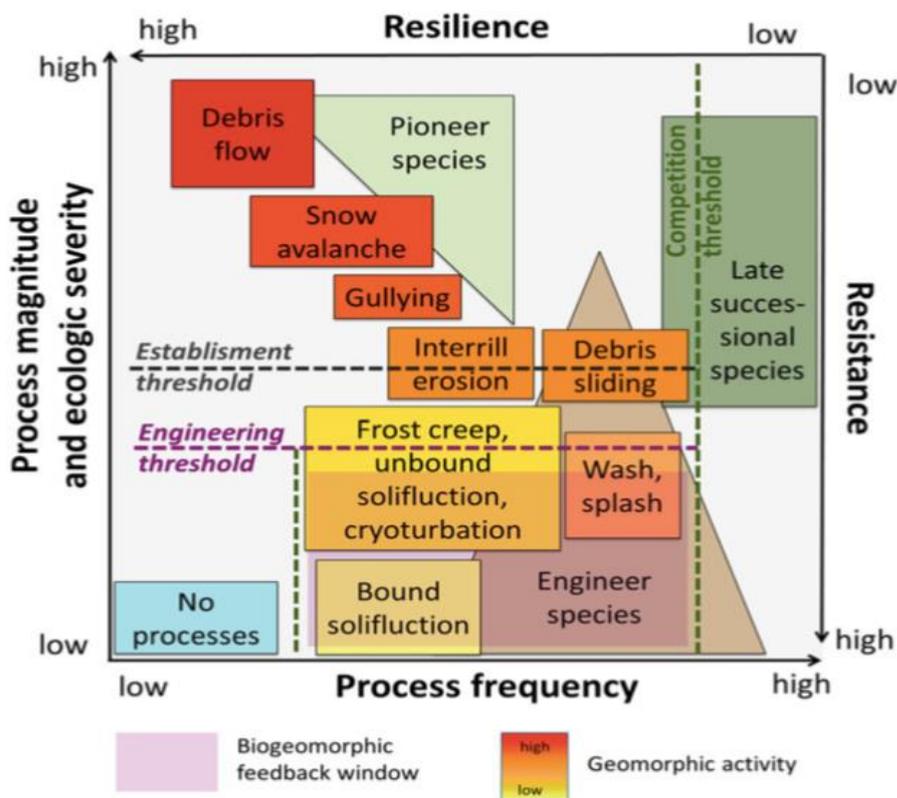


Abbildung 3: Entstehung biogeomorphologischer Rückkopplungen unter Einbezug der geomorphologischen Prozessfrequenz und -magnitude sowie Resistenz und Resilienz der Pflanzenarten, Quelle: (Eichel, 2016).

Rückkopplungen bestehen jedoch nur für einen gewissen Zeitraum. Nach der zunehmenden Ansiedelung von Individuen erhöht sich der Bedeckungsgrad und biotische Faktoren wie die Konkurrenz und Hemmung gewinnen an Bedeutung. Sobald dieser Konkurrenzschwellenwert überschritten ist endet das biogeomorphologische Rückkopplungsfenster und spätere Sukzessionsarten dominieren die geomorphologisch stabilisierte Umwelt (Dikau *et al.*, 2019b).

Wie bereits erwähnt nimmt die Vegetation Einfluss auf die Geomorphologie. Jene biogeomorphologischen Interaktionen kontrollieren unter anderem geomorphologische Formen, wie Moränenhänge, strukturierte Böden und glaziofluviale Überschwemmungsebenen (Eichel, 2019).

## 2.2.5 Biogeomorphologische Interaktionen

Die Biogeomorphologischen Interaktionen beschreiben die Wechselwirkungen und Veränderungen, die Ökosystemingenieure in ihrer nahen Umwelt bezwecken (Haselberger *et al.*, 2021). Da eine Vielzahl an Interaktionen in unterschiedlichen Ökosystemen auftreten soll im Folgenden eine eingeschränkte Darstellung der gängigsten und einflussreichsten Interaktionen in Gletschervorfeldern erfolgen.

Böden obliegen starken Interaktionsprozessen. So entdeckte Eichel *et al.*, (2013) im Rahmen einer Studie im Untersuchungsgebiet Turtmantal, dass die vorherrschende Vegetation, Bodentemperaturen und Korngrößenverteilungen beeinflusst. Auch die Veränderung der Ressourcenverfügbarkeit, wie von Nährstoffen (Dikau *et al.*, 2019b) und thermaler, hydrologischer und mechanischer Bodenregime können auftreten. Die Veränderungen kommen mittels Transpiration, Schattenwurf und Feuchtigkeitsrückhalt zustande (Matthews, 1999). Eichel *et al.*, (2016) entdeckte eine starke Veränderung des Störungsregimes von ursprünglichen Abwaschungsprozessen und Rutschungen hin zu einer gebundener Solifluktion. Die Verringerung der Erosionsprozesse ist auf die erhöhte Wurzeldichte, - Ausbreitung, -Länge und -Volumen zurückzuführen. Dadurch wird die Kohäsion im Boden vergrößert und die Bodenschwerkraft abgeändert. Somit kann dem Fazit von Haselberger *et al.*, (2021) zufolge die Hangstabilität durch eine dichte Vegetationsdecke im Zusammenhang mit einer hohen Biodiversität erreicht werden. Zudem wird wegen der erhöhten Oberflächenrauheit eine Limitierung der Boden- und Seitenerosion erzielt (Dikau *et al.*, 2019b). Die erhöhte Oberflächenrauheit an Flüssen und Talauen verringert die Fließgeschwindigkeit und bewirkt somit eine Deposition von Sedimenten (Gurnell, 2015). Der Begriff der Fluvialen Geomorphologischen Sukzession kann in diesem Kontext eingeführt werden, welche auch in Gletschervorfeldern auftreten kann. Corenblit *et al.*, (2007) verfolgt in ihm die Frage, wie glaziofluviale Dynamiken und Vegetationsdynamiken interagieren. Das Konzept beschreibt wie dominante Regimeprozesse sich innerhalb eines Jahrzehnts der Sukzession nach einer Zerstörungsflut von physikalischen Prozessen zu vornehmlich biotischen Prozessen verändern. Dies kann in vier Phasen eingeteilt werden, welche die Interaktionen zwischen Pflanzen und fluvialen Veränderungen im Laufe der Zeit aufzeigen. Erst in der dritten Phase treten Interaktionen auf. Diese sind eine Stärkung der Flussbankstabilität, durch den hohen Anteil unterirdischer Biomasse - den Wurzeln - und einer folglich verminderten Seitenerosion, die schließlich zu einer abnehmenden Flussbettbreite führt. Zuletzt entsteht mit zunehmender Vegetationsbedeckung eine Stabilisation der inaktiven Flussarme und die Form ändert sich zu einem einzigen Arm mit möglicherweise einer vegetationsbedeckten Flussinsel.

## 2.3 Fernerkundung und Vegetation

### 2.3.1 Historie und Definition

Der Begriff Remote Sensing trat 1960 erstmals auf und wurde zunächst als die Beobachtung und Bemessung eines Gegenstandes, ohne dessen Berührung, definiert. Zu dieser Zeit standen Luftbildaufnahmen im Vordergrund, welche für kartographische Zwecke analysiert wurden (Jones und Vaughan, 2010).

Die Multispektrale Datenaufnahme ist Teil der Fernerkundungsmethoden und stellt eine bedeutende Datengewinnungstechnik für unterschiedliche Untersuchungsobjekte dar, wobei das grundlegende Prinzip die Erfassung reflektierter elektromagnetischer Radiowellen mit einem Erkundungssystem ist. Der Begriff Erkundungssystem beschreibt die zusammenfassende Einheit aus Lichtquelle, Sensor und deren Träger (Jones und Vaughan, 2010). Über die Lichtquelle wird elektromagnetische Strahlung in einer oder mehreren Wellenlängen ausgesendet. Diese trifft auf Objekte der Erdoberfläche und wird zum Teil reflektiert. Die reflektierte Strahlung wird anschließend von einem Sensor aufgenommen und erfasst, wie zu sehen in Abb. 4. Das reflektierte Spektrum wird in der Fernerkundung in Bändern gemessen, welche festgelegte Wellenlängenbereiche des Lichts sind und meist breit gefasst werden. Zudem werden die erhobenen Datensätze als digitale Nummer gespeichert. Die Nummer bezieht sich auf die Strahlungsintensität bestimmter Wellenlängenbereiche des Sensors und wird sogenannten Bändern zugeordnet, welche festgelegte Wellenlängenbereiche des Lichts sind (Jones und Vaughan, 2010). Dies erfolgt in einem eingeschränkten Bereich von etwa 1 nm mit UV-Wellen bis hin zu kurzwelligen Radiowellen mit 300 m Wellenlänge (Jones und Vaughan, 2010). Die Einschränkung des Wellenlängenbereichs ist darin begründet, dass Sonnenlicht vornehmlich in diesem Spektralbereich auftritt und die Reflektionsraten außerhalb des Bereichs relativ gleichmäßig und niedrig mit unter 5% sind (Knipling, 1970).

Mithilfe dieser Technik können Daten unterschiedlichster Untersuchungsbereiche wie etwa Gesteinsuntergründe, Wärmeverhältnisse oder Vegetationstypen gewonnen werden (Jones und Vaughan, 2010; Richards, 2013).

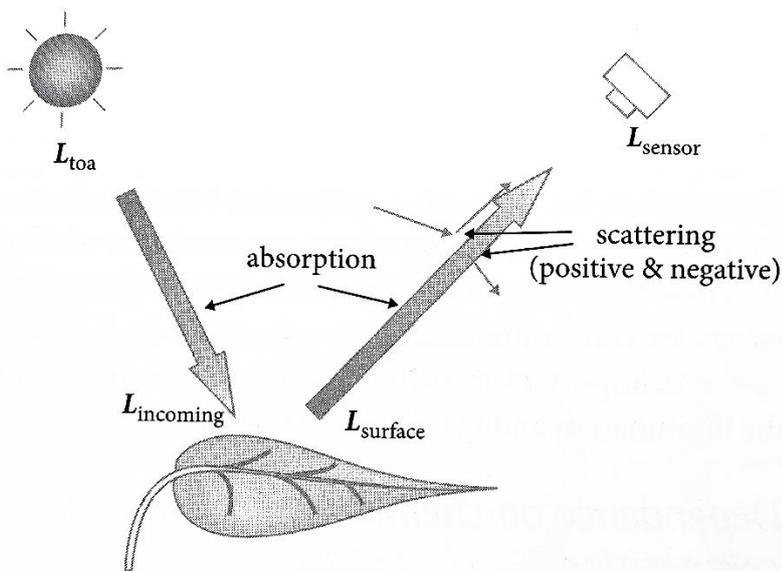


Abbildung 4: Schematische Darstellung des passiven Aufnahmeverfahrens der Fernerkundung und möglichem Strahlungsverlust.  
Quelle: (Jones und Vaughan, 2010).

In Abb. 4 stellt das Sonnenlicht eine natürliche Lichtquelle dar und deren Reflektion wird als elektromagnetischen Strahlung eingefangen. Diese Methode der Fernerkundung wird als optische Fernerkundung bezeichnet und ist Teil der passiven Fernerkundung, die schon seit ihren Anfängen im 19. Jahrhundert verwendet wurde (Jones und Vaughan, 2010). Jedoch haben die Methoden bis zu ihrem aktuellen Stand eine intensive Entwicklung durchlaufen. Formen der aktiven Fernerkundung, charakterisiert durch eine künstliche Lichtquelle, sind heutzutage weit verbreitet, da sie eine Datenerfassung von weiteren Spektralbereichen ermöglicht. Beispielsweise für aktive Instrumente der Fernerkundung sind LIDAR, RADAR und SAR, welche Daten von Untersuchungsgebieten unabhängig von Beleuchtungsverhältnissen oder Witterungsbedingungen erfassen können (Richards, 2013).

Spezielle Vorteile dieser Technik sind die räumliche Distanz, wodurch sie nichtinvasiv und somit schonend für die Untersuchungsobjekte ist. Des Weiteren können große Datenmengen großflächiger und unzugänglicher Bereiche in kurzer Zeit mit vergleichsweise geringem Aufwand und hoher Genauigkeit erfasst werden. Zusätzlich erlaubt die stetige Weiterentwicklung eine zunehmend einfachere und präzisere Handhabung, wie mit computergestützten Algorithmen und objektbasierten Klassifizierungen (Jones und Vaughan, 2010).

Die Fernerkundungsmethoden basieren auf Konzepten der Strahlungsphysik. Zu diesem Zwecke werden im folgenden Abschnitt grundlegende Aspekte und Abläufe dargestellt.

### 2.3.2 Grundlagen der Strahlungsphysik

Elektromagnetische Strahlung - auch als Licht bezeichnet - äußert sich einerseits als Welle und andererseits als Teilchen und weist damit einen Doppelcharakter auf. Die Strahlung übermittelt Energie in der konstanten Lichtgeschwindigkeit von  $c = 2,9979 \times 10^8$  m/s. Es gibt jedoch unterschiedliche elektromagnetische Strahlungsarten, welche sich in Ausprägungen der in Wechselwirkung stehenden Komponenten der Wellenlänge, der Frequenz und des Energielevels unterscheiden. Das elektromagnetische Spektrum (Abb. 5) zeigt alle Strahlungsarten mit ihren charakteristischen Wellenlängen sowie der jeweiligen Energieverteilung auf und differenziert sie in diverse Strahlungsbereiche. Dies erfolgt anhand von Wellenlängenintervallen (Jones und Vaughan, 2010).

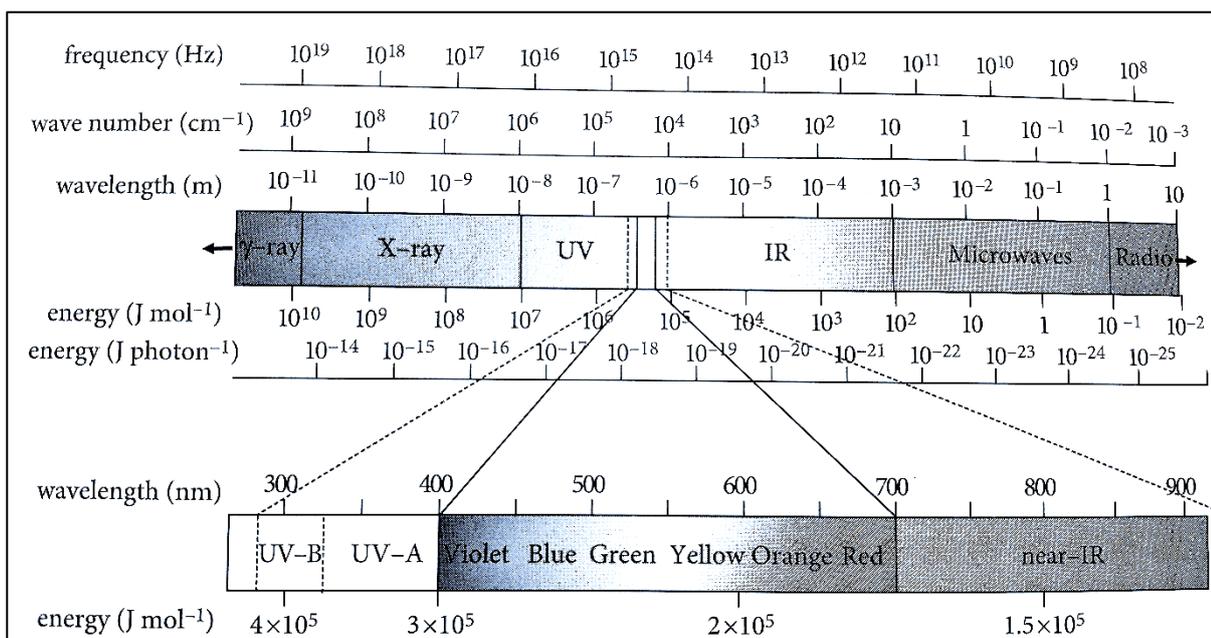


Abbildung 5: Elektromagnetisches Spektrum mit den Parametern Frequenz, Wellenlänge und Energie. Quelle: (Jones und Vaughan, 2010)

Die Wellenlängen des Spektrums beinhalten sechs Spektralbereiche, die von 10 pm bis 10 m reichen. Wie bereits erwähnt überträgt elektromagnetische Strahlung Energie, welche von niedrigen bis zu hohen Energieleveln reichen kann. Wie energetisch Strahlung ist hängt von der Wellenlänge ab. So ist langwellige Strahlung des Mikrowellenbereichs energetisch ärmer als kurzwellige UV-Strahlung. Dieser Zusammenhang wirkt sich auf die Interaktionen zwischen Materie und Licht aus (Jones und Vaughan, 2010).

Verschiedene Arten der Interaktion werden durch die Begriffe Absorption, Reflektion, Dispersion, Brechung, Streuung und Transmission beschrieben. Die Absorption bezeichnet die Retention elektromagnetischer Energie durch einen Körper oder Stoff, während bei der Reflektion - auch als spekulare Reflektion bezeichnet - ein Lichtstrahl gespiegelt wird, der den gleichen Einfallswinkel und Ausfallswinkel aufweist. Der Ausfallswinkel wird stark von der Oberflächenstruktur beeinflusst, also ob diese somit eher glatt oder rau ist. Die Dispersion beschreibt die Aufspaltung des gebündelten Lichts in die verschiedenen Wellenlängen, wie bei einem Prisma erkenntlich. Lichtbrechung findet statt, sobald das Licht von einer Materie in eine andere mit einer anderen optischen Dichte wechselt. Die Streuung beschreibt einen Lichtstrahl, welcher sich an einem Objekt aufteilt und sich in verschiedene Richtungen ausbreitet. Zuletzt können Objekte für spezifische Wellenlängen durchlässig sein. Dies wird als Transmission bezeichnet (Jones und Vaughan, 2010; Krieger, 2019). Besonders die Reflektion (R), Transmission (T) und Absorption (A) hängen voneinander ab und ihre Summe beträgt stets eins, wie unter Formel 1 zu erkennen ist (Jacquemoud und Ustin, 2019).

*Formel 1: Summenformel der Reflektion (R), Transmission (T) und Absorption (A). Quelle: (Jacquemoud und Ustin).*

$$R + T + A = 1$$

Fernerkundungsmethoden sind wertvoll, da das menschliche Auge nur einen eingeschränkten Teil des Lichtspektrums erfassen und verarbeiten kann. Dieser wird als sichtbares Licht bezeichnet und reicht von einer Wellenlänge von etwa 400 nm bis 700 nm (Jones und Vaughan, 2010). Folglich ist es sinnvoll, Erkundungssysteme zu verwenden, um vertiefende Informationen von Spektralbereichen außerhalb des sichtbaren Lichts zu gewinnen, wie für Vegetationsuntersuchungen. Diese weisen charakteristische Strahlungseigenschaften auf, welche Ausprägungen der Absorption, Reflektion und Transmission beschreiben. Sie können mithilfe künstlicher Lichtquellen und Sensoren besonders gut erfasst werden (Knipling, 1970).

Eine Differenzierung der Untersuchungsobjekte ist anhand ihrer charakteristischen Strahlungseigenschaften möglich, wobei die Strahlungseigenschaften der Pflanzen auf deren Physiologie zurückzuführen sind. Zum tiefgreifenderen Verständnis der Fernerkundungsmethoden sollen jene folglich erörtert werden.

### 2.3.3 Physiologie der Pflanzen

Da die Strahlungseigenschaften der Vegetation nicht homogen sind, sollen zum besseren Verständnis zunächst die Strahlungseigenschaften von einzelnen Blättern und anschließend die einer geschlossenen Pflanzendecke erläutert werden. Diese bauen zwar aufeinander auf, jedoch besteht eine Variabilität in den Strahlungsmerkmalen (Jones und Vaughan, 2010; Knipling, 1970).

#### *Strahlungseigenschaften eines Blatts*

Die charakteristischen Strahlungseigenschaften eines Blattes zeichnen sich durch die einerseits geringe Reflektion im sichtbaren Lichtbereich - mit Ausnahme des grünen Lichtanteils - aufgrund hoher Absorption durch das Pigment Chlorophyll aus. Zudem besteht eine hohe Reflektion der Nahinfrarotstrahlung NIR und ist durch Streuungsprozesse im Blattinneren und gleichzeitig ausbleibender Absorption zu erklären. Zuletzt

besteht bei der kurzwelligeren Nahinfrarot-Strahlung – engl. *SWIR* – ab 1300 nm eine relativ niedrige Reflektion, da das im Blatt enthaltene Wasser Licht dieser Wellenlänge absorbiert (Jones und Vaughan, 2010; Knipling, 1970).

Den Hintergrund dieser Unterschiede in der Absorption, Reflektion und Transmission der elektromagnetischen Strahlung verschiedener Wellenlängenbereiche bilden, wie zuvor erwähnt, die Blattstruktur mit inbegriffenem Luftraum, die chemischen Bestandteile, wie enthaltene Pigmente und der Wasseranteil, welche in den folgenden Abschnitten ausführlicher erläutert werden.

#### Struktureller Aufbau

Ein Blatt besteht aus diversen strukturellen Bestandteilen, wobei die Zellorgane der Chloroplasten im Palisadengewebe und die Mesophyllzellen Photosynthese betreiben und somit für die Strahlungseigenschaften stark bestimmen. So bezwecken beispielsweise die stark verdichteten Mesophyllzellen eine intensive Lichtaufnahme (Jones und Vaughan, 2010). Die Strahlungseigenschaften werden durch die Gesamtheit des Blattes bestimmt, jedoch sind im Besonderen spezielle strukturelle Komponenten einflussreicher, wie unter anderem die Gewebedichte, das Vorhandensein von Wachsen und Haaren sowie deren Verteilung (Knipling, 1970). So verfügen Blätter mit Härchen über einen höheren Wasser- und Luftschnittstellenanteil und reflektieren somit im aktiven Photosynthese Bereich von 400 nm bis 700 nm um 14% bis zu 70% mehr. Härchen an der Blattunterseite haben einen ähnlichen Effekt, in dem sie zuvor weitergeleitetes Licht in das Blatt zurück leiten (Ehleringer et al., 1976). Die strukturellen Bestandteile sind unter Abb. 6 ersichtlich.

Die hohen Absorptionsraten der Photosynthese aktiven Strahlung – engl. *PAR* –, welche von 400 nm bis etwa 700 nm reicht, sind durch die Chloroplasten und deren enthaltenen Pigmente zu erklären. Diese haben lichtabsorbierende Eigenschaften und befinden sich im Palisadengewebe und in den Mesophyllzellen. Die genauen Zusammenhänge der Absorption und der Photosynthese aktiven Pigmente werden im Laufe des Kapitels aufgeklärt. Des Weiteren ist die multiple Reflektion eines einzelnen Blattes, auf die sogenannte Volumenstreuung zurückzuführen. Diese beschreibt die meist wiederholte diffuse Streuungen von Photonen an strukturellen Elementen innerhalb des Blattes. Denn trifft elektromagnetische Strahlung auf ein Blatt wird meist nur ein geringer Lichtanteil an der Blattoberfläche reflektiert, da das Cuticulawachs nahezu durchlässig für sichtbares Licht und nahinfrarotes Licht ist. Somit dringt das Licht vermehrt ins Blattinnere ein. Dort interagiert es abhängig von der Wellenlänge mit verschiedenen Blattkomponenten unterschiedlicher Schichten und Tiefen (Knipling, 1970). Möglich sind auch eine gänzliche Absorption oder die Streuung spezifischer Lichtanteile, wie zu sehen in Abb. 6. Die Lichtbrechung geschieht meist beim Auftreffen auf Grenzflächen von Wasser- und Lufträumen. Streuungen hingegen entstehen beim Auftreffen auf die Mesophyllzellen (Jones und Vaughan, 2010). Die Reflektion kann demnach in Strahlung, welche an der Blattoberfläche reflektiert wird und Strahlung, die in das Blatt eindringt und aufgrund der inneren Struktur einer Streuung unterliegt, unterschieden werden (Jacquemoud und Ustin, 2019). NIR Lichtanteile werden durch Aufbausteine wie Lignin, Cellulose und Proteine absorbiert. Diese haben jedoch keine besonders stark ausgeprägten Absorptionseigenschaften. Somit sind die Absorptionsraten von NIR Lichtanteilen dementsprechend gering und die Reflektion hoch. (Jones und Vaughan, 2010).

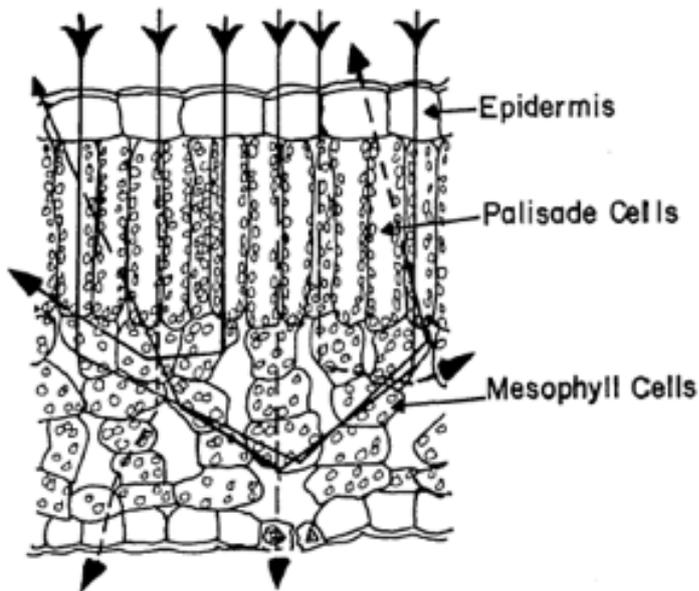


Abbildung 6: Schematischer Querschnitt eines Blattes. Zu erkennen sind die enthaltenen Organe sowie vorherrschende Strahlungsverhältnisse. Quelle: (Jacquemoud und Ustin, 2019).

#### Pigmente

Blätter verfügen in den meisten Fällen über das Photosynthese aktive Pigment Chlorophyll sowie weiters über Karotinoide mit dem gelben Pigment Carotin, Xanthophylle und Flavonoide. Diese befinden sich in der Thylakoidmembran der Chloroplasten. Die verschiedenen Komponenten absorbieren, wie bereits erwähnt, PAR-Anteile. Ein Großteil im roten und blauen Lichtbereich wird vom Chlorophyll absorbiert. Die Karotinoide wie  $\beta$ -Karotin und Xanthophyll absorbieren blau-grüne Lichtanteile. Blätter grüner Vegetation erscheinen für das menschliche Auge somit grün, da grünes Licht im Gegensatz zu roten und blauen Lichtanteilen weniger stark absorbiert wird und eher reflektiert wird. Der Chlorophyllanteil im Blatt ist somit ein guter Indikator für Veränderungen von Pflanzen, wie bei der Laubfärbung bedingt durch Stress oder im Herbst zu erkennen ist. Hierbei entzieht die Pflanze den Blättern das Chlorophyll und weitere Pigmente um dieses zu speichern. Die Verringerung des Pigmentanteils im Blatt führt zu der Laubfärbung. Da rotes Licht kaum noch absorbiert sondern reflektiert wird, nimmt zudem die Absorption des PAR Wellenlängenbereichs ab (Jones und Vaughan, 2010).

#### Wasseranteil

Wasser hat die Eigenschaft elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen im Infrarotbereich IR und Mittleren Infrarotbereich MIR ab 1100 nm besonders gut zu absorbieren. NIR hingegen wird weniger gut absorbiert, wie zu sehen in Abb. 7. Es muss jedoch erwähnt werden, dass diese Strahlungseigenschaften spezifisch für den Wasseranteil in einem Blatt sind. Reines Wasser reflektiert im Vergleich weitaus weniger elektromagnetische Wellen. Diese Abweichung ist in den Schnittstellen der Wasser- und Lufträume eines Blatts begründet (Jones und Vaughan, 2010; Knipling, 1970).

#### Interaktionen der elektromagnetischen Wellen

Der folgende Abschnitt dient zur Visualisierung und Vertiefung der beschriebenen Zusammenhänge und geht auf Wechselwirkungen zwischen Reflektion, Absorption und Transmission ein. Abb. 7 veranschaulicht charakteristische Strahlungseigenschaften grüner Vegetation am Beispiel der *Populus canadensis* nach Jacquemoud und Ustin, (2019). Zu sehen sind die Zu- und Abnahme der Reflektion und Transmission in

Prozent, in einem Spektralbereich von etwa 400 nm bis 2500 nm. Zudem beschreibt die Fläche innerhalb der Graphen die Absorption für den spezifischen Wellenlängenbereich.

Die Reflektion ist mit etwa 5% im Bereich des sichtbaren Lichts gering und die Transmission ist gemäß der Reflektion ebenfalls gering mit etwa 10 %. Folglich ist die sich zwischen den Graphen befindliche Fläche stark ausgeprägt, was auf eine hohe Absorption in diesem Spektralbereich hindeutet. Dies ist durch die Photosynthese aktiven Pigmente zu erklären, welche Licht in jenem Bereich stark absorbieren (Jones und Vaughan, 2010). Jedoch sind lokale Maxima der Reflektions- und Transmissionsgraphen im grünen Spektralbereich bei etwa 550 nm zu erkennen. Aufgrund der spezifischen Absorptionseigenschaften der Pigmente, welche sich vornehmlich auf blaue und rote Lichtanteile spezifizieren werden grüne Lichtanteile weniger stark absorbiert (Jacquemoud und Ustin, 2019; Jones und Vaughan, 2010). Beim Übergang vom sichtbarem Spektrum zum NIR Wellenlängenbereich bei etwa 750 nm nimmt die Reflektionsrate erheblich zu auf etwa 40 % und bleibt bis etwa 1300 nm bestehen. Die hohe Reflektion sowie Transmission im Bereich von 700 nm bis 1100 nm sind auf schwach absorbierend wirkende strukturelle Bestandteile, wie Zellulose und Lignin zurückzuführen. Ebenso heben Streuungsprozesse von Photonen innerhalb der spezifischen Blattstruktur die Reflektion an (Jones und Vaughan, 2010).

Jenes Plateau besteht bis zu einer starken Senkung der Reflektion bei etwa 1400 nm und befindet sich mit einer Wellenlänge von 1500 nm bei etwa 20 %. Ebenso nimmt die Transmission ab. Im Gegensatz dazu steigt die Absorption dieses Wellenlängenbereichs an. Folgend nimmt das lokale Minima nach einem kleinem Anstieg der Reflektion bei 1700 nm stetig ab. Schließlich wird ein Tief des Reflektionsgraphen bei 1900 nm auf 5 % erreicht. Gefolgt wird dieser von einem geringen Anstieg bei 2300 nm auf 18 % (Jacquemoud und Ustin, 2019). Die generell hohe Absorption, welche im Bereich der SWIR besteht ist auf die hohe Absorptionsfähigkeit der Wasseranteile im Blatt in Kombination mit interzellulären Streuungsprozessen zu erklären (Goward, 1985). Ab 2500 nm bleiben die Spektraleigenschaften stetig bestehen. So sind die Reflektions- und Transmissionsraten mit unter 5 % bis 10 % gering, wohingegen die Absorption stark ausgeprägt ist, aufgrund der Absorptionsfähigkeit der Wasseranteile im Blatt (Knipling, 1970).

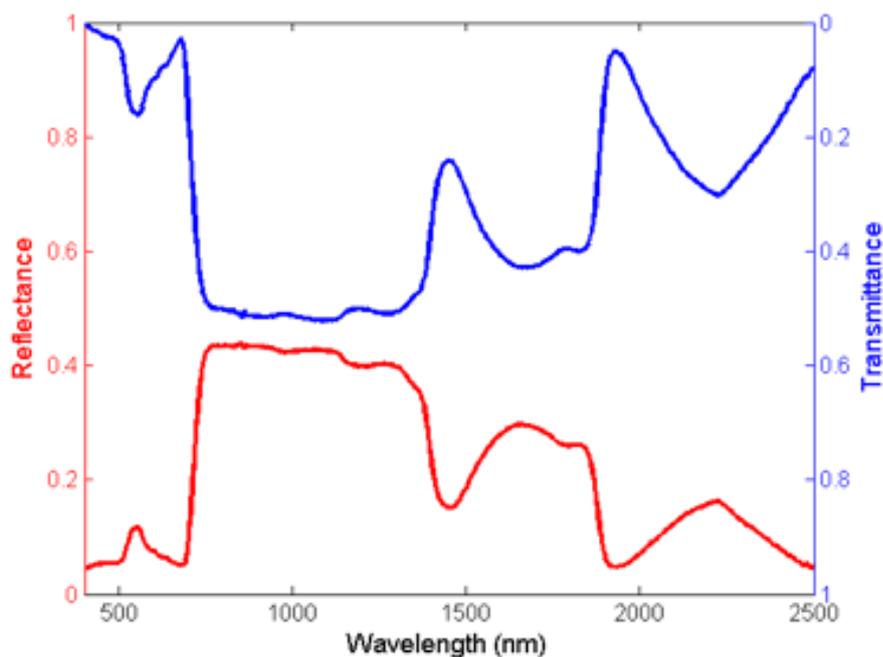


Abbildung 7: Reflektion (rot), Transmission (blau) und Absorption (Fläche innerhalb der Graphen) eines Blattes der *Populus Cadensis*. Quelle: (Jacquemoud und Ustin, 2019).

Abschließend lässt sich festhalten, dass Reflektions- und Transmissionsraten von Blättern auf den einerseits absorbierenden Komponenten, wie Chlorophyll, Carotinoide, Wasser, Zellulose, Aminosäuren und Stärke und andererseits auf inneren Streuungsprozessen beruhen und die Reflektion anheben (Jacquemoud und Ustin, 2019).

### *Strahlungseigenschaften eines Blätterdachs*

Nach Goward, (1985) basieren die Strahlungseigenschaften einer geschlossenen Pflanzendecke auf den Merkmalen der einzelnen Blätter, müssen aber durch weitere Komponenten wie nicht optische Bestandteile ergänzt werden, wie zum Beispiel Stängel, Äste oder Blüten. Zudem sind Wechselwirkungen von Untergründen, wie Böden und Wasserflächen, die Blattfläche, die Blattausrichtung, der Sonneneinstrahlungswinkel, der Aufnahmewinkel, der Schattenwurf und die Orientierung des Sensors bestimmend für die Reflektionscharakteristika (Jones und Vaughan, 2010).

Die folgende Grafik unter Abb. 8 veranschaulicht die Reflektion, Streuung und Transmission elektromagnetischer Wellen eines Blätterdachs. Im Vergleich zu einem einzelnen Blatt finden sich laut Knipling, (1970) qualitative als auch quantitative Reflektionsunterschiede. Sichtbares Licht wird nur selten direkt auf der Blattoberfläche reflektiert. Vermehrt finden Streuungen mit sekundären oder tertiären Reflektionen statt. Es ist anzumerken, dass bei jeder Streuung an einem Objekt auch ein Teil des Lichts absorbiert wird. Somit fällt die Gesamtreflektion geringer aus, desto mehr Streuungen stattgefunden haben. Folglich weisen Kronendächer geringere Reflektionsraten auf als ein einzelnes Blatt (Jones und Vaughan, 2010). Im Vergleich dazu ist die Reflektion von NIR Strahlung auf Basis der Energie betrachtet signifikant höher als bei sichtbarem Licht. Ein Großteil der einfallenden Infrarotstrahlung transmittiert durch die oberste Laubschicht bis es in unteren Blätterschichten reflektiert wird und erneut durch die oberste Laubschicht transmittiert. Somit wird die Reflektion erhöht (Knipling, 1970). Folglich reichert sich NIR Strahlung bei zunehmender Blätterdachtiefe und zunehmender Reflektion an diverser Blattoberflächen an (Jones und Vaughan, 2010).

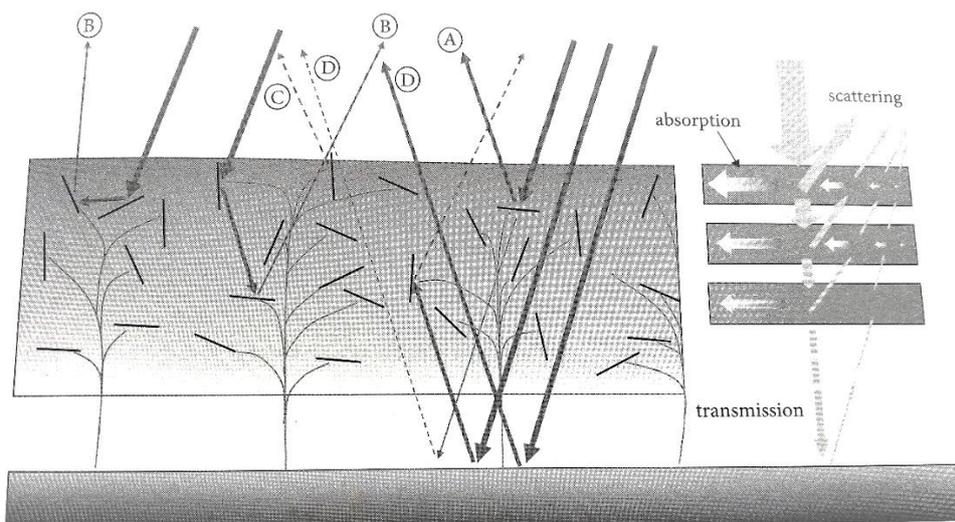


Abbildung 8: Schematische Darstellung möglicher Strahlungsinteraktionen einer geschlossenen Pflanzendecke, Quelle: (Jones und Vaughan, 2010).

Ein Teil des Lichts wird auch vom Boden absorbiert oder transmittiert. Das ist vornehmlich der Fall wenn die darüber liegende Vegetationsdecke lückenhaft ist. Böden reflektieren sichtbares Licht und NIR Anteile, wobei eine Vielzahl chemischer und physikalischer Merkmale die Strahlungseigenschaften von Böden beeinflussen.

Mit zunehmenden Bodenwassergehalt legt sich ein Wasserfilm um die Bodenpartikel und die Absorption nimmt zu. Gemäß diesem Zusammenhang erscheint nasser Boden dunkler. Der organische Gehalt im Boden reflektiert ebenfalls vermindert. Böden mit einer erhöhten Oberflächenrauheit reflektieren hingegen mehr. Beispielsweise reflektiert Ton im Gegensatz zu Sand weniger und erscheint demgemäß dunkler. (Jones und Vaughan, 2010).

Blätter verschiedener Arten haben unter anderem spezifische Blattoberflächen, einen strukturellen Aufbau und Breite wie auch Pigmente in bestimmten Konzentrationen. Pflanzendecken – horizontal wie auch vertikal – haben ebenso einen spezifischen Aufbau, der Einfluss auf die Größe, Form und Ausrichtung der Pflanzen und deren Blätter nimmt. Folglich ist eine Differenzierung unterschiedlicher Arten und Vegetationstypen anhand der reflektierten Strahlung möglich. Jedoch werden die Werte der reflektierten Strahlung auch vom Pflanzenwachstum, Größe, Alter, Entwicklung oder Stress beeinflusst und sind somit ebenfalls zu eruieren (Knipling, 1970).

### Spektrale Indizes

Im Zusammenhang mit den bereits erwähnten Spektralbereichen werden folgend die zur Untersuchung bedeutenden Spektral Indizes erörtert, wobei zunächst im allgemeinen Spektrale Indizes definiert und anschließend ein spezifischer Vegetationsindex diskutiert wird. Abschließend wird noch auf die Langzeitnutzung von Untersuchungen mit Vegetationsindizes eingegangen.

Jede Objektklasse weist spezifische spektrale Charakteristika auf, die meist durch Absorptionsminima oder -maxima in bestimmten Wellenlängenbereichen definiert sind. Um diese teilweise sehr komplexen kennzeichnenden Ausprägungen zu erkennen werden als Vereinfachung spektrale Indizes verwendet (Jones und Vaughan, 2010). Diese sind in Algorithmen eingebettete Variablen, die durch mathematische Kombinationen von zwei oder mehr spektralen Bändern generiert werden. Mithilfe dieser werden Informationen aus digitalen Bildern und deren Pixeln extrahiert und durch Anwendung von Algorithmen werden Bänder kombiniert und durch mathematische Berechnungen optimiert (Fischer *et al.*, 2019).

### Vegetationsindex

Vegetationsindizes (VI) sind Indizes die speziell zur Untersuchung der Vegetationsbedeckung der Erdoberfläche entwickelt wurden. VI sind einheitslose Maße, die von radiometrischen Daten abgeleitet werden und überwiegend grüne Vegetation und deren biophysikalischen Merkmale im ausgewählten Untersuchungsgebiet erfassen. Häufig basieren die Vegetationsindizes auf der charakteristischen Zunahme der Reflektion ab einer Wellenlänge von 700 nm. Diese wird auch als *red edge* bezeichnet. Im Vergleich dazu weisen andere Oberflächen eine weniger starke Reflektionszunahme auf und zeichnen sich stattdessen durch eine stetige und geringere Zunahme der Reflektion aus. Bei der Generierung und Auswahl der Bänder wird darauf geachtet, dass die entstandenen Indizes spezielle biophysische Untersuchungsparameter genau erfassen (Jones und Vaughan, 2010). Eine Vielzahl von VI findet in diversen Anwendungsgebieten anhand ihrer hohen Spezialisierung Verwendung. Die Auswahl der VI ist somit von den Untersuchungsparametern abhängig. Da in dieser Forschungsarbeit der NDVI verwendet wird, wird dieser im Folgenden erläutert um einen Überblick über die Einsetzbarkeit zu geben, die Verwendungsmerkmale zu klären sowie die Vor- und Nachteile aufzuzeigen.

Schon seit den 1970ern wird der Normalisierte Differenz Vegetationsindex NDVI genutzt um die Vegetation zu untersuchen. Er ist einer der am häufigsten verwendeten Indizes, welcher sowohl Reflektion als auch Radianz berücksichtigt. Er setzt sich aus dem Quotient der Differenz der NIR-Reflektion und der Reflektion des roten Lichtanteils sowie der Summe beider Lichtanteile zusammen (Motohka *et al.*, 2010).

Formel 2: Berechnung des NDVI. Quelle: (Jones und Vaughan, 2010.)

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$$

Die Werte des NDVI reichen von -1 bis 1. Negative Werte zeigen meist Wasser- oder schneebedeckte Flächen auf, Werte nahe 0 beschreiben einen vegetationslosen Untergrund und Werte nahe 1 deuten auf eine stark ausgeprägte bis vollkommene Vegetation hin. Der Algorithmus nutzt somit die Sensibilität beider Bänder zu dem Pigment Chlorophyll aus (Jones und Vaughan, 2010).

Der NDVI weist viele Vorteile auf. Dazu zählen vor allem die einfache Handhabung, das gute Einschätzungsvermögen des *leaf area index* LAI und die Fähigkeit Vegetationsbedeckung zu ermitteln und deren Vitalität zu untersuchen (Fischer *et al.*, 2019; Jones und Vaughan, 2010). Zusätzlich wirkt der NDVI ausgleichend bei variierenden Lichtverhältnissen, Oberflächenneigungen und weiteren für die Datenaufnahme einflussreichen Faktoren (Lillesand *et al.*, 2004). Fischer *et al.*, (2019) vertreten die Hypothese, dass der NDVI Aussagen über die Bedeckung und Artenanzahl in einem treffen kann und großes Potenzial hat, Veränderungen in Gletschervorfeldern zu erkennen und zu untersuchen. Zudem können stabile und instabile Untergründe erfasst werden, wie beispielsweise Schwemmfächer, ungesfestigte Moränen und Flussbetten. Anwendungsbereiche sind beispielsweise das Monitoring von Brandgefahren oder landwirtschaftlicher Produktion (Lillesand *et al.*, 2004). Der NDVI weist jedoch auch Nachteile auf. So besteht eine große Varianz der Ergebniswerte im jahreszeitlichen Verlauf und Jahresvergleichen (Motohka *et al.*, 2010). Dies beruht auf unterschiedlichen Faktoren. Einerseits variiert der NDVI, durch Unterschiede im Chlorophyllgehalt der Blätter, dem strukturellem Aufbau und den biochemischen Komponenten in den Blättern. Andererseits können durch unterschiedliche Aufnahme- und Einstrahlungswinkel Schatten entstehen, die Reflektionsverhältnisse von rotem Licht und NIR Anteilen abändern können. Dies ist allerdings ein eher schwacher Einfluss (Jones und Vaughan, 2010). Zudem weisen Motohka *et al.*, (2010) daraufhin, dass der NDVI nicht sensibel genug ist, um subtile Veränderungen wie die Laubfärbung -besonders von Gelb zu Rot- wahrzunehmen. Grund dafür sind die Reflektionsdaten des grünen Lichtanteils, die in der Berechnung des NDVI nicht enthalten sind.

Fortbestand von Vegetationsindizes über einen langen Zeitraum

Abschließend muss erwähnt werden, dass Reflektionswerte aller VIs starke Differenzen aufweisen können bei Verwendung verschiedener Sensoren oder unterschiedlichen Aufnahmedaten. Dies führt folglich zu Variationen in den erhobenen Datensätzen. Um Abweichungen und Fehlerquellen zu vermeiden sollten stets die gleichen Sensoren zur Datenaufnahme verwendet werden. Ebenso muss der Aufnahmeablauf beibehalten werden unter beispielsweise der Verwendung des gleichen Maßstabs und Kalibrierungsmethoden (Jones und Vaughan, 2010).

Die Anwendung eines geregelten und reproduzierbaren Workflows stellt ein hilfreiches Werkzeug zur Datenaufnahme dar, welches vereinfachend wirkt und Vergleichbarkeit schafft. Folglich wird im nächsten Kapitel der erarbeitete Workflow dieser Forschungsarbeit vorgestellt und erörtert.

### 3. Einführung in das Untersuchungsgebiet

#### 3.1 Allgemeine Informationen zum Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet dieser Forschungsarbeit beschreibt das Gletschervorfeld des Ödenwinkelkees und wird in Abb. 9 visualisiert. Das durch den Gletscher geformte Trogtal befindet sich am Talschluss des Stubachtals in dem Salzburger Teil des Nationalpark Hohen Tauern und liegt im Natura 2000 Schutzgebiet. Es grenzt an die Bundesländer Tirol und Kärnten und liegt auf einer Höhe von etwa 2.150 m ü. NN (Slupetzky, 1997). Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von südlicher nach nördlicher Richtung an der Westseite der Glocknergruppe und an der Ostseite der Großvenedigergruppe. Der Gletscher Ödenwinkelkees wird von den folgenden Gipfeln Totenkopf, Hohe Riffel, Johannisberg, Eiskögele, Hoher Kasten und Medelzkopf eingefasst (Gewolf, 2004).

Die Klimastation Rudolfshütte auf 2.304 m ü. NN der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG befindet sich in der näheren Umgebung und erlaubt einen Einblick in die vorherrschenden klimatischen Bedingungen des hochalpinen Klimas. Es zeichnet sich durch Höhenlage bedingte, ganzjährig kühle Temperaturen aus und wird lokal charakterisiert durch erhöhte Niederschlagsmengen, langanhaltende Schneebedeckung, verkürzte Sonnenscheindauer, starke Gletscherwinde aus südlicher Richtung und folglich einer kurzen Vegetationsperiode (Gewolf, 2004). Das Klimadiagramm unter Abb. 9.2) zeigt den monatlichen Temperatur- und Niederschlagsdurchschnitt der Klimastation Rudolfshütte von den Jahren 1990 bis 2020. Die maximalen Niederschlagswerte sind im Sommer zu beobachten. So fällt im Juli eine durchschnittliche Niederschlagsmenge von 290 mm. Im Gegensatz dazu wird im Wintermonat Februar die geringste Niederschlagsmenge von etwa 152 mm verzeichnet. Insgesamt fallen ca. 2.400 mm Niederschlag pro Jahr. Die durchschnittliche mittlere Jahrestemperatur betrug innerhalb der 30 Jahre  $0,12^{\circ}\text{C}$ . Im Vergleich dazu betrug die durchschnittliche mittlere Jahrestemperatur von 1961 bis 1980  $-1^{\circ}\text{C}$ . Die höchsten Temperaturen werden im August mit etwa  $8,5^{\circ}\text{C}$  festgestellt und die niedrigsten Durchschnittstemperaturen im Februar mit etwa  $-7^{\circ}\text{C}$  (ZAMG, 2021).

Das Erscheinungsbild des Ödenwinkelkees durchlief seit 1850 eine große Veränderung aufgrund der Folgen des Klimawandels, wie in Abb. 9 visualisiert. Während der kleinen Eiszeit um 1850 stieß der Gletscher stark vor. Weitere kleinere Gletschervorstöße ereigneten sich um 1900 und 1925 und sind heutzutage an den Moränenwällen im Trogtal zu erkennen. Kritzen an den Festgesteinhängen deuten auf eine ehemalige Höhe von bis zu 2600 ü. NN um 1850 hin (Slupetzky *et al.*, 1991). Aufgrund der Gletscherschmelze wurde ausgehend vom Gletscherhöchststand während der kleinen Eiszeit um 1850, ein Gebiet von etwa  $0,9\text{ km}^2$  freigelegt. Aktuell weist der Ödenwinkelkees eine Fläche von  $1,4\text{ km}^2$  (Stand 2015) auf, wobei er sich über eine Länge von 2,6 km in Höhen von 2190 m bis zu 2880 m ü. NN erstreckt (Junker *et al.*, 2020).

Als Folge des Gletscherrückzugs erfahren paraglaziale Gebiete eine Destabilisierung sowie Änderung der Hydrologie und dem Sedimenttransport im subglazialen Becken (Fischer *et al.*, 2019). Der Gletscherfluss Ödbach, entstanden durch die zunehmende Schmelzwasseraktivität des Gletschers, fließt vom Gletschertor des Ödenwinkelkees bis zum Tauernmoossee und weist eine geflochtene Form mit saisonal variierenden Abflussmengen auf. Zuflüsse sind an dem West- und Osthang vorhanden, welche den Gletscherbach zusätzlich speisen (Slupetzky *et al.*, 1991).

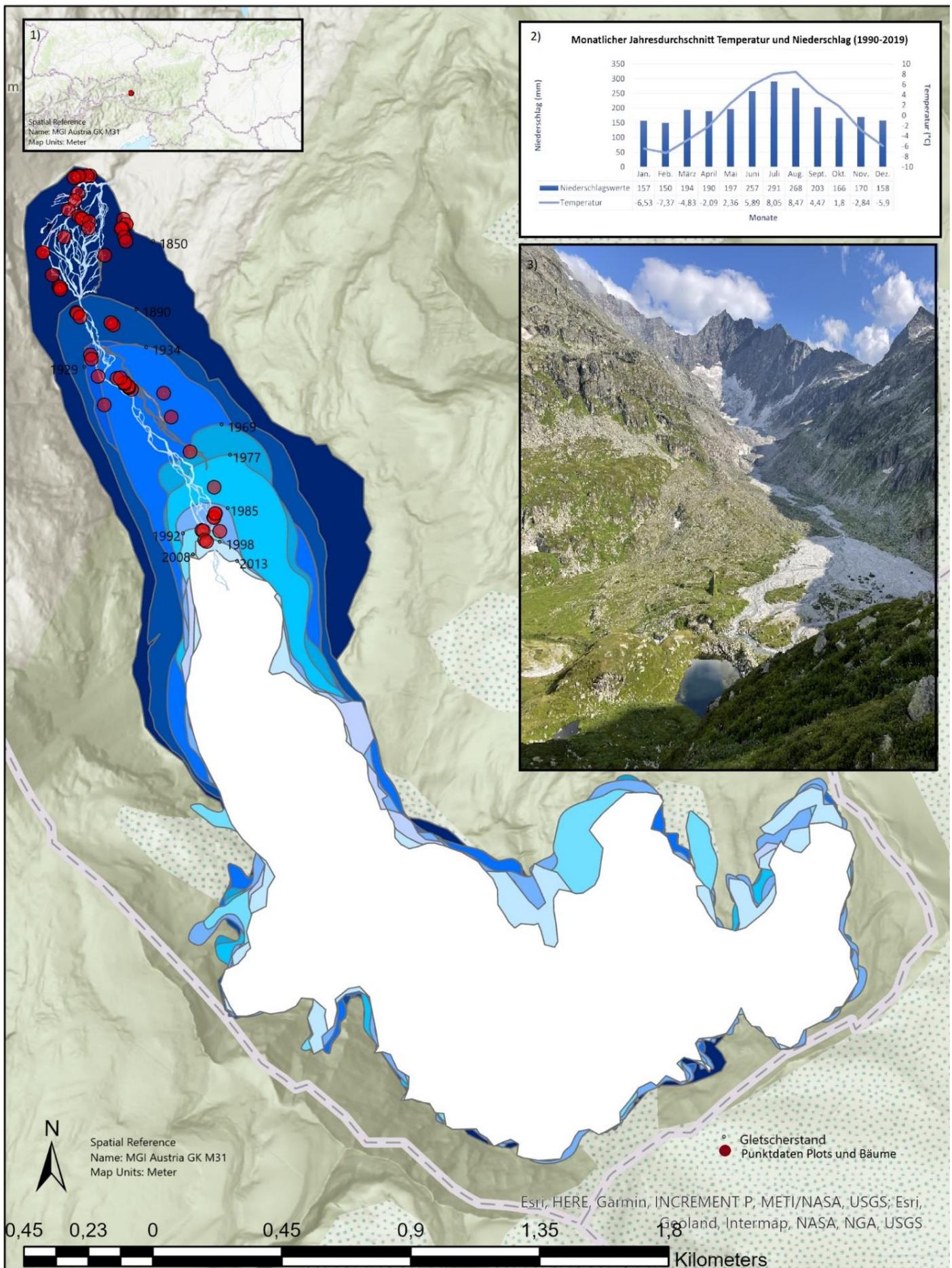


Abbildung 9: Das Untersuchungsgebiet mit den Gletscherständen der Jahre 1850 bis 2013 mit 1) der Lage, 2) dem Klimadiagramm der letzten 30 Jahre und 3) einem Foto des Trogtals. Quelle: eigene Darstellung mit Daten der ZAMG und Universität Salzburg.

Geologisch betrachtet befindet sich das Tal in den Ostalpen und weist unterschiedliche geologische Untergründe vor. Die Faltung des Alpengebirges ereignete sich vor etwa 65 Mio. Jahren, nachdem sich mit Beginn des Jurazeitalters die afrikanische Platte unter die eurasische Platte schob und eine isostatische Hebung bewirkte. Durch den vor 20 Mio. Jahren einsetzenden Prozess der Metamorphose - der Gesteinsbildung unter hohen Temperatur- und Druckgegebenheiten im Inneren der Erdkruste - ist das Untersuchungsgebiet vornehmlich durch Gneise, Schiefergestein und Serpentin gekennzeichnet. So finden sich auf den westlichen Hängen überwiegend sub-penninische Granitgneise und auf der östlichen Hangseite penninische Schiefergesteine (Junker *et al.*, 2020). Dies ermöglicht eine deutliche Unterscheidung in die für die Hohen Tauern charakteristische dunkle Schieferhülle und dem helleren Zentralgneis (Krainer, 2015).

Die vorkommenden Böden basieren zum einen auf den Verwitterungsprozessen des Untergrundes und sind zum anderem stark vom Geländealter geprägt. Tscherko (nach Gewolf, 2004) fand Silikatrohböden, Protoranker und Ranker auf Standorten mit kürzlichem Gletscherrückzug, also seit etwa 1970 bis 1994 und Braune Ranker und Dystrophe Ranker auf älteren Standorten, die etwa seit 1850 bis 1950 eisfrei sind. Bereiche außerhalb des Gletschervorfelds verfügen über die längste mögliche Entwicklungszeit und sind durch Podsolranker gekennzeichnet.

Auch die Vegetation im Gletschervorfeld ist stark durch den Gletscherrückzug geprägt und entspricht einer Alpinvegetation, welche flächendeckend ist jedoch nur geringe Wuchshöhen erreicht. Zeigerpflanzen sind unter anderem *Vaccinium myrtillus* oder *Empetrum nigrum*. Jedoch ist die Vegetation nicht gleichmäßig verteilt. So findet sich nahe der 1850er Moräne ein Anstieg der Vegetationsdynamik und -dichte (Gewolf, 2004). Dieses Gebiet ist gekennzeichnet durch einen längeren Entwicklungszeitraum und einer somit folgenden Ansiedlung niederwachsener Weidenarten, wie der Spießweide *Salix hastata*. Standorte die als kurzzeitig eisfrei gelten sind gekennzeichnet durch Pionierpflanzen, krautartige Gewächse und Thallophyten, wie Moos- und Flechtenarten. Beispiele hierfür sind *Rhicoarpon geographicum* und *Saxifraga bryoides* (Slupetzky *et al.*, 1991). Somit ist eine Sukzession in ehemals glaziale Gebiete der Untersuchungsstandorte zu erkennen. *Thlaspietea rotundifolii* sind Pflanzenarten, die Extremstandorte in Gebirgslagen besiedeln und gegen mechanische Einflüsse vergleichsweise unempfindlich sind. Diese treten neben der Klasse *Salicetea herbaceae* im Ödenwinkelkees häufig auf und beschreiben Moose oder kleinwüchsige Kraut-Weiden, die sich besonders gut an langanhaltende Schneebedeckungen und somit kurze Vegetationsperioden anpassen können. Zuletzt wurden im Jahr 2004 153 Taxa im Gletschervorfeld gefunden (Gewolf, 2004).

Die Nahe Umgebung des Untersuchungsgebiets ist anthropogen beeinflusst. Einerseits sind Tourismusangebote, wie Freizeitsport und der Ausbau des ehemaligen Alpinzentrums zum Berghotel „Rudolfshütte“ folgenreich und andererseits stellt die Energieerzeugung eine Umgestaltung der Umwelt dar. So repräsentiert der 1948 erbaute Weißsee-Staudamm mit einem Fassungsvermögen von 55,3 Mio. m<sup>3</sup> einen erheblichen Eingriff (Teufl, 1981).

Die geomorphologischen Gegebenheiten des Trogtals, welche bisher noch nicht erörtert wurden, werden als Teil der Ergebnisse in Form einer geomorphologischen Karte dargestellt und erläutert.

## 3.2 Vorarbeiten im Untersuchungsgebiet

Im Rahmen der Forschungsarbeit von Junker *et al.*, (2020) wurde im Trogtal des Ödenwinkelkees eine Forschungsplattform etabliert, welcher der Untersuchung von Multidiversität und ökologischer Komplexität unter Erfassung der abiotischen und biotischen Faktoren innerhalb einer Vielzahl an errichteten räumlichen Einheiten - den Plots - dient. Hierfür wurden im Sommer 2019 140 langfristige Plots entlang des Sukzessionsgradienten im Gletschervorfeld des Ödenwinkelkees errichtet, wobei 135 Plots innerhalb des

Gletschervorfelds in gleichmäßiger Verteilung zwischen dem Gletschermaximum um 1850 und dem derzeitigen Höchststand der Gletscherzunge eingerichtet wurden. Somit soll eine Chronosequenz der Sukzession mit einer hohen zeitlichen Auflösung garantiert werden. Die weiteren fünf Plots befinden sich außerhalb des Gletschervorfelds. Durch die Darstellung der Gesellschaftsbildung in den Plots über einen Zeitraum von etwa 170 Jahren ist erwiesen, dass die allgemeine Diversität und Zusammensetzung der Gesellschaften durch voneinander abhängigen Taxa bedingt werden und somit Auftreten, Fehlen oder Üppigkeit beeinflussen. Des Weiteren nimmt die Vegetationsbedeckung mit zunehmender Zeit seit dem Gletscherrückzug linear zu und es wurden 107 Pflanzenarten auf den 140 Plots identifiziert, wobei die Vegetationsbedeckung in den fünf Plots außerhalb des Gletschervorfeldes am höchsten war. So konnten Arten in den außerhalb liegenden Plots nur selten in Plots innerhalb des Gletschervorfeldes gefunden werden. Es wurde festgestellt, dass häufig eine Spezialisierung bei sehr jungen und sehr alten Plots bestand. Plots mit einem mittleren Alter von etwa 90 Jahren hingegen verfügten vermehrt über eine generalisierte Artenzusammensetzung und weisen häufig die gleichen Arten auf (Junker *et al.*, 2020). Zuletzt ist hervorzuheben, dass die Vegetationsbedeckung von der Lithologie stark beeinflusst wird und ein hoher Vegetationsgrad auf Plots mit feinem Sediment ausgemacht wurde. Dies könnte auf die Veränderung im Zusammenhang mit einem biogeomorphologischen Rückkopplungsfenster zurückzuführen sein (D'Amico *et al.*, 2014).

Die Hypothese dieser Studie lautet, dass die geringe Vegetationsbedeckung in jungem und fortgeschrittenem Alter eine Vielzahl an ökologischen Nischen bietet, welche von diversen Pflanzenarten erschlossen werden können. Diese dürfen jedoch nicht in direkter Konkurrenz um Raumannspruch und Nährstoffe zueinander stehen. Im Gegensatz dazu steigt mit einer zunehmenden Vegetationsbedeckung die Konkurrenz für jene Ressourcen an. Dies kann zur Dominanz spezifischer Arten führen und eine Abnahme der Biodiversität als Folge haben.

## 4. Methodik

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde ein Workflow (Abb. 10) entwickelt, welcher die verwendeten Methoden darstellt und anhand dessen der Ablauf erläutert wird.

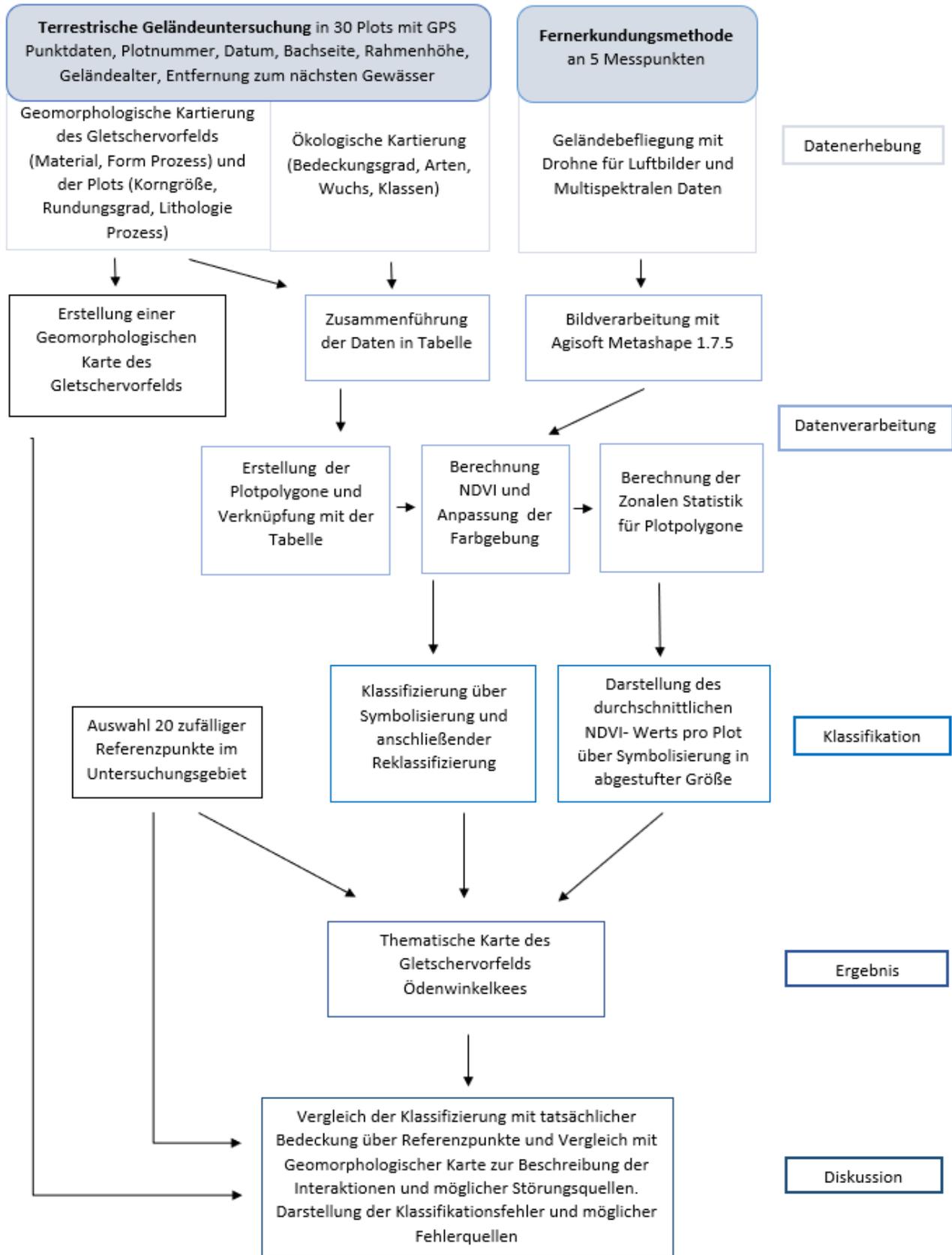


Abbildung 10: Methodologische Vorgehensweise. Sie ist unterteilt in fünf Gliederungspunkte mit den jeweiligen Schritten. Quelle: eigene Darstellung.

## 4.1 Datenaufnahme

Die Datenerhebung erfolgte im August 2021 in terrestrischer und einer fernerkundlicher Form. Für die terrestrische Datenaufnahme wurde ein Kartierungsrahmen als Untersuchungswerkzeug insgesamt 30 Mal in einer quasi zufälligen Verteilung im Untersuchungsgebiet ausgelegt und die innerhalb liegende Fläche untersucht. Bei dieser subjektiven Aufnahmestrategie wurde auf die Einbindung diverser Standorte Wert gelegt und gleichzeitig konnten vegetationsfreie Bereiche wie an Hängen, im Flussbett oder im Gewässer vermieden werden.

Der Rahmen hat eine Größe von 1 m<sup>2</sup> mit einer zusätzlichen Unterteilung mittels Schnüren in 10 cm<sup>2</sup>, wie zu sehen in Abb. 11 am Beispiel von plot\_3. Der Rahmen wurde stets genordet und die Standortbestimmung erfolgte über eine Punktdatenaufnahme der nördlichen Ecke mit einem GPS Gerät. Zudem wurden Plotnummer, Datum, Bachseite, Rahmenhöhe, Geländealter mit Angabe der minimal und maximal vergangenen Jahre seit der Deglaziation sowie die Entfernung zum nächsten Gewässer erfasst.



Abbildung 11: Foto von plot\_3 im nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebiets. Quelle: eigene Darstellung.

Neben den grundlegenden Daten wurden geomorphologische und ökologische Parameter kartiert. Die geomorphologische Kartierung erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurden die Parameter Material, Form und Prozess im Gletschervorfeld flächenhaft kartiert. Diese im ersten Schritt erhobenen Daten wurden im Anschluss zur Erstellung einer geomorphologischen Karte verwendet. Im zweiten Schritt wurden punktuell zu den Plot-Standorten die Parameter Korngröße, Rundungsgrad, Lithologie und Prozess erhoben.

Die ökologische Kartierung umfasste den Bedeckungsgrad, den Wuchs, die Arten und deren Einteilung in Klassen. Um den Bedeckungsgrad zu bestimmen wurde ein elektronischer Handzähler genutzt und zur Artenbestimmung wurde die App von *observation.org* verwendet.

Die fernerkundliche Datenaufnahme erfolgte über eine Befliegung am 06.08.2021 von etwa 10 Uhr bis 13 Uhr. Es herrschte eine bewölkte Witterung mit einer zeitweisen Auflockerung. Es wurde eine normale Gridflug Befliegung mit fünf Startpunkten durchgeführt, wobei die Flughöhe stets um die 150 m über dem Grund betrug und von 2080 m Seehöhe bis 2170 m Seehöhe reichte. Mithilfe des Kamertyps Sony Alpha 6500 RGB und dem MicaSense Altum Sensor konnten die sechs spektralen Kanäle Blau 475 nm, Grün 560 nm, Rot 668 nm, Red Edge 717 nm, Nahinfrarot 840 nm und Thermal 11 µm erfasst werden. Die erhobenen Daten wurden im Anschluss mit einer photogrammetrischen Auswertung mit dem Programm Agisoft Metashape 1.7.5 aufbereitet. Somit konnten multispektrale Daten des Untersuchungsgebiet mit einer Auflösung von 6 cm, sowie ein Orthofoto mit einer sehr hohen Auflösung von 2 cm gewonnen werden.

## 4.2 Datenverarbeitung

Neben der Bildverarbeitung waren noch weitere Schritte in der Datenverarbeitung nötig. So wurden die Daten der terrestrischen Datenerhebung in einer Tabelle zusammengeführt, in das Geoinformationssystem ArcGIS Pro geladen und mit den zuvor über Feature Class erstellten Plotpolygonen für die Punktdaten, verknüpft.

Parallel dazu wurden Verzerrungen und weitere Ungenauigkeiten der multispektralen Daten und Bilddaten mit dem Programm Agisoft Metashape 1.7.5 überarbeitet, sodass im Anschluss die NDVI Werte für das gesamte Untersuchungsgebiet berechnet und farblich gestaltet werden konnten. Anhand dieser Werte wurden über die Zonale Statistik statistische NDVI-Werte der Plotpolygone, wie Durchschnitt, Minimalwert, Maximalwert und deren Spanne, berechnet.

## 4.3 Klassifikation

Die Berechnungen der Zonalen Statistik bilden die Datengrundlage für die Symbolisierung des durchschnittlichen NDVI-Werts je Plot. Die 30 NDVI-Werte der Plots wurden in 5 gleich große Klassen unterteilt und die Darstellung erfolgte in abgestuften Größen und einer differenzierten Farbgebung.

Während der Klassifikation wurden sechs Bedeckungsklassen für das Gletschervorfeld ermittelt und über die Symbolisierung festgelegt und visualisiert. Für die Klassifikation wird meist ein Computeralgorithmus genutzt, um Informationen aus einem digitalen Bild zu gewinnen und folglich die Interpretation des Bildes zu ermöglichen. Sie ist als automatisierte Technik zu definieren, welche unterschiedliche Oberflächentypen auf einer Pixel zu Pixel Basis erkennt und den vorgegebenen Klassen anhand spezifischer spektraler Merkmale – auch als Spektrale Signatur bezeichnet – zuordnet. Hierbei ist auf eine möglichst hohe Homogenität innerhalb der Klassen und gleichzeitig starken Abgrenzung zu den weiteren Klassen zu achten (Jones und Vaughan, 2010). Häufig finden in diesem Zusammenhang überwachte und unüberwachte Klassifikationen – engl. *unsupervised* und *supervised Classification* – Verwendung. Diese sind von GIS-Programmen geführte Klassifikationen mit dem allgemeinen Vorteil einer leichten Handhabung. Im Klassifizierungsprozess stellte sich jedoch heraus, dass eine Differenzierung des NDVIs besonders bei lückenhafter und karger Vegetation eindeutiger über eine manuelle Eingabe in der Symbolisierung funktionierte, da die überwachten und unüberwachten Klassifikationen über keine ausreichende Genauigkeit verfügten (Fischer et al., 2019). Die Differenzierung der vegetationsfreien Klassen war verhältnismäßig einfach, jedoch war eine realitätsnahe Einteilung der Vegetation in multiple Klassen herausfordernd. Um die Klassengrenzen festzulegen wurde das Orthofoto herangezogen und mit dem NDVI Layer verglichen, um möglichst homogene Wertebereiche zu bestimmen. Da weder überwachte noch unüberwachte Klassifikationen Verwendung fanden konnten keine im Programm enthaltenen Genauigkeitsbewertungen vollzogen werden.

Um eine Einschätzung über die standortspezifische Genauigkeit der gebildeten Klassen zu geben wurden daher 20 zufällig ausgewählte Referenzpunkte im Gletschervorfeld in ArcGIS Pro erstellt. Anhand dieser Punkte wurde verglichen, ob die vorgegebene Bedeckungsklasse mit der tatsächlichen Oberflächenbedeckung übereinstimmt, unter Einbezug des Klassifikation Layers und dem Orthofoto.

Die Ergebnisse sowie die abschließende Diskussion stellen die letzten beiden Gliederungspunkte dar, welche in den folgenden Kapiteln genauer erläutert werden sollen. Die Ergebnisse wurden in drei Teile untergliedert, um die Daten differenzierter darstellen zu können. Zunächst werden die Ergebnisse der geomorphologischen Kartierung vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnissen der Punktdatenaufnahme innerhalb der Plots erörtert und abschließend werden die Ergebnisse der Klassifikation erläutert.

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Ergebnisse der geomorphologischen Kartierung

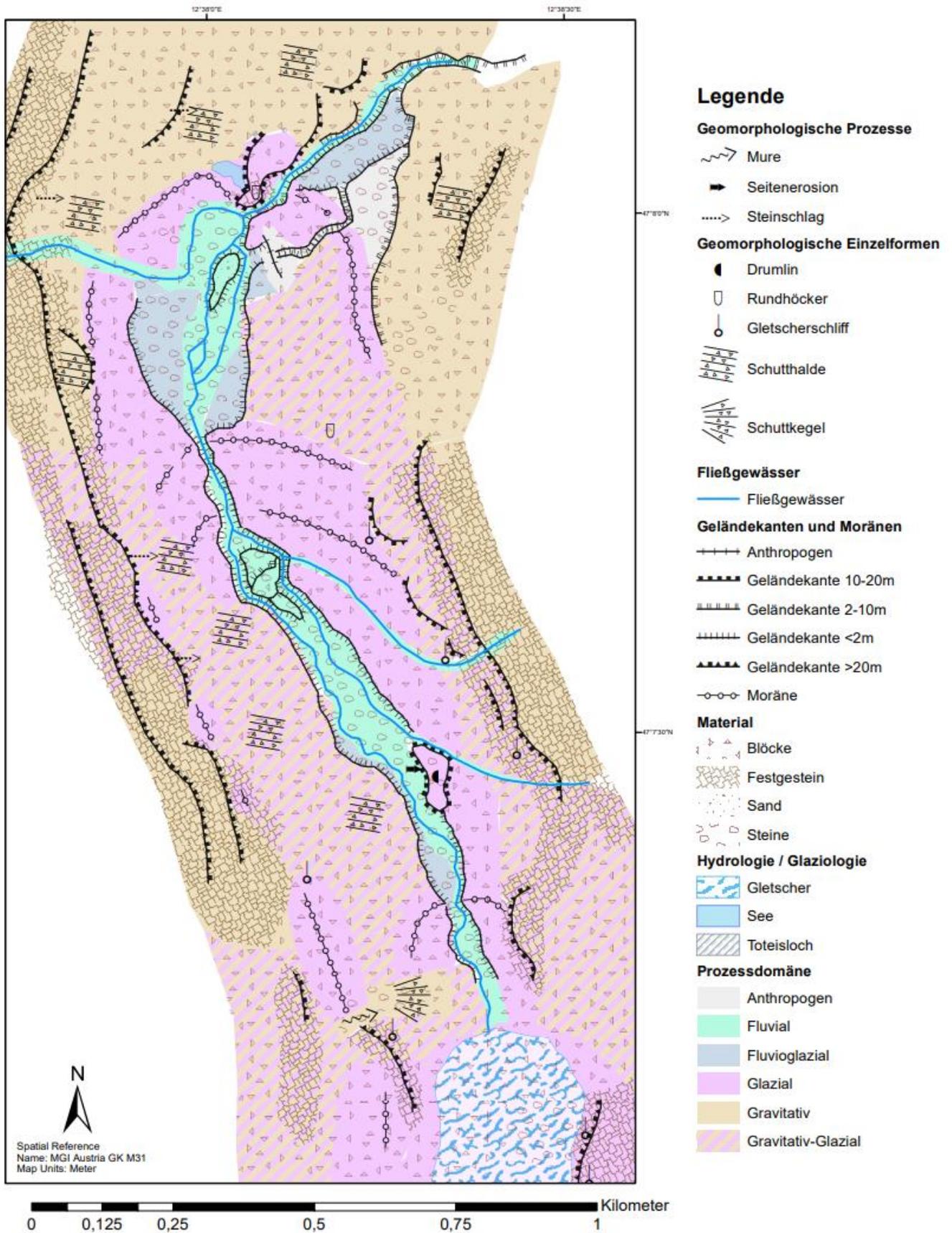
Anhand der im Gelände erhobenen Daten zu Material, Form und Prozessdomäne im Rahmen der geomorphologischen Kartierung wurde eine geomorphologische Karte über ArcMap erstellt, welche unter Abb. 12 zu sehen ist.

Insgesamt konnten die vier Klassen Blöcke, Festgestein, Sand und Steine beim Material und fünf geomorphologische Einzelformen festgestellt werden, von denen Drumlin, Rundhöcker und Gletscherschliff als rezent gelten und Schutthalde sowie Schuttkegel aktive Formen darstellen.

Die anthropogene Prozessdomäne findet sich um den Wall im nördlichen Bereich des Untersuchungsgebiets. Die fluviale Prozessdomäne tritt neben den Fließgewässern, wie dem Ödbach in Kraft und ist häufig umgeben von der fluvioglaziale Prozessdomäne. Gravitative Prozesse wie Steinschläge erfolgen meist in Hangnähe, aufgrund der Destabilisierung, wohingegen die gravitativ-glaziale Prozessdomäne häufig tiefer ins Tal hineinragt. Alle weiteren Flächen des Untersuchungsgebiets sind glazial geprägt. Somit konnten insgesamt sechs Prozessdomänen festgelegt werden, welche für das Trogtal geomorphologisch bedeutsam sind.

Das Untersuchungsgebiet ist ein dynamisches System, in dem die gravitativen und fluvialen sowie die Mischformen der fluvioglazialen und gravitativ-glazialen Prozessdomänen, in dem ursprünglich glazial dominierten Trogtal, zunehmend an Bedeutung gewinnen. Diese Änderungen sind Anzeichen einer paraglazialen Anpassung. Es finden sich zwar diverse rezente glaziale Formen im Trogtal, wie Gletscherschliff, Rundhöcker oder Moränen (Slupetzky, 1997), jedoch treten aktive oder kürzlich entstandene Formen, wie Murkegel, häufiger auf. Zudem ist eine Zunahme des Sedimentsaustrags durch fluviale Prozesse zu beobachten, welche ein weiteres Charakteristikum der paraglazialen Anpassung ist (Dikau et al., 2019a). Das Gletschervorfeld ist durch variable Muster der Sedimentablagerungen charakterisiert, welche vom Gletscher stammen. Neben subglazialen und glaziofluvialen Sedimenten bestimmen grobe Blöcke - ehemals supraglazialer Schutt - die Oberflächenmaterialzusammensetzung (Junker *et al.*, 2020).

# Geomorphologische Karte Gletschervorfeld Ödenwinkelkees



Kartenerstellerin: Karoline Kraus  
Datum: 10.10.2021

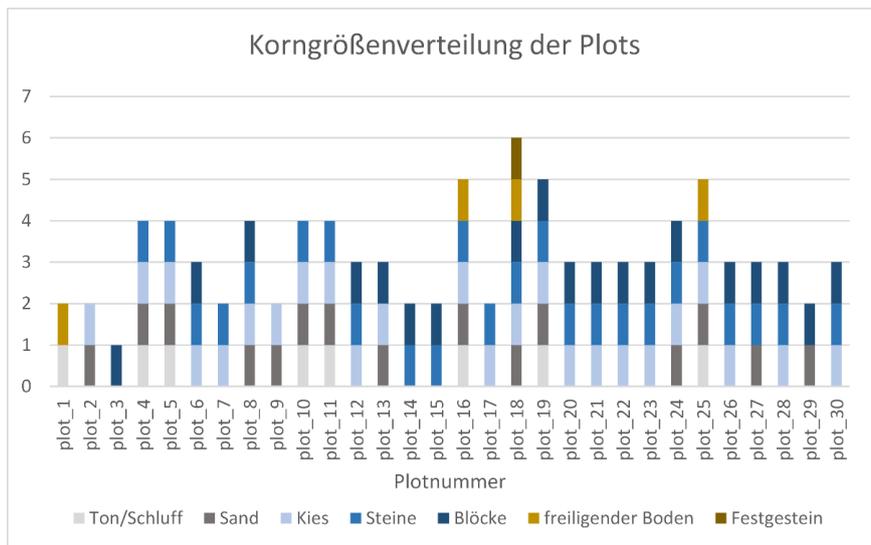
Abbildung 12: Geomorphologische Karte des Gletschervorfelds des Ödenwinkelkees. Quelle: eigene Darstellung.

## 5.2 Ergebnisse der Punktdatenaufnahme

### 5.2.1 Geomorphologische Ergebnisse

Im Rahmen der Punktdatenaufnahme innerhalb der Plots konnte eine Vielzahl unterschiedlicher Daten erhoben werden. Diese werden in drei Abschnitte unterteilt, beginnend mit den geomorphologischen Ergebnissen, um eine differenzierte Darstellung zu ermöglichen.

Unter Abb. 13 wird die Korngrößenverteilung der Plots in einem Balkendiagramm visualisiert, wobei plot\_3



mit nur einer vertretenen Korngröße – Blöcke - die geringste Vielfalt aufweist. Hingegen weist plot\_18 mit sechs vertretenen Korngrößen die größte Vielfalt auf. Die Zusammensetzung aus Kies, Steine und Blöcke tritt am häufigsten auf, gefolgt von der Kombination aus Ton/Schluff, Sand, Kies und Steine. Die am häufigsten auftretenden Korngrößen sind Kies und Steine, welche in jeweils 24 Plots zu finden sind. Festgestein trat lediglich ein Mal auf und ist damit die am seltenste auftretende Korngröße.

Abbildung 13: Deskriptive Statistik der Korngrößenverteilung in den Plots. Quelle: eigene Darstellung.

Korngröße in den Plots kann ein Indikator für die vorherrschenden geomorphologischen Prozesse sein, welche wiederum einen Einfluss auf die Ökologie an den Standorten nehmen.

Der Rundungsgrad des Materials in den Plots wird in Abb. 14 dargestellt. Dieser kann ein Hinweis auf die

vorherrschende Prozessdomäne sein, welche das Material bestimmt. Mit 15 von 30 Plots wurde der Rundungsgrad *rounded* am häufigsten gefunden. Im Gegensatz dazu trat *very angular* nur ein Mal in plot\_3 auf. Auf 12 Plots wurden nur jeweils ein Rundungsgrad festgestellt. Auf den zwei Plots plot\_19 und plot\_22 konnten vier Rundungsgrade erhoben werden. Diese Plots stellen somit die höchste Vielfalt dar.

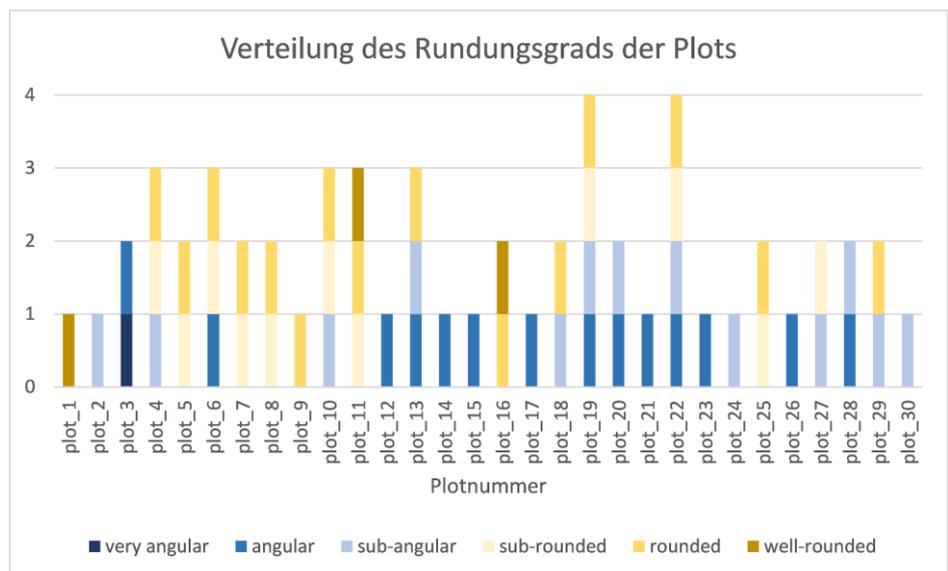


Abbildung 14: Deskriptive Statistik der Verteilung des Untersuchungsparameters Rundungsgrad in den Plots. Quelle: eigene Darstellung.

Zuletzt wurden noch die Lithologie (Abb. 15) und die Prozessdomäne (Abb. 16) erhoben. Die Lithologie der Plots ist mit 50 Prozent oder 15 Plots durch einen Mix aus metamorphen Gesteinen und Gneisen dominiert. 12 Plots und somit 40 Prozent der Untersuchungseinheiten weisen Gneise auf und drei Plots weisen aufgrund ihrer ausgeprägten Vegetationsbedeckung keine Lithologie auf.

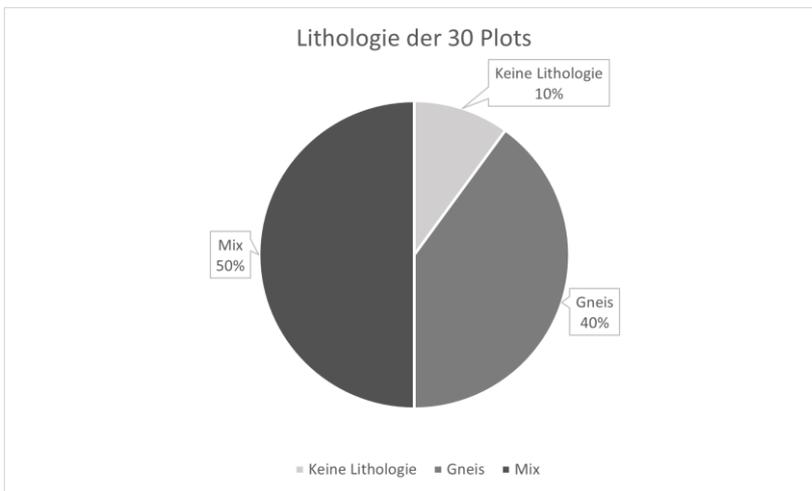


Abbildung 15: Deskriptive Statistik des Vorkommens der Lithologie in den Plots. Quelle: eigene Darstellung.

Die am häufigsten vertretene Prozessdomäne in den Plots ist die glaziale mit 17 Plots oder 57 Prozent. Am zweit häufigsten trat die fluviale Prozessdomäne mit sieben Plots oder in 23 Prozent der Plots auf. 13 Prozent der Plots – vier Plots - sind gravitativ-glazial beeinflusst. Die Prozessdomäne, welche am seltensten auftrat ist die fluvioglaziale mit sieben Prozent oder umgerechnet in zwei Plots. Die gravitativen und anthropogenen Prozessdomänen wurden in keinem Plot erfasst.

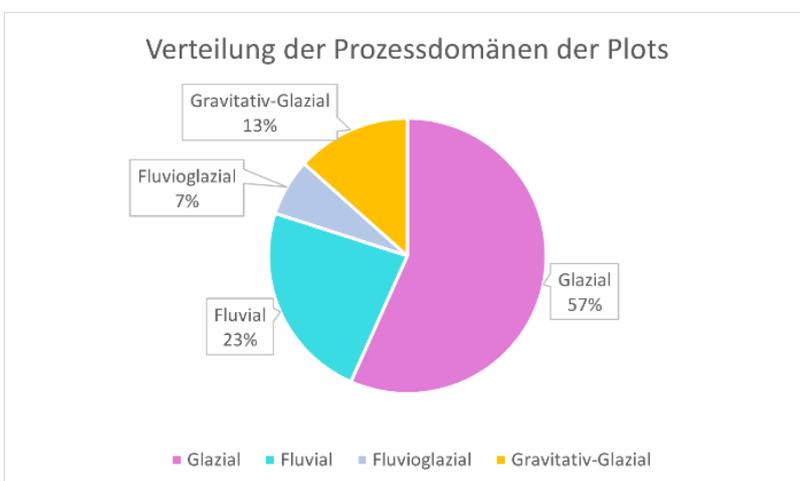


Abbildung 16: Deskriptive Statistik der auftretenden Prozessdomänen in den Plots. Quelle: eigene Darstellung.

## 5.2.2 Ökologische Ergebnisse

Wie bereits erwähnt wurden als Teil der ökologischen Kartierung diverse Untersuchungsparameter erfasst, wobei im Folgenden der Bedeckungsgrad, die Arten und deren zugeordneten Klassen dargestellt werden sollen. Der Bedeckungsgrad in Prozent der 30 Plots ist unter Abb. 17 zu erkennen. Mit 100 Prozent verzeichnet plot\_2 den höchsten Bedeckungsgrad gefolgt von plot\_9 mit 95 Prozent, wohingegen plot\_23 mit nur 9,5 Prozent den niedrigsten Bedeckungsgrad der Plots aufweist. Der durchschnittliche Bedeckungsgrad aller Plots beträgt 49 Prozent.

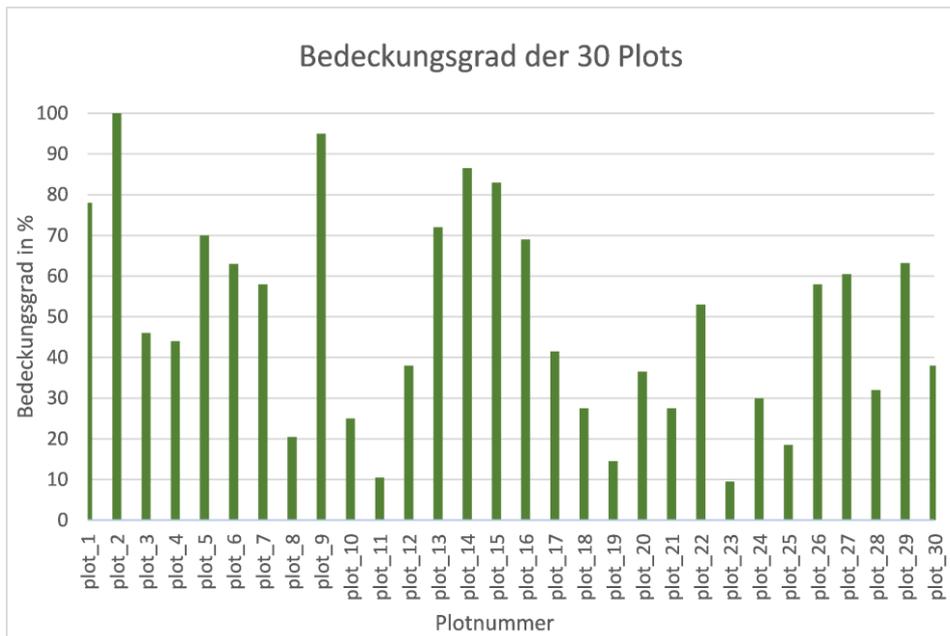


Abbildung 17: Deskriptive Statistik des Bedeckungsgrads der Plots. Quelle: eigene Darstellung.

Unter Tab 1. sind die in den Plots auftretenden Pflanzenarten aufgelistet, welche zusätzlich Klassen zugeordnet worden sind. In 29 von 30 Plots treten Gräser auf, welche somit am häufigsten vorkommen. Am seltensten traten die Arten Moor-Gagelstrauch, Huflattich und Gemeiner Gerber, die jeweils ein Mal vorkamen. Selten waren zudem noch Pilze, welche nur ebenfalls nur ein Mal gefunden wurden. Die am häufigsten auftretende Klasse beschreibt Gräser und die am seltensten auftretende Klasse beschreibt Pilze.

Tabelle 1: Vorhandene Arten in den Plots und Einteilung in Vegetationsklassen. Quelle: eigene Darstellung.

Plotnummer	Arten	Klassen
plot_1	Wollgras, Sauergras, Gestutztes Läusekraut	Gras, Kraut
plot_2	blaugraue Schwielenflechte, Moose, Gräser, Sukkulente, Runkelrübe	Gras, Moos
plot_3	Moos, Gras, Gemeiner Gerber, Meisterwurz, Süßgras, Gestutztes Läusekraut	Gras, Kraut, Moos
plot_4	Huflattich, Gras, Runkelrübe, Kirschlorbeer	Gras, Kraut, hölzernes Gewächs
plot_5	Gras, Klee, Huflattich, Moos, Lorbeerkirsche	Gras, Moos, Kraut, hölzernes Gewächs
plot_6	Sauergras, Meisterwurz, Sauerampfer, gemeines Leimkraut, Taubenkropfleimkraut	Gras, Kraut, Moos
plot_7	Moos, Gras, Ackerhornkraut, Kamille, Klee, Bach-Steinbrech	Gras, Kraut, Moos
plot_8	Moos, Gras, Kirschlorbeer, Klee	Moos, Gras, hölzernes Gewächs
plot_9	Distel, Kirschlorbeer, Klee, Gras, Meisterwurz, Gestutztes Läusekraut, Herbst-Löwenzahn	Gras, Kraut, hölzernes Gewächs
plot_10	Moor-Gagelstrauch	hölzernes Gewächs
plot_11	Gras	Gras
plot_12	Gras, Moos, Flechte, Fichte, Herbst-Löwenzahn	Gras, Moos, Hölzernes Gewächs, Kraut
plot_13	Gras, Flechte, grauer Alpendost	Gras, Kraut
plot_14	Gras, Moos, Flechte, Krähenbeere, Herbst-Löwenzahn, Runkelrübe	Gras, Moos, Kraut, hölzernes Gewächs
plot_15	Gras, Heidelbeere, Klee, Günsel, Kirschlorbeer, Flechten, Herbst-Löwenzahn	Gras, Moos, Kraut, hölzernes Gewächs
plot_16	Gras, Kirschlorbeer, Moos, Herbst-Löwenzahn	Gras, Kraut, hölzernes Gewächs
plot_17	Gras, Moos, Kirschlorbeer, Runkelrübe, Hahnenfuß	Gras, Moos, Kraut, hölzernes Gewächs
plot_18	Gras, Moos, Glockenblume, Kamille, Alpen-Hornkraut	Gras, Moos, Kraut, hölzernes Gewächs
plot_19	Gras, Moos, Alpen-Hornkraut, Kamille	Gras, Moos, Kraut
plot_20	Gras, Moos, Alpen-Hornkraut, Kamille, Pilz, Bach-Steinbrech	Gras, Moos, Kraut, Pilz
plot_21	Gras, Moos, Kamille, Bach-Steinbrech, krautige Arten	Gras, Moos, Kraut
plot_22	Gras, Moos, Steinbrech, Fichte, Bach-Steinbrech	Gras, Moos, Kraut, hölzernes Gewächs
plot_23	Gras, Sukkulente, Moos, Bach-Steinbrech, Steinbrech	Gras, Kraut, Sukkulente
plot_24	Gras, Moos, Distel, Grauer Alpendost, Bach-Steinbrech, Steinbrech	Gras, Moos, Kraut
plot_25	Gras, Moos, Glockenblume	Gras, Moos, Kraut
plot_26	Gras, Moos, Klee, Distel, Glockenblume, Herbst-Löwenzahn	Gras, Moos, Kraut
plot_27	Gras, Krähenbeere, Flechte, Moos, Herbst-Löwenzahn, Sukkulente, halbkugelige Teufelskralle	Gras, Moos, Kraut, Flechte
plot_28	Gras, Glockenblume, habkugeleige Teufelskralle, Herbst-Löwenzahn, Kirschlorbeer	Gras, Kraut, hölzernes Gewächs
plot_29	Gras, Klee, Runkelrübe, Glöckenblume, Herbst-Löwenzahn	Gras, Kraut
plot_30	Gras, Moos, Flechte, Runkelrübe, Sukkulente, Glockenblume, Bach-Steinbrech, Weide	Gras, Moos, Flechte, Kraut, Sukkulente

### 5.2.3 NDVI-Werte der Plots

Die NDVI-Wertebereiche der Plots mit ihrem minimal und maximal Wert, sowie deren Range sind in Abb. 18 visualisiert. Den minimalste NDVI-Wert mit -0,18 wurde bei plot\_18 verzeichnet und der maximale NDVI-Wert bei plot\_9 mit 0,95. Die größte Diskrepanz zwischen Minimal- und Maximalwert konnte bei plot\_4 mit 0,89 festgestellt werden.

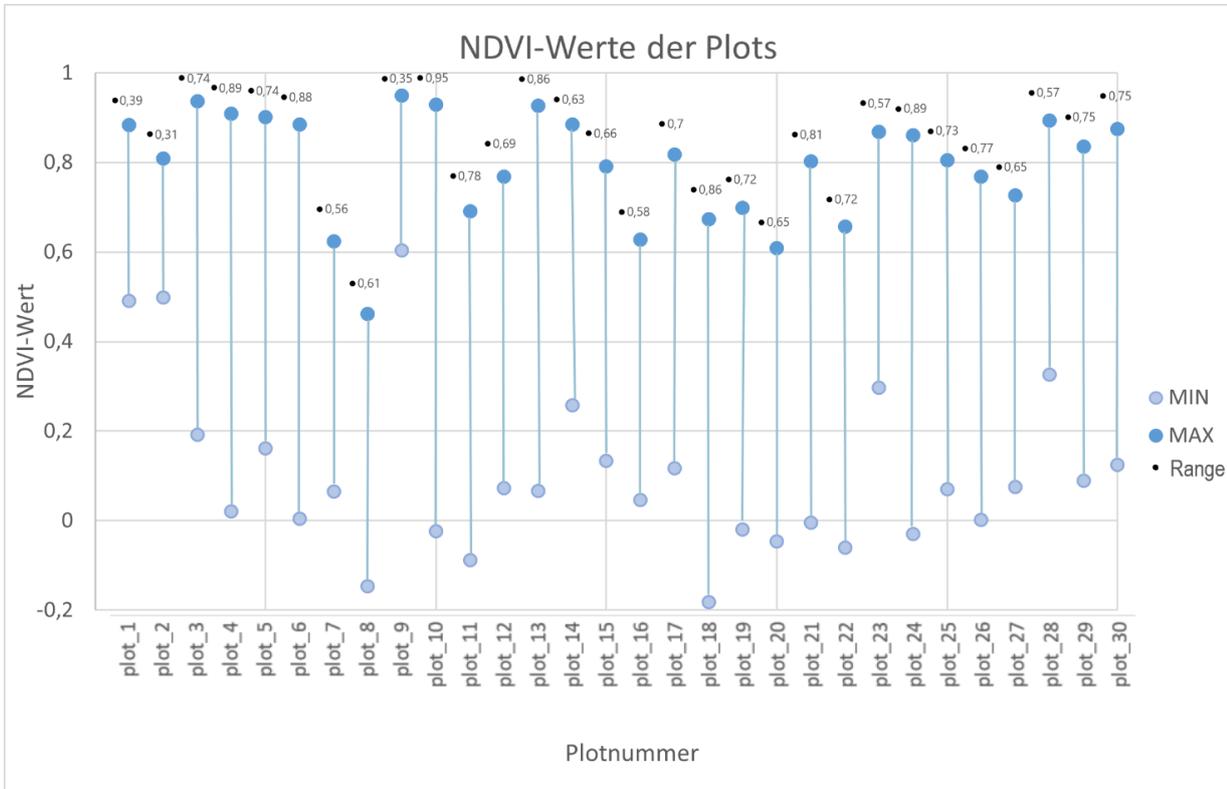


Abbildung 18: Deskriptive Statistik der NDVI-Wertebereiche der Plots, Quelle: eigene Darstellung.

Zudem wurden die durchschnittlichen NDVI-Werte aller Plots berechnet. Diese werden unter Abb. 19 in fünf gleichgroße Klassen unterteilt und in abgestufter Größe sowie farblich differenziert dargestellt. Zusätzlich wurden die Gletscherrückzugsstadien von 1850 bis 2013 in der Abbildung visualisiert. Die Anzahl der Plots, die der jeweiligen NDVI-Klasse und deren Wertebereich zugeordnet sind, werden unter Tab. 2 veranschaulicht.

Tabelle 2: Deskriptive Statistik der Plotanzahl pro NDVI-Klasse und deren Wertebereich. Quelle: eigene Darstellung.

NDVI-Klassen	Wertebereich	Plotanzahl
1	0,06 - 0,2	6
2	0,23 - 3,9	4
3	0,4 - 0,55	9
4	0,56 - 0,71	7
5	0,72 - 0,88	4

# NDVI-Werte der Plots $\emptyset$ im Gletschervorfeld des Ödenwinkelkees

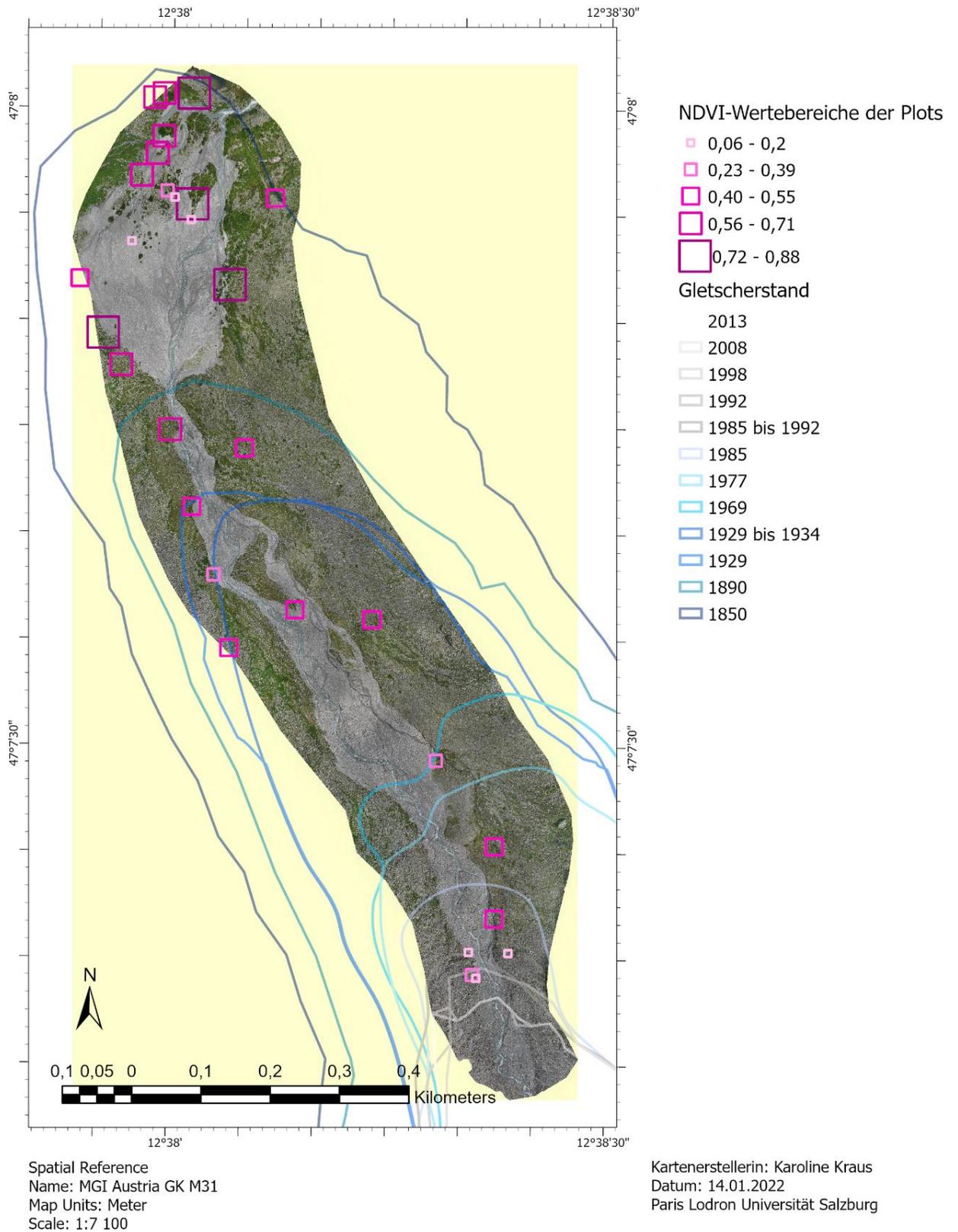


Abbildung 19: Darstellung der Plots und deren NDVI-Wertebereiche sowie den Gletscherständen. Quelle: eigene Darstellung.

Von den insgesamt 30 Plots gehören sechs Plots dem Wertebereich von I) 0,06 bis 0,2 an. Die Plots befinden sich zum einem im nördlichen Teil des Gletschervorfelds in der Schotterfläche mit Korngrößen im Bereich von Sand und Steinen und sind im südlichen Teil an der Flussaue und sind von Blöcken umgeben. Dem NDVI-Wertebereich von II) 0,23 bis 0,39 konnten vier Plots zugeordnet werden. Diese sind von Norden nach Süden im Untersuchungsgebiet gleichmäßig verteilt, wobei jeder Plot in der Aue liegt und an die Schotterfläche grenzt. Die vorliegenden Korngrößen reichen von Sand und Steinen bis zu Blöcken. Die meisten Plots wurden für den Wertebereich von III) 0,40 bis 0,55 gefunden. Diese neun Plots sind im gesamten Gebiet verteilt, finden sich jedoch eher im südlichen Teil des Untersuchungsgebiets. Die meisten sind außerhalb der Schotterfläche lokalisiert, jedoch bestehen auch Standorte, welche an diese angrenzen oder auf einer Insel sind. Die vorkommenden Korngrößen sind mit Sand, Steinen und Blöcken äußerst vielfältig. Mit sieben Plots ist der Wertebereich von IV) 0,56 bis 0,71 der zweithäufigste, wobei die Plots sich überwiegend im nördlichen Teil des Gletschervorfelds befinden und bis in den mittlern Teil des Untersuchungsgebiets hinein reichen. Sie treten auf den vegetationsstarken Talauen auf und in ihrer näheren Umgebung befinden sich häufig Blöcke. Zuletzt können dem Wertebereich von V) 0,72 bis 0,88 vier Plots zugeordnet werden, welche vor allem im nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets vorkommen. Sie befinden sich wie IV) in den Bereichen außerhalb der Schotterflächen jedoch mit einer weitreichenden Entfernung zu den umliegenden Hängen. Diese Gebiete zeichnen sich durch eine ausgeprägte Vegetation aus. Somit lässt sich festhalten, dass die Klassen mit den geringsten zugehörigen Plots II) 0,23 bis 0,39 und V) 0,72 bis 0,88 mit jeweils 4 Plots sind und die Klasse III) 0,40 bis 0,55 mit 9 Plots am häufigsten auftritt.

Tabelle 3: Deskriptive Statistik des Geländealters der Plots. Quelle: eigene Darstellung.

Plotnummer	maximales Jahr der Deglaziation	minimales Jahr der Deglaziation
plot_1	1850	1890
plot_2	1850	1890
plot_3	1850	1890
plot_4	1850	1890
plot_5	1850	1890
plot_6	1850	1890
plot_7	1850	1890
plot_8	1850	1890
plot_9	1850	1890
plot_10	1850	1890
plot_11	1850	1890
plot_12	1850	1890
plot_13	1850	1890
plot_14	1850	1890
plot_15	1890	1929
plot_16	1929	1934
plot_17	1929	1934
plot_18	1985	1992
plot_19	1985	1992
plot_20	1998	2008
plot_21	1998	2008
plot_22	1985	1985
plot_23	1985	1985
plot_24	1977	1985
plot_25	1969	1977
plot_26	1929	1934
plot_27	1929	1934
plot_28	1890	1929
plot_29	1850	1890
plot_30	1850	1890

Die unterschiedlichen Wertebereiche lassen sich auf eine Vielzahl der standortspezifischen Umweltfaktoren zurückführen, wie unter anderem dem Gletscherstand.

Die Rückzugsstadien des Gletschers von den Jahren 1850 bis 2013 werden in insgesamt 12 Stufen angegeben und teilen sich nach Tab. 3 entsprechend auf. Von den 30 aufgenommenen Plots weisen 16 Plots ein Alter von etwa 130 Jahren bis 170 Jahren auf, welches somit die am häufigsten auftretende Spannweite des Geländealters ist. Ein Alter von 45 bis 50 Jahren und 35 bis 45 Jahren weist jeweils ein Plot auf. Somit sind jene Spannweiten am seltensten vertreten. Die jüngsten Plots sind plot\_20 und plot\_21 mit einem Alter von etwa 20 bis 25 Jahren. Insgesamt ist ein signifikanter Unterschied in der Verteilung der Plots anhand des Geländealters zu erkennen.

## 5.3 Ergebnisse der Klassifikation

### 5.3.1 Bedeckungsklassen

Aus der vorangegangenen Methodik wurde eine Thematische Karte erstellt. Eine weniger ausführliche Version dieser Karte ist in Abb. 20 zu sehen, wohingegen die umfassendere thematische Karte inklusive dem Orthofoto und dem NDVI-Layer im Anhang angeführt ist. Abb. 20 zeigt die bestehenden Bedeckungsklassen des Gletschervorfelds mit Gewässer, Sand und Steine, Blöcke, Moose, Gräser und krautige Arten sowie Sträucher und Bäume. Zudem werden die Gletscherstände der Jahre 1850 bis 2013 und die Referenzpunkte angegeben.

Die Bedeckungsklassen wurden manuell über die NDVI-Wertebereiche festgelegt, welche in Tab. 4 dargestellt sind. Die negativen Wertebereiche wurden Gewässern und dem Material Sand und Steine zugeordnet. Aufgrund der ausgeprägtesten Photosyntheseaktivität wurde der Wertebereich von 0,7 bis 1 der Klasse Sträucher und Bäume zugeordnet. Die größte Spannweite weist die Klasse Gewässer mit 0,91 und geringste Spannweite besteht in der Klasse Sand und Steine mit 0,06.

Tabella 4: NDVI-Wertebereiche der erstellten Bedeckungsklassen. Quelle: eigene Darstellung.

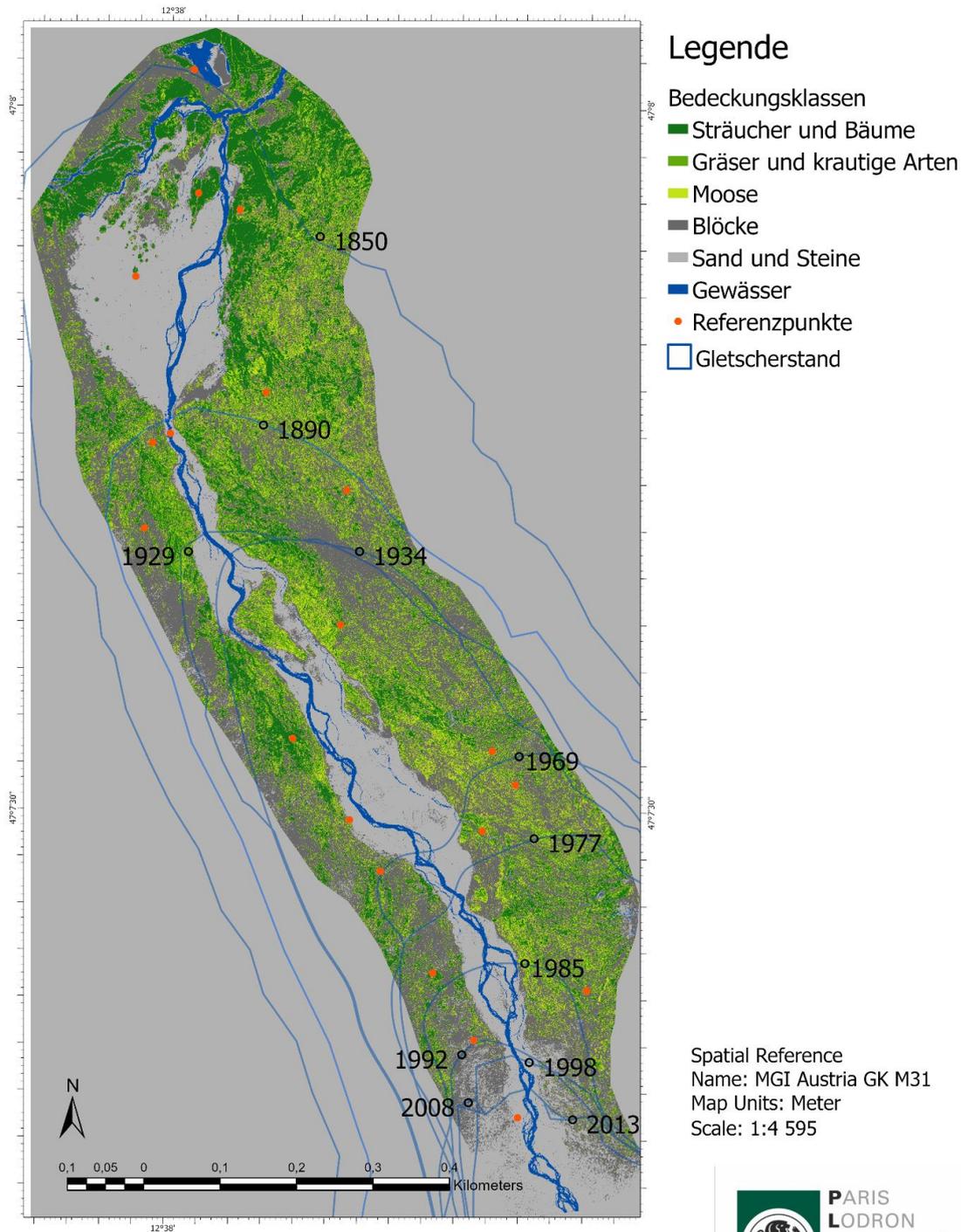
Klassenbezeichnung	NDVI-Wertebereich
Sträucher und Bäume	0,7 bis 1
Gräser und krautige Arten	0,54 bis 0,7
Moose	0,36 bis 0,54
Blöcke	0,03 bis 0,36
Sand und Steine	-0,09 bis 0,03
Gewässer	-1 bis -0,09

Man erkennt eine klare Differenzierung der Klassen. Die Klasse **Gewässer** klassifiziert Fließgewässer, wie den geflochtenen Ödbach mit seinen diversen Bacharmen sowie die Zuflüsse vom West- und Osthang und das kleine Stehgewässer am nördlichen Rand des Untersuchungsgebiets. Die Klasse erstreckt sich über das gesamte Untersuchungsgebiet von Süden nach Norden. Ausgehend vom Gletscher Ödenwinkelkees wird der Ödbach vom Schmelzwasser gespeist. Die Klasse ist vornehmlich umgeben von der Klasse **Sand und Steine**, welche – wie nicht anders erwartet – besonders ausgeprägt in der Schotterfläche ist. Allerdings tritt diese Art der Bedeckung auch nahe des südlichen Randes des Untersuchungsgebiets auf der westlichen sowie auf der östlichen Bachseite auf. Als **Blöcke** klassifizierte Oberflächen liegen meist außerhalb der Schotterfläche und treten vor allem an den Randbereichen mit vorherrschenden gravitativen Prozessen des Untersuchungsgebiets auf - besonders nahe der instabilen Stellen des Westhangs aufgrund des Gletscherrückzug. Sie finden sich häufig auf Schutthalden am Hangfuß. Zudem sind proglazialen Formen wie die Endmoränen von 1850 oder 1929, stark von der Klasse Blöcke gekennzeichnet und es lässt sich eine tendenzielle Zunahme der Blöcke im südlichen Bereich des Gletschervorfelds erkennen.

Für die Bedeckungsklassen der Vegetation lässt sich insgesamt feststellen, dass sie kaum innerhalb der Schotterflächen zu finden sind und zu den hangnahen Gebieten in ihrer Dichte abnehmen. Die Klasse der **Sträucher und Bäume** findet sich kleinräumig noch bis in südliche Teile des Untersuchungsgebiet nahe des südlichen Randes und umfasst Gebiete mit einem Geländealter von etwa 30 Jahren bis zu 170 Jahren. Allerdings besteht die höchste Dichte im oberen nördlichen Drittel um die 1850er Moräne bis zur 1890er Moräne wie auch beim Zufluss des Wasserfalls des Westhangs in den Ödbach. **Gräser und krautige Arten** bestehen im gesamten Gletschervorfeld, mit einem Geländealter von etwa 10 Jahren bis zu 170 Jahren, sind jedoch tendenziell im mittleren Bereich in Ufernähe vorherrschend. Sie treten somit überall da auf, wo Sträucher und Bäume sich noch nicht etablieren konnten. Die Klasse der **Moose** findet sich im gesamten Untersuchungsgebiet und besiedelt Flächen mit einem Geländealter von etwa 5 Jahren bis zu 170 Jahren. Sie kommt dort vor, wo Gräser und krautigen Arten sowie Sträucher und Bäume sich noch nicht etablieren konnten. Somit ist die Klasse häufig um die anderen beiden Vegetationsklassen und in lokalen

Zwischenräumen zu finden. Die Klasse kommt besonders auf der mittleren Flussinsel sowie in der näheren Umgebung des Gletschers im Süden vor.

## Vegetationsbedeckung des Gletschervorfelds des Ödenwinkelkees



Kartenerstellung: Karoline Kraus  
 Datum: 25.02.2022

Abbildung 20: Thematische Karte des Untersuchungsgebiets. Die Bedeckungsklassen, die Gletscherrückzugsstadien von 1850 bis 2013 und die Referenzpunkte sind enthalten. Quelle: eigene Darstellung.

Die Anteile der Bedeckungsklassen werden in Abb. 21 visualisiert. Es ist zu erkennen, dass Klasse Blöcke mit 36,89 % und am häufigsten vertreten ist, wohingegen die Klasse Gewässer mit 3,63 % am seltensten auftritt. Es lässt sich zudem feststellen, dass die leblosen Bedeckungsklassen mit 62,52 % häufiger im Untersuchungsgebiet auftreten als die Vegetationsklassen. Innerhalb derer sind Sträucher und Bäume mit 18,87 % am häufigsten und Gräser und krautige Arten mit 9,01 am geringsten vertreten.

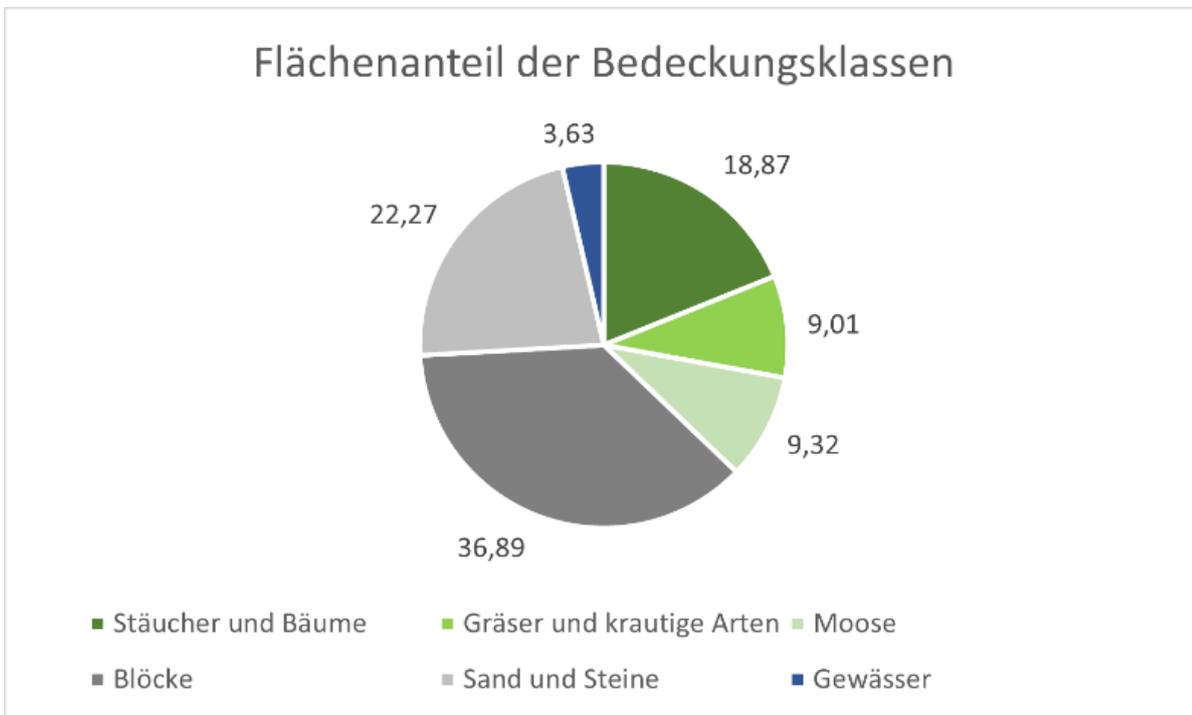


Abbildung 21: Deskriptive Statistik des Flächenanteils der Bedeckungsklassen. Quelle: eigene Darstellung.

### 5.3.2 Referenzpunkte

Abschließend sind in der Karte 20 Referenzpunkte dargestellt, welche Tab. 5 entsprechend auf die Bedeckungsklassen verteilt sind. Die meisten Referenzpunkte finden sich in der Bedeckungsklasse Blöcke mit 30 Prozent. Die geringste Anzahl an Referenzpunkten befindet sich in Klasse Gewässer.

Tabelle 5: Deskriptive Statistik der Anzahl und des Anteils der Referenzpunkte pro Bedeckungsklasse. Quelle: eigene Darstellung.

Bedeckungsklasse	Anzahl Referenzpunkte	Anteil der Referenzpunkte
Sträucher und Bäume	5	25
Gräser und krautige Arten	3	15
Moose	2	10
Blöcke	6	30
Sand und Steine	3	15
Gewässer	1	5

Bei der Analyse der Übereinstimmung der vorgegebenen Bedeckungsklassen der Referenzpunkte mit der tatsächlichen Bedeckung unter Tab. 6 erkennt man eine Übereinstimmung von 85 Prozent mit 17 von 20 Referenzpunkten. Bei den weiteren drei Referenzpunkten mit den vorgegebenen Bedeckungsklassen Sträucher und Bäume [RP\_6], Blöcke [RP\_9] und Moose [RP\_20] findet keine Übereinstimmung statt. Dies entspricht 15 Prozent.

Tabelle 6: Abgleich der Referenzpunkte in deren vorgegebenen Bedeckungsklasse und der tatsächlichen Bedeckung. Quelle: eigene Darstellung.

Referenzpunkte	Vorgegebene Bedeckungsklasse	Tatsächliche Bedeckung
RP_1	Sand und Steine	Sand und Steine
RP_2	Blöcke	Blöcke
RP_3	Sträucher und Bäume	Sträucher und Bäume
RP_4	Gräser und krautige Arten	Gräser und krautige Arten
RP_5	Sand und Steine	Sand und Steine
RP_6	Sträucher und Bäume	Gräser und krautige Arten
RP_7	Blöcke	Blöcke
RP_8	Blöcke	Blöcke
RP_9	Blöcke	Sand und Steine
RP_10	Sträucher und Bäume	Sträucher und Bäume
RP_11	Moose	Moose
RP_12	Gewässer	Gewässer
RP_13	Gräser und krautige Arten	Gräser und krautige Arten
RP_14	Sand und Steine	Sand und Steine
RP_15	Blöcke	Blöcke
RP_16	Sträucher und Bäume	Sträucher und Bäume
RP_17	Sträucher und Bäume	Sträucher und Bäume
RP_18	Gräser und krautige Arten	Gräser und krautige Arten
RP_19	Blöcke	Blöcke
RP_20	Moose	Blöcke

## 6. Diskussion und Fazit

Die vorliegende Studie stellt vor allem die Entwicklung und Etablierung einer einfachen Methode zugunsten zukünftiger Forschungsprojekte vor, um das Gletschervorfeld des Ödenwinkelkees auf geomorphologische und ökologische Gegebenheiten zu untersuchen und eine umfassende Datengrundlage zu schaffen. Unter Einbezug der geomorphologischen Karte sowie des hochauflösten Orthofotos und der Daten des NDVIs kann die Verteilung und auftretende Muster der erstellten Bedeckungsklassen der thematischen Karte, erläutert werden. Auch eine grobe Einschätzung der Interaktionen zwischen Geomorphologie und Vegetation kann somit stattfinden.

### 6.1 Methoden

Wie bereits erwähnt wurde für die Fernerkundung ein Erkundungssystem mit der Sony Alpha 6500 mit dem MicaSense Altum Sensor und einer Drohne gewählt. Die Vorteile der Verwendung einer Drohne bestehen darin, dass Daten eines weiträumigen Untersuchungsgebiets in einem geringen Zeitraum erhoben werden können. Zudem ist die Handhabung relativ einfach und die Datenerfassung kann unabhängig von anderen Systemen, wie zum Beispiel Satelliten, erfolgen. Somit sind eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung sowie eine flexible Anwendung gegeben. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Untersuchungsmethode nichtinvasiv ist und somit die alpine Vegetation schützt. So konnte eine extrem hohe Luftbilddauflösung von zwei Zentimetern mit Hilfe der Kamera erbracht werden und diverse multispektrale Daten des Untersuchungsgebiets mit dem Sensor erfasst werden. Diese ermöglichen die Berechnung von Indizes wie dem verwendeten NDVI. Besonders dieser eignet sich gut für die Langzeitbeobachtung von Vegetationsveränderungen in einem Untersuchungsgebiet (Fischer *et al.*, 2019). Weiterführend liefern die gleichzeitige Verwendung von Bildanalyse und GIS Software gehaltvolle Informationen für quantitative und qualitative Analysen. So können einerseits durch die Bildanalyse mit inbegriffener spektraler Analyse, zeitnahe Daten erhoben werden und mit räumlichen Analysen und visueller Integration über kontextabhängige Beziehungen der GIS Analysen, verknüpft werden.

Die Ergebnisse der terrestrischen Datenerhebung dienen als Referenzdaten, um vertiefende Erkenntnisse der Fernerkundungsdaten zu erlangen. Sie sind ausschlaggebend für die Einschätzung der NDVI-Werte, als Verifizierung derer oder um die Genauigkeit zu erheben (Jones und Vaughan, 2010).

Anhand der zuvor dargelegten Argumente ist die verwendete Methodik als äußerst zielführend zu erachten. Um eine höhere Differenzierung innerhalb der Vegetationsklassen zu erhalten und in weiterer Folge die biogeomorphologischen Interaktionen vertiefend zu untersuchen, könnten jedoch in zukünftigen Studien weitere Parameter erhoben werden

### 6.2 Verteilung der Bedeckungsklassen

Wie im Ergebnisteil bereits vorgestellt wurde, weisen die Bedeckungsklassen unterschiedliche Verteilungen auf. Das Vorkommen und die Verteilung der vegetationsfreien Bedeckungsklassen Gewässer, Sand und Steine sowie Blöcke sind auf geomorphologische Prozesse zurückzuführen.

Beginnend mit der Klasse **Gewässer** lässt sich eine nord-südliche Ausrichtung feststellen, welche vornehmlich den Gletscherfluss Ödbach repräsentieren. Der Fluss, welcher Schmelzwasser führt, wird zusätzlich von Gerinnen im südlichen Teil am Osthang und im nördlichen Teil am Westhang gespeist, welche vorwiegend Niederschlagswasser führen und demnach stark variierende Wassermengen führen. Diese Fließgewässer, wie auch das Toteisloch, werden durch ihre Spektraleigenschaften als Gewässer klassifiziert. Das Toteisloch beschreibt eine glaziale Hohlform, bei der ein Teil des Gletschereises vom Gletscher meist durch

Rückzugsbewegungen abgetrennt wird und infolgedessen schmilzt. Das Schmelzwasser sammelt sich in der entstandenen Hohlform und ein Stehgewässer bildet sich. Die Klasse **Sand** und Steine findet sich vor allem im Schotterfeld. Aufgrund von fluvialen und glaziofluvialen Prozessen wird Material wie Sand und Steine durch den Schmelzwasserfluss abgetragen, zerkleinert, transportiert oder abgelagert. Der glaziofluviale Prozess startet zunächst mit der zunehmenden Schmelzwasseraktivität aufgrund des Gletscherrückzugs, wird aber im Laufe der Zeit mit der Etablierung eines stabilen Flusssystems von der fluvialen Prozessdomäne abgelöst. Die Klasse findet sich auch auf kleinen Wanderpfaden in zwischen dichter Vegetation. Diese werden bei Niederschlägen mit hohen Niederschlagsmengen geflutet und stellen somit temporäre Gerinne dar. Dieser Zusammenhang könnte auch das Vorkommen dieser Klasse auf den Wegen erklären, da unter diesen Umständen fluviales und glaziofluviales Material an diesen Stellen abgelagert wird. **Blöcke** treten vor allem an den Randbereichen mit vorherrschenden gravitativen Prozessen des Untersuchungsgebiets auf. Die übersteilten Hänge, welche in der Vergangenheit durch den Gletschervorstoß entstanden, liegen heute frei und sind durch die variierenden Druckverhältnisse und im Besonderen der Abnahme des Drucks zunehmend instabiler. Somit sind jene Gebiete besonders anfällig auf die gravitativen Anziehungskräfte und werden demnach überwiegend von der gravitativen Prozessdomäne dominiert.

Bei der Verteilung der drei Vegetationsklassen Sträucher und Bäume, Gräser und krautige Arten als auch Moose sind mehrere Faktoren einflussreich. Demzufolge werden im folgenden Abschnitt die Verteilung der drei Klassen unter Einbezug des Geländealters, den glazieklimatischen Gegebenheiten, der geomorphologischen Aktivität sowie der vorliegenden und möglicherweise beeinflussenden geomorphologischen Formen erläutert. Aufgrund der Nähe zu bereits besiedelten Gebieten außerhalb des Gletschervorfelds kann angenommen werden, dass die Vegetationssukzession sehr rasch verläuft (Gewolf, 2004). Generell lässt sich jedoch feststellen, dass weder die Schotterflächen, welche fluvialen und glaziofluvialen Prozessen unterliegen und mit Sand- und Steinvorkommen ausgezeichnet sind noch die hangnahen Bereiche mit Blöcken, welche von gravitativen Prozessen gekennzeichnet sind stark besiedelt sind. Der Grund besteht darin, dass diese Bereiche aktive geomorphologische Störzonen mit einer hohen Frequenz und Magnitude darstellen. Bei den Hangbereichen kommt verstärkend hinzu, dass grobe Blöcke keine guten Standortbedingungen für die Pflanzenetablierung darstellen, da die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit begrenzt sind. So stellten Junker et al., (2020) fest, dass feines Sediment häufiger von Pflanzenarten besiedelt wird.

Für das Vorkommen der Klasse **Sträucher und Bäume** ist unter anderem das Geländealter verantwortlich und in Folge die geomorphologische Prozessaktivität. So tritt die Klasse Sträucher und Bäume überwiegend in Gebieten mit einem hohen Geländealter auf, da dort die geomorphologische Prozessaktivität stark abnimmt. Die in der Klasse enthaltenen Arten zeichnen sich durch eine lange Entwicklungszeit von mehreren Jahren bis Jahrzehnten aus und können demnach der fortgeschrittenen bis hin zur späten Sukzessionsstufe zugeteilt werden. Zudem befindet sich diese Klasse meist nahe rezenter Formen, wie dem Moränenwall von 1850 mit einer geringen bis gar keiner geomorphologischen Aktivität. Weitere Beispiele weniger gestörten Areale sind Inseln innerhalb der Schotterflächen. Zusätzlich verändern sich mit zunehmender Entfernung zum Gletscher die glazieklimatischen Bedingungen und Stress verursachende Gletscherwinde nehmen ab, was das Pflanzenwachstum und -bestehen vereinfacht.

Die Klasse der **Gräser und krautigen Arten** schließt an die vorherige Klasse an. Sie sind ebenfalls im gesamten Gebiet verbreitet, jedoch mit einem Schwerpunkt im mittleren Bereich. Sie werden in den nördlicheren Bereichen von den Arten der Sträucher und Bäume häufig verdrängt und kommen in diesen Gebieten überwiegend in Zwischenräumen vor. Das von dieser Klasse besiedelte Gelände hat ein Alter von 10 Jahren bis 170 Jahren. Somit dringen die Gräser und krautigen Arten in Gebiete mit einer erhöhten geomorphologischen Aktivität und beschwerlicheren glazieklimatischen Bedingungen ein. Durch die für die

Klasse meist niedrige Resistenz mit einer gleichzeitigen hohen Resilienz sind die Arten dieser Bedeckungsklasse in der Lage sich in lebensfeindlicheren Standorten, wie in Störungszonen, zu verbreiten. So werden die Arten zwar leichter verletzt oder zerstört von geomorphologischen Prozessen, aufgrund ihrer eher fragilen Beschaffenheit, jedoch haben die Arten Strategien entwickelt um sich besser von den Störungen zu erholen. Die Arten dieser Klasse sind somit den Pionierarten zuzuordnen. Jedoch ist anzunehmen, dass in abnehmender Entfernung zum Gletscher häufig mikrotopographisch geschützte Standorte, wie zum Beispiel Senken oder windgeschützte Bereiche von inaktiven Formen wie dem Drumlin, besiedelt werden.

**Moose** sind über das gesamte Untersuchungsgebiet mit einem Geländealter von 5 Jahren bis zu etwa 170 Jahren verbreitet und befinden sich somit in Gebieten mit einer hohen geomorphologischen Aktivität sowie starken glazial-klimatischen Bedingungen, wie nahe und innerhalb der Störzonen. Möglicherweise bevorzugen Arten dieser Klasse mikrotopographisch geschützte und sichere Zonen. Aufgrund ihrer stark ausgeprägten Resilienz ist es für die Arten dieser Bedeckungsklasse möglich, sich unter extremen Startbedingungen mit hoher Sonneneinstrahlung, Wasserverfügbarkeit oder starken Winden zu etablieren. Sie zählen daher ebenfalls zu den Pionierarten. Die Klasse findet sich jedoch auch in den Zwischenräumen der anderen Bedeckungsklassen der Vegetation im gesamten Untersuchungsgebiet.

Somit lässt sich gesamtheitlich eine Vegetationssukzession im Gletschervorfeld des Ödenwinkelkees feststellen, die aktive biogeomorphologische Prozesse in der Koexistenz diverser Pflanzenarten und -gesellschaften beinhaltet. Unterstützt wird diese These von Gewolf (2004), welche eine Erhöhung der Taxa innerhalb von etwa 20 Jahren von 1981 bis 2004 nachweisen konnte.

Die dargestellten Ursachen sind einige der möglichen Einflussfaktoren auf die Verbreitung der Vegetationsklassen, jedoch sind auch biotische Faktoren determinierend in der Vegetations- und Pflanzengesellschaftsverbreitung - wie bereits durch Haselberger et al., (2021) vertreten -. So sollen Sukzessionspflanzenarten weniger durch auftretende geomorphologische Störungen bestimmt sein sondern vermehrt durch den im Untersuchungsgebiet vorhandenen Samenpool. Der starke Einfluss von biotischen und interspezifischen Vegetationsfaktoren wird unterstützt von Junker et al., (2020). Dieser besagt, dass die allgemeine Diversität und Zusammensetzung der Gesellschaften durch voneinander abhängigen Taxa bedingt werden und somit Auftreten, Fehlen oder Üppigkeit beeinflussen.

## 6.3 Fehler

Die Klassifikation weist jedoch kleinräumig Fehler auf, welche in den vier folgenden Beispielen zu erkennen sind. Diese falsch klassifizierten Oberflächenbedeckungen können aufgrund diverser Fehlerquellen entstehen. Zu diesen zählen Fehler in der grundlegenden fernerkundlichen Messung, Ungenauigkeiten während der Bildverbesserung oder radiometrischen Korrektur. Zudem können Ungenauigkeiten in den Referenzwerten oder in der Klassifikation auftreten, welche auf die Wahl von Klassen mit zu geringen charakteristischen spektralen Unterschieden und unreinen Pixeln zurückzuführen sind.

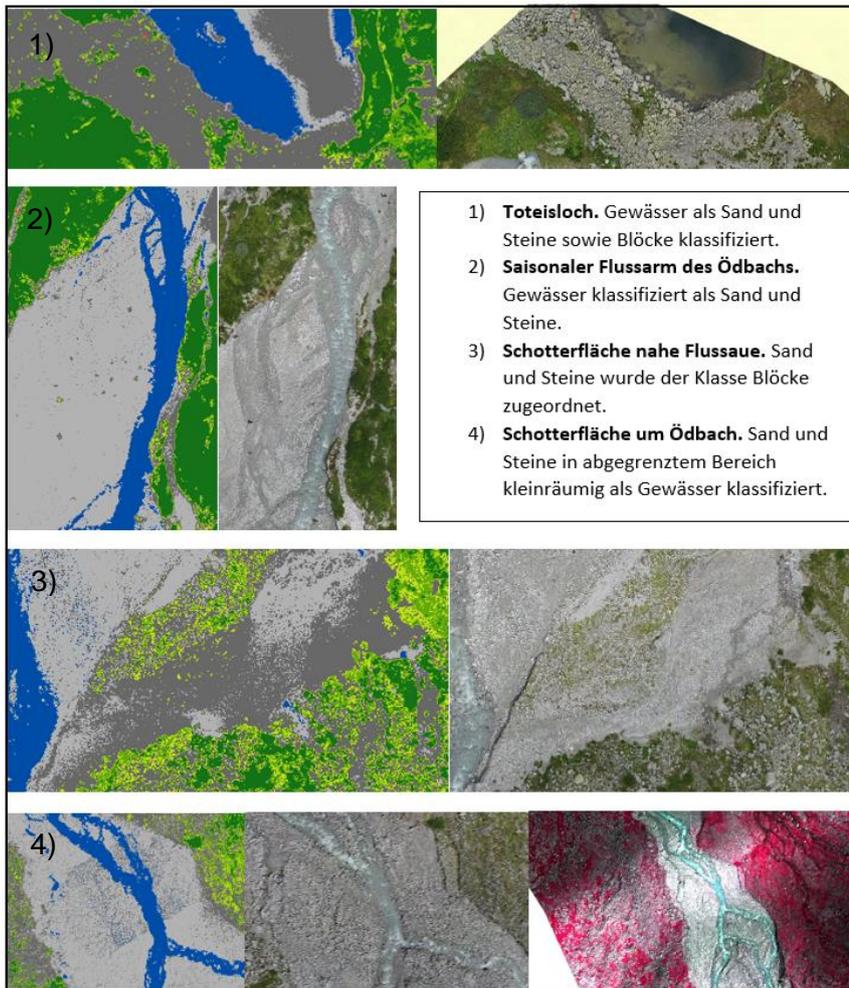


Abbildung 22: Screenshots falsch klassifizierter Bereiche des Untersuchungsgebiets.  
Quelle: eigene Darstellung.

Das erste Beispiel unter Abb. 22.1) zeigt das kleine Stehgewässer, wahrscheinlich ein Toteisloch, am nördlichen Rand des Untersuchungsgebiets. Dieses wurde fälschlicherweise nicht ausschließlich als Gewässer klassifiziert, sondern auch den Klassen Sand und Steine sowie Blöcke zugeordnet. Der Fehler könnte aufgrund der variierenden Gewässertiefe und dem Untergrund in einer Veränderung der spektralen Signatur und demnach der NDVI-Werte bestehen.

Unter Abb. 22.2) ist ein Teil des Gerinnelaufs vom Ödbach im nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets dargestellt. Wie zu erkennen ist wurde der Hauptarm mit einigen kleinen Seitenarmen als Gewässer klassifiziert. Jedoch wurde im linken Bildabschnitt kein zusammenhängender Flussarm dargestellt und das Flussbett als

Sand und Steine klassifiziert. Die Ursache könnte in der abweichenden Spektralen Signatur aufgrund der geringen Gerinnetiefe und des Wasservolumens begründet sein. Unter Abb. 22.3) wurde in der Schotterfläche die Oberflächenbedeckung Sand und Steine fälschlicherweise als Blöcke klassifiziert. Der Fehler könnte hierbei in der nicht ausreichend genauen Angabe der Klassenschwellenwerte bestehen und müsste weiterführend angepasst werden. Im letzten Beispiel unter Abb. 22.4) erkennt man einen Abschnitt des Ödbachs, welcher von glaziofluvialen Material umgeben ist. Hier tritt vereinzelt eine fälschliche Klassifikation von Pixeln oder Pixelgruppen innerhalb der Schotterfläche auf, welche nicht der Klasse Sand und Steine sondern der Klasse Gewässer zugeordnet wurden. Auffallend ist hierbei, dass eine erkennbare Abgrenzung des falsch klassifizierten Gebiets besteht. Diese Fehler basieren möglicherweise auf den Lichtverhältnissen während der Datenaufnahme, worauf das multispektrale Bild schließen lässt und in weiterer Folge einer unzureichenden Korrektur der Spektraldaten.

Die Klassifikation ist jedoch überwiegend stimmig. Dies wurde über die Referenzpunkte bestätigt, die eine Übereinstimmung der Klassifikation mit der tatsächlichen Oberflächenbedeckung von 85 % suggerieren. Der Fehleranteil von 15 % beschreibt die drei Punkte Sträucher und Bäume [RP\_6], Blöcke [RP\_9] und Moose [RP\_20], deren NDVI-Werte jeweils den Grenzwert ihrer Klasse leicht unterschreiten und somit den nächsten unterhalb liegenden Klassen, mit einem geringeren NDVI-Wertebereich, zugeordnet wurden.

## 6.4 Fazit

Anhand der vorgestellten Erkenntnisse der vorherigen Kapitel können die in der Einleitung gestellten Fragen beantwortet werden.

- 1) Welche räumliche Struktur haben geomorphologische Prozesse und Materialien sowie die erstellten Vegetationsklassen im Gletschervorfeld des Ödenwinkelkees?

Die exakte räumliche Struktur und bestehende Verteilungsmuster lassen sich von der thematischen Karte ablesen. Generell treten fluviale Prozesse mit Sand und Steinen am Ödbach und den zwei Zuflüssen am westlichen und östlichen Hang auf und sind zumeist von fluvioglazialen Prozessen mit Steinen als Material umgeben. In den Hangbereichen treten gravitative Prozesse mit Blöcken auf und mit abnehmender Entfernung zum Talboden sind Mischformen wie gravitativ-glaziale Prozesse mit Blöcken von Bedeutung. Zwischen dieser Prozessdomäne und der fluvioglazialen treten glaziale Prozesse auf. Die drei Vegetationsklassen finden sich kleinräumig betrachtet im gesamten Gletschervorfeld außerhalb der Schotterflächen des Ödbachs und den hangnahen Bereichen. Jedoch besteht eine abnehmende Tendenz der Vegetationsdichte jeder dieser Klassen Richtung Süden. Zudem existiert eine Abstufung der Vegetationsklassen, wobei die stark photosyntheseaktive Klasse der Sträucher und Bäume mit einer vergleichsweise hohen Entwicklungsdauer im nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets dominiert. Gräser und krautigen Arten treten vornehmlich in mittleren Bereichen auf während resiliente Moose sich vergleichsweise häufiger in Zwischenräumen finden und bis in die südlichsten Bereiche des Untersuchungsgebiets nahe des Gletschers reichen.

- 2) Beeinflusst das Auftreten geomorphologischer Prozesse und Materialien die Art der Vegetationsklassen?

Ja, die Art der Vegetationsklassen wird beeinflusst. Die Klasse der Sträucher und Bäume, welche eine vergleichsweise längere Entwicklungszeit haben und eine niedrigere Resistenz und Resilienz aufweisen treten eher in Gebieten mit einer geringen geomorphologischen Aktivität auf, also einer geringeren Frequenz und Magnitude geomorphologischer Prozesse. Hingegen benötigen Gräser und krautige Arten sowie Moose als Pionierarten weniger Zeit um sich zu etablieren und treten somit auch in Bereichen einer mittleren geomorphologischen Aktivität auf. Allerdings kommt in Gebieten hoher geomorphologischer Aktivität wie auf den Schutthalden, so gut wie keine Vegetation vor. Auch das Material nimmt einen Einfluss, so stellen Blöcke auf Schutthalden oder Moränenwällen keine guten Standortbedingungen für die Vegetation dar, anhand der fehlenden Wasser- und Nährstoffversorgung. Somit sind jene Bereiche spärlich besiedelt. Bereiche mit Material feinerer Korngrößen weisen hingegen bessere Bedingungen auf und werden daher von Pflanzen bevorzugt.

- 3) Welche Informationen können multispektrale Luftbilder über die Verbreitung von Oberflächenmaterialien und Vegetationsklassen im Gletschervorfeld liefern?

Mit Hilfe multispektraler Luftbilder können Daten großräumiger und unzugänglicher Gebiete mit einem meist geringen Aufwand und einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung erfasst werden. Durch die Verwendung von Vegetationsindizes wie dem NDVI können signifikante Differenzierungen der Oberflächenbedeckung generiert werden. Diese erfassen die spektrale Signatur der Pixel des digitalen Bildes und erlauben somit eine Differenzierungen der Oberflächenbedeckung. Besonders Materialien und Vegetationsklassen können unterschieden werden, wobei die Vegetationsklassen anhand der

Photosyntheseaktivität der Pflanzenarten und der erfassten spektralen Signatur differenziert werden. Somit lassen sich Aussagen über die Standorte von Oberflächenmaterial und Vegetationsklassen sowie ihrer Verbreitung treffen.

Diese Forschungsarbeit bietet eine grundlegende Darstellung der Bedeckungsklassen auf Basis multispektraler Daten und gibt somit einen Einblick in die ökologischen und geomorphologischen Gegebenheiten des Gletschervorfelds des Ödenwinkelkees. Diese sind bestimmend für die bestehenden biogeomorphologischen Interaktionen im Trogtal, welche wiederum grundlegend für die Vegetationssukzession sind und Teil der paraglazialen Anpassung sind. Um die paraglaziale Anpassung als Folge des Klimawandels und des Gletscherrückzugs im alpinen Raum in all seinen Aspekten - wie der zunehmenden Dominanz der Vegetation und damit den Veränderungen der Umwelt - zu verstehen, sind Forschungsarbeiten mit diesen Untersuchungspunkten essentiell. Die Entwicklung einer Methode und die Erstellung eines Workflows zur einfachen und reproduzierbaren Untersuchung des Gletschervorfeldes sowie der Generierung einer Datengrundlage zugunsten zukünftiger Forschungsprojekte trägt zu jenen Untersuchungen bei. Jedoch sind zukünftige weiterführende Studien notwendig, um eine höhere Differenzierung innerhalb der Vegetationsklassen zu erhalten und in weiterer Folge die lokalen biogeomorphologischen Interaktionen vertiefend untersuchen zu können.

## Literaturverzeichnis

- Corenblit, D., Baas, A., Balke, T., Bouma, T., Fromard, F., Garófano-Gómez, V., González, E., *et al.* (2015), "Engineer pioneer plants respond to and affect geomorphic constraints similarly along water-terrestrial interfaces world-wide", *Global Ecology and Biogeography*, Vol. 24 No. 12, available at:<https://doi.org/10.1111/geb.12373>.
- D'Amico, M.E., Freppaz, M., Filippa, G. and Zanini, E. (2014), "Vegetation influence on soil formation rate in a proglacial chronosequence (Lys Glacier, NW Italian Alps)", *Catena*, Vol. 113, available at:<https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.001>.
- Dikau, R., Eibisch, K., Eichel, J., Meßenzehl, K. and Schlummer-Held, M. (2019a), "Geomorphologische Systeme und Prozesse", *Geomorphologie*, available at:[https://doi.org/10.1007/978-3-662-59402-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-59402-5_3).
- Dikau, R., Eibisch, K., Eichel, J., Meßenzehl, K. and Schlummer-Held, M. (2019b), "Biogeomorphologie", *Geomorphologie*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, available at:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59402-5>.
- Eichel, J., Krautblatter, M., Schmidlein, S. and Dikau, R. (2013), "Biogeomorphic interactions in the Turtmann glacier forefield, Switzerland", *Geomorphology*, Vol. 201, available at:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.06.012>.
- Erschbamer, B. and Nagl, F. (2010), "Vegetation und Besiedlungsstrategien", in Koch, E.-M. and Erschbamer, B. (Eds.), *Glaziale Und Periglaziale Lebensräume Im Raum Obergurgl*, Innsbruck University Press, Innsbruck, pp. 117–139.
- Fischer, A., Fickert, T., Schwaizer, G., Patzelt, G. and Groß, G. (2019), "Vegetation dynamics in Alpine glacier forelands tackled from space", *Scientific Reports*, Nature Publishing Group, Vol. 9 No. 1, available at:<https://doi.org/10.1038/s41598-019-50273-2>.
- Gewolf, S. (2004), "Zur Flora zweier Gletschervorfelder in der Glocknergruppe (Hohe Tauern, Salzburg)", in Roman Türk and Cmes Peter (Eds.), , Vol. 13, *AG Ökologie und Diversität der Pflanzen*, Salzburg, pp. 151–182.
- Gunderson, L.H. (2000), "Ecological resilience - In theory and application", *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 31, available at:<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.31.1.425>.

- Haselberger, S., Ohler, L.M., Junker, R.R., Otto, J.C., Glade, T. and Kraushaar, S. (2021), "Quantification of biogeomorphic interactions between small-scale sediment transport and primary vegetation succession on proglacial slopes of the Gepatschferner, Austria", *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 46 No. 10, available at:<https://doi.org/10.1002/esp.5136>.
- Jacquemoud, S. and Ustin, S. (2019), *Leaf Optical Properties, Leaf Optical Properties*, available at:<https://doi.org/10.1017/9781108686457>.
- Jones, H.G. and Vaughan, R.A. (2010), "Remote sensing of vegetation : principles, techniques, and applications", *Oxford Univ. Press, Oxford*.
- Junker, R.R., Hanusch, M., He, X., Ruiz-Hernández, V., Otto, J.C., Kraushaar, S., Bauch, K., *et al.* (2020), "Ödenwinkel: An Alpine platform for observational and experimental research on the emergence of multidiversity and ecosystem complexity", *Web Ecology*, Vol. 20 No. 2, available at:<https://doi.org/10.5194/we-20-95-2020>.
- Krainer, K. (2015), *Nationalpark Hohe Tauern: Geologie: Wissenschaftliche Schriften*, 3rd ed., Tyrolia.
- Larsen, A., Nardin, W., van de Lageweg, W.I. and Bätz, N. (2021), "Biogeomorphology, quo vadis? On processes, time, and space in biogeomorphology", *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 46 No. 1, available at:<https://doi.org/10.1002/esp.5016>.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. and Chipman, J.W. (2004), *Remote Sensing & Image Interpretation, 5th Edition*.
- Marcante, S., Winkler, E. and Erschbamer, B. (2009), "Population dynamics along a primary succession gradient: Do alpine species fit into demographic succession theory?", *Annals of Botany*, Vol. 103 No. 7, available at:<https://doi.org/10.1093/aob/mcp047>.
- Matthews, J.A. (1992), "The ecology of recently-deglaciated terrain: a geoecological approach to glacier forelands and primary succession", *The Ecology of Recently-Deglaciated Terrain: A Geoecological Approach to Glacier Forelands and Primary Succession*, available at:<https://doi.org/10.2307/2261511>.
- Matthews, J.A. and Whittaker, R.J. (1987), "Vegetation succession on the Storbreen glacier foreland, Jotunheimen, Norway: a review", *Arctic & Alpine Research*, Vol. 19 No. 4, available at:<https://doi.org/10.2307/1551403>.

- Miller, H.R. and Lane, S.N. (2019), "Biogeomorphic feedbacks and the ecosystem engineering of recently deglaciated terrain", *Progress in Physical Geography*, SAGE Publications Ltd, Vol. 43 No. 1, pp. 24–45.
- Motohka, T., Nasahara, K.N., Oguma, H. and Tsuchida, S. (2010), "Applicability of Green-Red Vegetation Index for remote sensing of vegetation phenology", *Remote Sensing*, Vol. 2 No. 10, available at:<https://doi.org/10.3390/rs2102369>.
- Raffl, C., Mallaun, M., Mayer, R. and Erschbamer, B. (2006), "Vegetation succession pattern and diversity changes in a Glacier Valley, Central Alps, Austria", *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol. 38 No. 3, available at:[https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2006\)38\[421:VSPADC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2006)38[421:VSPADC]2.0.CO;2).
- Slupetzky, H. (1997), "Die Gletscher auf den topographischen Karten 1:5000 im Gebiet der Nationalpark-Forschungsstelle Rudolfshütte (Stubachtal, Hohe Tauern) von 1990", Nationalpark Hohe Tauern, Matrie in Osttirol, 20 March.
- Slupetzky, H., Teufel, J. and Hammerle, H. (1991), *Ödenwinkelkees, Gletschervorfeld*, 1st ed., Universität Salzburg und Oesterreichischer Alpenverein, Salzburg.
- Teufel, J. (1981), *Vegetationsgliederung in Der Umgebung Der Rudolfshütte Und Des Ödenwinkelkees-Vorfeldes*, Salzburg.
- Tscherko, D. (2000), "Böden entlang einer Chronosequenz eines Gletschervorfeldes: Ökologie von Gletschervorfelder" - Kurzbeiträge des Workshops „Ökologie von Gletschervorfelder", Wien 2000:12.
- ZAMG. (2021), "Jahrbuch", *Zentralanstalt Für Meteorologie Und Geodynamik*, available at: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/jahrbuch>.

# Anhang

## Exceltabelle aller Untersuchungsparameter

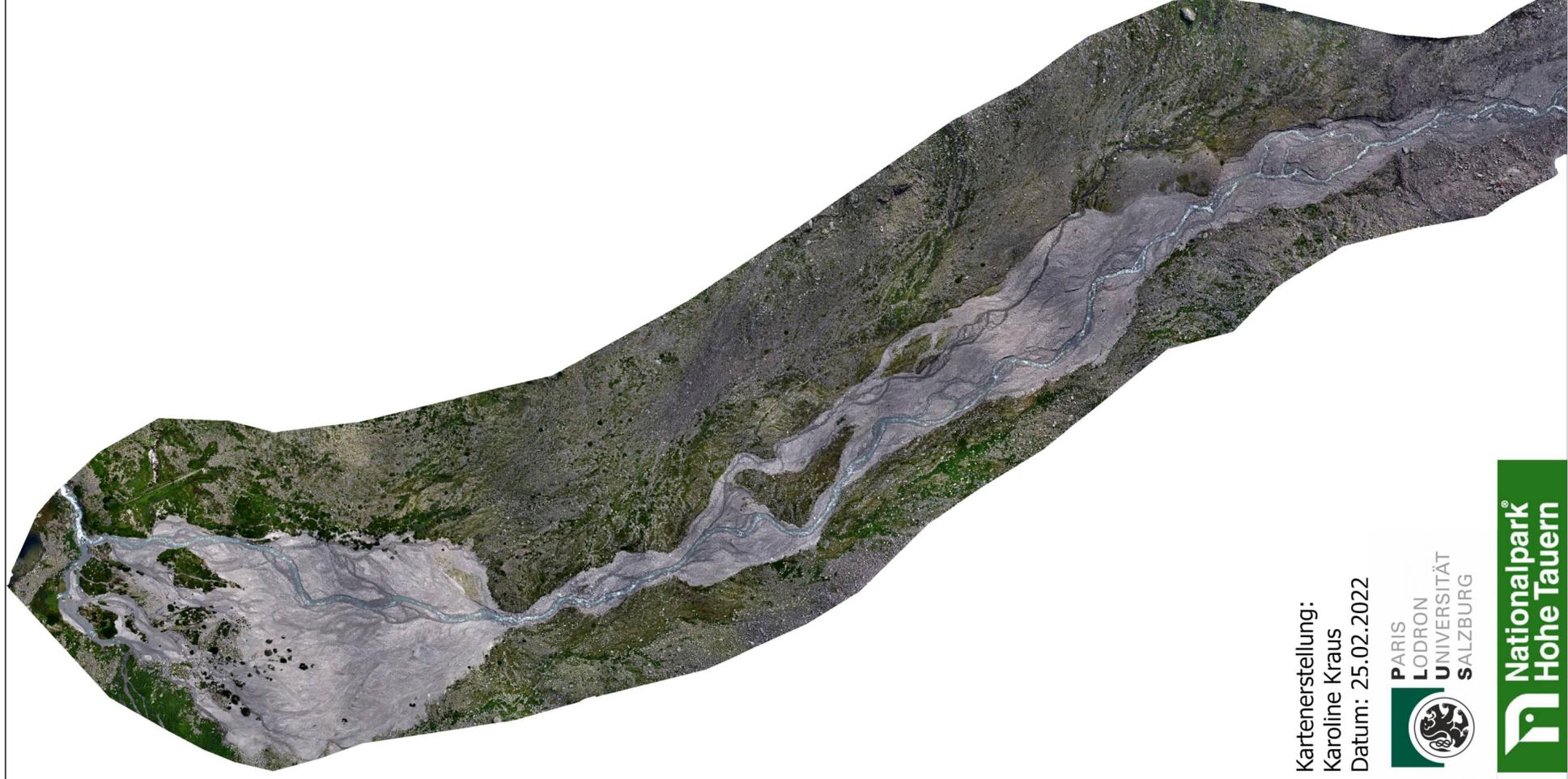
Erhebungsnummer	Bachseite	Datum	Rahmenhöhe mii	Rahmenhöhe (Ton/Schluff Sand	Kies	Steine	Blöcke	freiliegender Boden	Festgestein	very angular	angular	sub-angular	sub-rounded	rounded	well-rounded
p1.9.8	linksseitig	09.08.2021	10	10	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
b1.9.8	linksseitig	09.08.2021													
p2.9.8	linksseitig	09.08.2021	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
b2.9.8	linksseitig	09.08.2021													
p3.10.8	linksseitig	10.08.2021	0	25	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
p4.10.8	Insel	10.08.2021	6	24	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
p5.10.8	Insel	10.08.2021	13	20	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
p6.10.8	Insel	10.08.2021	10	36	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0
p7.10.8	Insel	10.08.2021	0	5	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
b3.10.8	Insel	10.08.2021													
p8.10.8	Insel	10.08.2021	0	14	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0
p9.10.8	Insel	10.08.2021	0	18	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p10.10.8	Insel	10.08.2021	5	11	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
p11.10.8	Insel	10.08.2021	8	14	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
p12.10.8	linksseitig	10.08.2021	20	68	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
b4.10.8	linksseitig	10.08.2021													
p13.10.8	linksseitig	10.08.2021	15	40	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
p14.10.8	linksseitig	10.08.2021	13	20	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
b5.10.8	linksseitig	10.08.2021													
b6.10.8	linksseitig	10.08.2021													
b7.10.8	linksseitig	10.08.2021													
b8.10.8	linksseitig	10.08.2021													
p15.10.8	linksseitig	10.08.2021	6	11	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
b9.10.8	linksseitig	10.08.2021													
p16.10.8	linksseitig	10.08.2021	0	58	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1
b10.10.8	linksseitig	10.08.2021													
b11.10.8	linksseitig	10.08.2021													
p17.10.8	linksseitig	10.08.2021	0	17	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
p18.11.8	linksseitig	11.08.2021	12	48	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0
p19.11.8	linksseitig	11.08.2021	11	24	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0
p20.11.8	linksseitig	11.08.2021	0	15	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
p21.11.8	linksseitig	11.08.2021	0	24	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
p22.11.8	rechtsseitig	11.08.2021	12	14	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0
b12.11.8	rechtsseitig	11.08.2021													
p.23.11.8	rechtsseitig	11.08.2021	15	27	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
b13.11.8	rechtsseitig	11.08.2021													
b14.11.8	rechtsseitig	11.08.2021													
p24.11.8	rechtsseitig	11.08.2021	0	9	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
p25.11.8	rechtsseitig	11.08.2021	16	23	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1
b15.11.8	rechtsseitig	11.08.2021													
p26.11.8	rechtsseitig	11.08.2021	2	11	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
p27.11.8	Insel	11.08.2021	0	11	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0
b16.11.8	Insel	11.08.2021													
b17.11.8	Insel	11.08.2021													
b18.11.8	Insel	11.08.2021													
b19.11.8	Insel	11.08.2021													
b22.11.8	Insel	11.08.2021													
b23.11.8	Insel	11.08.2021													
b24.11.8	Insel	11.08.2021													
b25.11.8	Insel	11.08.2021													
b26.11.8	rechtsseitig	11.08.2021													
p28.11.8	rechtsseitig	11.08.2021	0	82	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
p29.11.8	rechtsseitig	11.08.2021	0	5	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
p30.11.8	rechtsseitig	11.08.2021	5	20	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
b26.11.8	rechtsseitig	11.08.2021													
b27.11.8	rechtsseitig	11.08.2021													
b28.11.8	rechtsseitig	11.08.2021													
b29.11.8	rechtsseitig	11.08.2021													
b30.11.8	rechtsseitig	11.08.2021													

Baumarten	Höhe (cm)	Lithologie	Prozess	max Jahr Deglaziation	min Jahr Deglaziation	Bedeckungsgrad	Flächendeckend	Aufrecht	Polster	hölzern am Boden	Versteckt in Nischen
		Keine Litho	Glazial	1850	1890	78	0	1	0	0	0
Moor-Gagelstrauch	k.a			1850	1890						
		Keine Litho	Glazial	1850	1890	100	0	0	1	0	0
Moor-Gagelstrauch	k.a			1850	1890						
		Gneis	Glazial	1850	1890	46	0	1	0	0	0
		Mix	Fluvial	1850	1890	44	0	0	1	0	0
		Mix	Fluvial	1850	1890	70	0	1	0	1	0
		Gneis	Fluvioglazial	1850	1890	63	0	1	0	0	0
		Gneis? Mix:	Fluvial	1850	1890	58	0	0	1	0	0
Lorbeerkirsche	k.a			1850	1890						
		Gneis, Mix?	Fluvial	1850	1890	20,5	0	0	1	0	0
		Keine Litho	Fluvial	1850	1890	95	0	1	0	0	0
		Mix	Fluvial	1850	1890	25	0	0	0	1	0
		Mix	Fluvioglazial	1850	1890	10,5	0	1	0	0	0
		Gneis	Glazial	1850	1890	38	0	1	1	0	0
Fichte	25			1850	1890						
		Gneis	Glazial	1850	1890	72	0	0	1	0	0
		Gneis	Gravitativ-Glazial	1850	1890	86,5	0	1	0	0	0
Fichte	42			1850	1890						
Fichte	30			1850	1890						
Fichte	28			1890	1929						
Lärche	88			1890	1929						
		Mix	Glazial	1890	1929	83	0	1	0	0	0
Fichte	30			1890	1929						
		Mix	Glazial	1929	1934	69	0	0	1	0	0
Fichte	25			1929	1934						
Lärche	60			1929	1934						
		Mix, k.a.	Glazial	1929	1934	41,5	0	0	1	0	0
		Gneis	Glazial	1985	1992	27,5	0	0	0	0	1
		Mix	Gravitativ-Glazial	1985	1992	14,5	0	0	1	0	0
		Mix	Glazial	1998	2008	36,5	1	0	1	0	0
		Mix	Glazial	1998	2008	27,5	0	0	1	0	0
		Gneis	Glazial	1985	1985	53	1	0	1	0	0
Fichte	22			1985	1985						
		Mix	Glazial	1985	1985	9,5	0	0	0	0	1
Fichte	12			1985	1985						
Fichte	18			1985	1985						
		Mix	Gravitativ-Glazial	1977	1985	30	0	1	0	0	0
		Mix	Glazial	1969	1977	18,5	0	1	0	0	0
Moor-Gagelstrauch	185			1929	1934						
		Gneis	Glazial	1929	1934	58	0	0	1	0	1
		Gneis	Fluvial	1929	1934	60,5	1	1	0	0	0
Fichte	12			1929	1934						
Lärche	60			1929	1934						
Lärche	100			1929	1934						
Lärche	80			1929	1934						
Lärche	135			1929	1934						
Lärche	40			1929	1934						
Lärche	135			1929	1934						
Lärche	90			1929	1934						
Lärche	200			1890	1929						
		Gneis	Glazial	1890	1929	32	1	0	0	0	1
		Mix	Glazial-Gravitativ	1850	1890	63,2	1	1	0	0	0
		Mix	Glazial	1850	1850	38	0	0	1	0	0
Lärche	200			1850	1890						
Lärche	250			1850	1890						
Lärche	110			1850	1890						
Lärche	250			1850	1890						
Lärche	350			1850	1890						

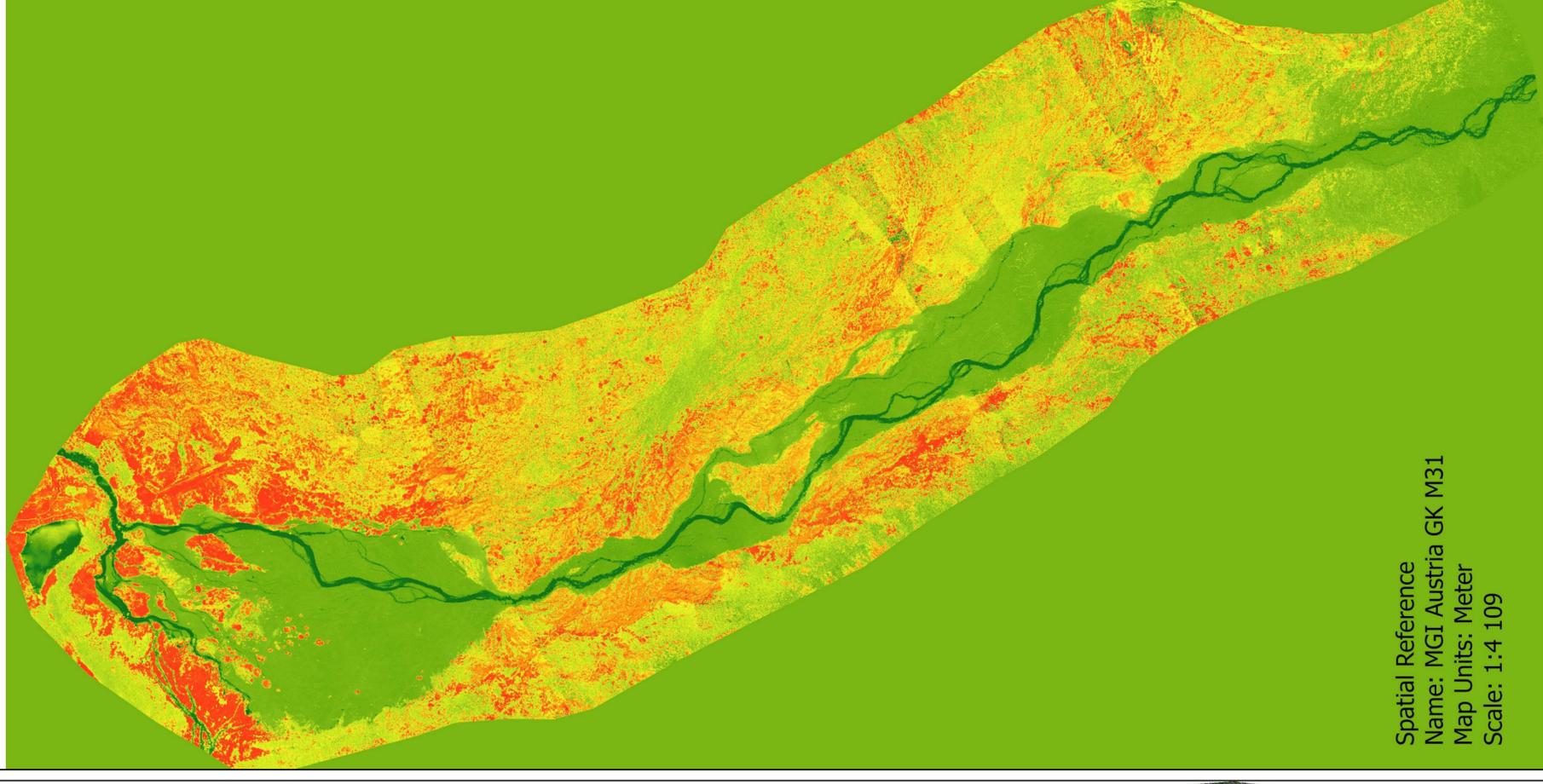
Arten	Klassen	Kommentar
Wollgras, Sauergras, Gestutztes Läusekraut	Gras, Kraut	Sumpfig, längere Zeit zum Entwickeln
blaugraue Schwielenflechte, Moose, Gräser, Sukkulente, Runkelrübe	Gras, Moos	mehr Flechten als Moos
Moos, Gras, Gemeiner Gerber, Wiesenbärenklau, Süßgras, Gestutztes Läusekraut Huflattich, Gras, Runkelrübe, Kirschlorbeer Gras, Klee, Huflattich, Moos, Lorbeerkirsche Sauergras, Meisterwurz, Sauerampfer, gemeines Leimkraut, Taubenkropfleimkraut Moos, Gras, Ackerhornkraut, Kamille, Klee, Bach-Steinbrech	Gras, Kraut, Moos Gras, Kraut, hölzernes Gewächs Gras, Moos, Kraut, hölzernes Gewächs Gras, Kraut, Moos Gras, Kraut, Moos	Flechten und Moos auf Stein nicht gezählt  viele Blüten an Kraut
Moos, Gras, Kirschlorbeer, Klee Distel, Kirschlorbeer, Klee, Gras, Meisterwurz, Gestutztes Läusekraut, Herbst-Löwenzahn Moor-Gagelstrauch Gras Gras, Moos, Flechte, Fichte, Herbst-Löwenzahn	Moos, Gras, hölzernes Gewächs Gras, Kraut, hölzernes Gewächs hölzernes Gewächs Gras Gras, Moos, Hölzernes Gewächs, Kraut	erstes Gewächs auf Insel Überschwemmung- und Ausspülungszeichen
Gras, Flechte, grauer Alpendost Gras, Moos, Flechte, Krähenbeere, Herbst-Löwenzahn, Runkelrübe	Gras, Kraut Gras, Moos, Kraut, hölzernes Gewächs	Bach zwischen Blöcken
Gras, Heidelbeere, Klee, Günsel, Kirschlorbeer, Flechten, Herbst-Löwenzahn	Gras, Moos, Kraut, hölzernes Gewächs	
Gras, Kirschlorbeer, Moos, Herbst-Löwenzahn	Gras, Kraut, hölzernes Gewächs	Unterspülung Boden, Rutschung und Bruch
Gras, Moos, Kirschlorbeer, Runkelrübe, Hahnenfuß Gras, Moos, Glockenblume, Kamille, Alpen-Hornkraut Gras, Moos, Alpen-Hornkraut, Kamille Gras, Moos, Alpen-Hornkraut, Kamille, Pilz, Bach-Steinbrech Gras, Moos, Kamille, Bach-Steinbrech, krautige Arten Gras, Moos, Steinbrech, Fichte, Bach-Steinbrech	Gras, Moos, Kraut, hölzernes Gewächs Gras, Moos, Kraut, hölzernes Gewächs Gras, Moos, Kraut Gras, Moos, Kraut, Pilz Gras, Moos, Kraut Gras, Moos, Kraut, hölzernes Gewächs	Störzone Altarm, saisonale Wasserführung  am Hang mit Steilkante
Gras, Sukkulente, Moos, Bach-Steinbrech, Steinbrech	Gras, Kraut, Sukkulente	nahe Wasserfall
Gras, Moos, Distel, Grauer Alpendost, Bach-Steinbrech, Steinbrech Gras, Moos, Glockenblume	Gras, Moos, Kraut Gras, Moos, Kraut	Flussstörzone Drummlin mit Abbruch
Gras, Moos, Klee, Distel, Glockenblume, Herbst-Löwenzahn Gras, Krähenbeere, Flechte, Moos, Herbst-Löwenzahn, Sukkulente, halbkugelige Teufelskralle	Gras, Moos, Kraut Gras, Moos, Kraut, Flechte	zwischen kleinem Altarm und Hauptarm
Gras, Glockenblume, habkugelige Teufelskralle, Herbst-Löwenzahn, Kirschlorbeer Gras, Klee, Runkelrübe, Glockenblume, Herbst-Löwenzahn Gras, Moos, Flechte, Runkelrübe, Sukkulente, Glockenblume, Bach-Steinbrech, Weide	Gras, Kraut, hölzernes Gewächs Gras, Kraut Gras, Moos, Flechte, Kraut, Sukkulente	nahe Wall



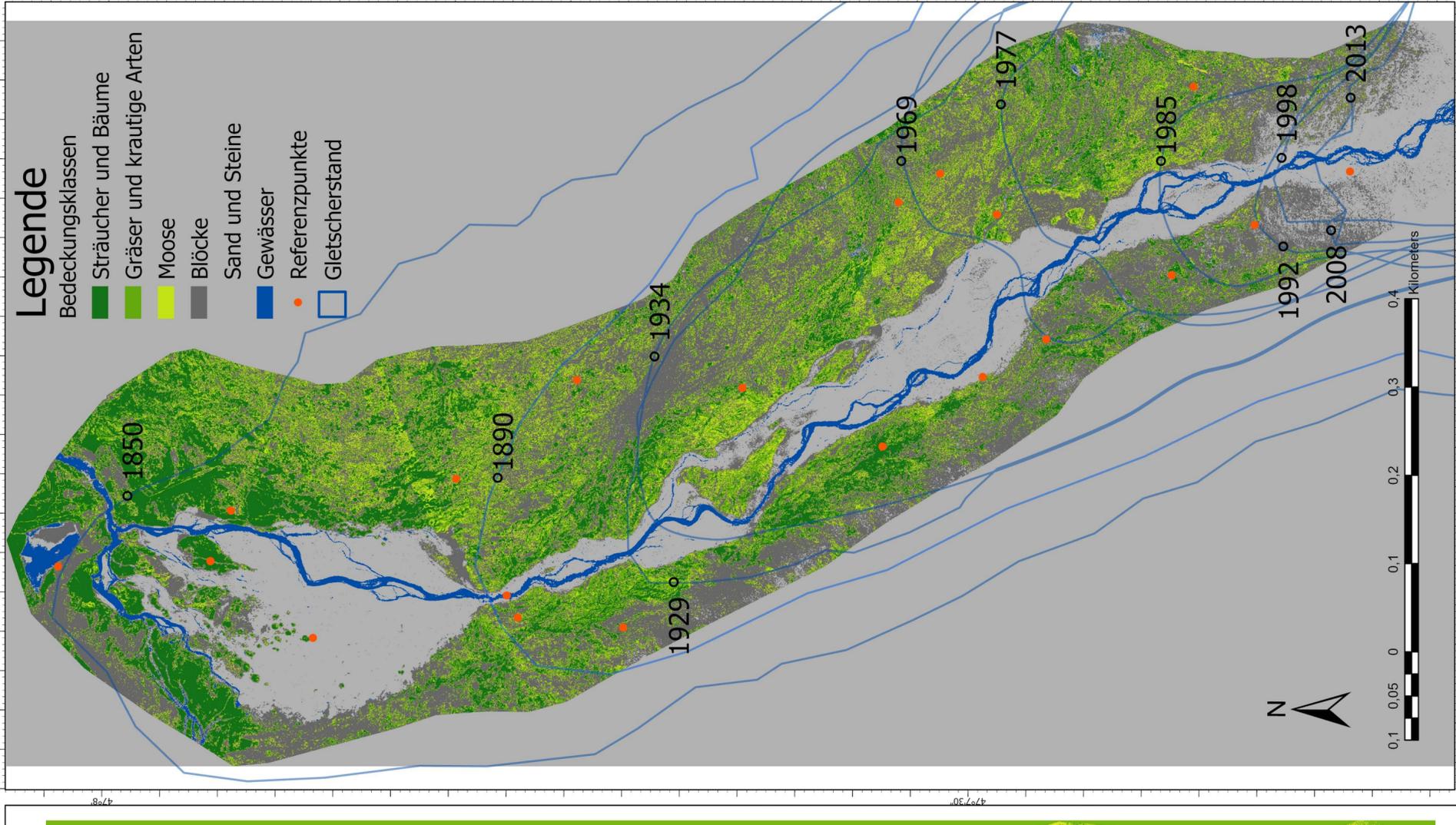
# Vegetationsbedeckung des Gletschervorfelds des Ödenwinkelkees



Kartenerstellung:  
Karoline Kraus  
Datum: 25.02.2022



Spatial Reference  
Name: MGI Austria GK M31  
Map Units: Meter  
Scale: 1:4 109



**Legende**  
Bedeckungsklassen  
Sträucher und Bäume  
Gräser und krautige Arten  
Moose  
Blöcke  
Sand und Steine  
Gewässer  
Referenzpunkte  
Gletscherstand

0,1 0,05 0 0,1 0,2 0,3 0,4 Kilometers

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich Karoline Kraus, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle der wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen der benutzten Quellen wurden als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüferin/ keinem anderen Prüfer als Prüfungsleistung eingereicht.

Mir ist bekannt, dass Zuwiderhandeln mit der Note „nicht genügend“ (ohne Möglichkeit einer Nachbesserung oder Wiederholung) geahndet wird und weitere rechtliche Schritte nach sich ziehen kann.

25.02.2022

Kraus

\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ Datum, Unterschrift