Landschaftsdynamik im glazialenproglazialen Übergangsbereich der Pasterze im Zeitraum 1998–2015

Von Philipp KRISCH & Andreas KELLERER-PIRKLBAUER

Zusammenfassung

Am größten Gletscher Österreichs, der Pasterze (Hohe Tauern), wurden für ein 1,77 km² großes Untersuchungsgebiet im glazialen und proglazialen Übergangsbereich mit Hilfe visueller Bildklassifizierung von sechs hochaufgelösten (20-50 cm Raster) Orthofotodatensätzen (1998, 2003, 2006, 2009, 2012 und 2015) deren Landbedeckung (acht verschiedene Klassen) sowie deren Veränderung ermittelt. Ein numerischer Indikator für die Landschaftsdynamik konnte durch die Pixel-basierte Unterscheidung von stabilen bis zu häufig sich in ihrer Zuordnung ändernden Flächen entwickelt werden. Vor allem der im Untersuchungszeitraum vom Gletscher freigegebene Bereich ist von einer hohen Dynamik geprägt. Während sich das von Schutt wenig verschmutzte Gletschereis stark flächenmäßig verringert hat, kam es bei Sedimentund Wasserflächen zu markanten Zuwächsen. Der abschmelzende Bereich der Gletscherzunge wurde am Talboden von Wasser- und Feinsedimentflächen und an den Talflanken überwiegend von Moränensedimenten eingenommen. Diese Studie zeigt, dass sich mit Hilfe von geometrisch hochaufgelösten optischen Daten und einem klar definierten Klassifizierungsschema sehr gut die geomorphologisch-glaziologische Entwicklung eines glazialen-proglazialen Bereiches darstellen lässt und eine solche Analyse wertvolle Erkenntnisse in der gegenwärtigen Entwicklung alpiner Gletscher und Gletschervorfelder liefert.

Abstract

A 1.77 km² large area in the glacial to proglacial transition zone of Pasterze Glacier (Hohe Tauern Range), the largest glacier in Austria, was analyzed focusing on landscape changes in the period 1998–2015. We distinguished eight different surface cover types for six different generations of high-resolution (0,2 to 0,5 m raster) orthophotographs (1998, 2003, 2006, 2009, 2012 and 2015). A numerical pixel-based indicator for landscape dynamics was developed by distinguishing stable areas from very unstable areas based on classification changes. Glaciated parts not protected from ablation by a supraglacial debris cover retreated dramatically. In contrast, areas covered by sediments or water bodies are increasing substantially in extent. The deglaciated area at the valley bottom changed mainly to sediment-covered and water areas whereas at the slopes, till-covered areas constitute the dominant class. This study shows that the geomorphological-glaciological evolution of a glacial-proglacial transition zone can be very well quantified by using high-resolution optical data and a clearly defined classification scheme. Such analyses help to better understand current processes at and near the front of retreating alpine glaciers.

Einleituna

Die Auswirkungen des gegenwärtigen Klimawandels auf das Hochgebirge sind in vielerlei Hinsicht wahrnehmbar. Neben den relativ einfach zu beobachtenden Auswirkungen auf die alpinen Gletscher Österreichs in Form von Rückgang (Fischer et al. 2018, Lieb & Kellerer-PIRKLBAUER 2018) oder Zerfallserscheinungen der Gletscherzunge (KEL-LERER-PIRKLBAUER & KULMER 2018), wirken sich die zunehmenden Temperaturen auch negativ auf die alpinen Bodentemperaturen und folglich

Schlüsselwörter

Pasterze, Entaletscherung, Klimawandel, Paraglaziale Landschaftsdynamik, Sedimentation, Sedimentumlagerung

Kevwords

Pasterze Glacier, deglaciation, climate change, paraglacial landscape dynamics, sedimentation, sediment redistribution

auf den Permafrost aus (KELLERER-PIRKLBAUER 2018). Die Pasterze, der größte Gletscher Österreichs, ist laut LIEB & KELLERER-PIRKLBAUER (2018) zwischen den Jahren 1852 (maximale Vereisung in der sogenannten "Kleinen Eiszeit") und 2012 um rund 10 km² (von 26,5 auf 16,6 km²) kleiner geworden. Das geschätzte Eisvolumen reduzierte sich in diesen 160 Jahren von 3,1 km³ auf nur mehr 1,2 km³. Durch das schnelle Zurückweichen kam es zu einem Anwachsen der proglazialen Flächen, also jener Bereiche, die direkt an das Gletscherende angrenzen und die durch glaziale Sedimente, durch Schmelzwässer und durch eine hohe "paraglaziale" Morphodynamik geprägt sind (BALLANTYNE 2002, AVIAN et al. 2018).

In der vorliegenden Arbeit, welche zu einem großen Teil auf einer Bachelorarbeit basiert (KRISCH 2019), wird anhand von sechs Untersuchungsjahren (1998, 2003, 2006, 2009, 2012 und 2015) die Entwicklung der laut LIEB & SLUPETZKY (2004) seit 1956 eisfrei gewordenen und damit proglazialen Flächen beleuchtet. Ziel der Arbeit ist es, folgende Fragen zu beantworten: (a) Welche morphologischen und hydrologischen Entwicklungstendenzen sind im proglazialen Bereich der Pasterze zu erkennen und wie können diese klassifiziert werden? (b) Wie sieht diese Veränderung sowohl in quantitativer als auch in qualitativer Hinsicht aus? (c) Wo im proglazialen Bereich der Pasterze ist die Veränderung am dynamischsten? Zur Beantwortung dieser Fragen wurden sechs verschiedene Fernerkundungsdatensätze (Orthofotos der oben gelisteten Jahre) in einem Geographischen Informationssystem analysiert, klassifiziert, ausgewertet, interpretiert und in einem breiteren Rahmen diskutiert.

Arbeitsgebiet

Die Pasterze ist mit einer Fläche von aktuell rund 16 km² immer noch der größte Gletscher der Ostalpen. Der Gletscher befindet sich am Fuße des Großglockners (3.798 m ü. A.) in den Hohen Tauern im Bundesland Kärnten (Abb. 1a, b) (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2018). Die charakteristische Gletscherzunge weist eine Länge von circa vier Kilometern auf und ist über den als "Hufeisenbruch" bezeichneten Eisbruch mit den höher gelegenen und flachen Firnmulden verbunden. Die Eisausdehnung innerhalb dieses einstmals geschlossenen Eisbruchs (vgl. Abb. 4.2 in LIEB & KELLERER-PIRKLBAUER 2018) hat sich aber in den letzten Jahrzehnten stark verändert, wobei mittlerweile die eisfreien Bereiche im Hufeisbruch visuell dominieren. Seit dem Jahrtausendwechsel liefert nur mehr der Rifflwinkel nennenswerte Eismassen an die Zunge. Der Eisnachschub aus dem Schneewinkel hat mittlerweile keine Bedeutung mehr. Langfristig trennt sich die gesamte Gletscherzunge vom Nährgebiet ab. In weiterer Folge wird es zu einem langsamen weiteren Abschmelzen der Eismasse bei gleichzeitiger Zunahme der räumlichen Ausdehnung der Obermoräne (dies wirkt abschmelzungsreduzierend) kommen (Lieb & Kellerer-Pirklbauer 2018). Mit der Franz-Josefs-Höhe als Endpunkt der in der Zwischenkriegszeit errichteten Großglockner Hochalpenstraße sowie dem Großglockner als beliebtes Ziel für Bergsteiger wird der Bereich rund um die Pasterze auch touristisch stark genutzt. Des Weiteren besteht mit dem etwas weiter östlich gelegenen Margaritzenstausee, einem Speichersee für die Stromerzeugung der



VERBUND AG, auch ein energiewirtschaftlicher Nutzen des Schmelzwassers der Pasterze.

Die Erforschungsgeschichte der Pasterze aus glaziologischer Sicht sowie ihre Einbettung sind ausführlich in LIEB & KELLERER-PIRKLBAUER (2018) bzw. allgemein in den Büchern von LIEB & SLUPETZKY (2011) und FISCHER et al. (2018) beschrieben. Für die Untersuchungen in der gegenständlichen Studie wurde ein 1,77 km² großes Gebiet im Bereich der Gletscherzunge und dem angrenzenden Areal rund um die als "Sandersee" bezeichnete Wasserfläche näher betrachtet (Abb. 1c). Der Sandersee ist ein im Zuge des Abschmelzens der Pasterze entstandener seichter See im heutigen Gletschervorfeld, der jedoch mittlerweile weitgehend wieder verlandet ist. Zuletzt war der gesamte Bereich des heutigen Sandersees um 1956 von Eis bedeckt. 1979 erreichte die Wasserfläche des Sees seine maximale Ausdehnung mit etwa 120.000 m² (Geilhausen & SCHROTT 2011). In Abbildung 1c sind die Gletscherstände des ersten sowie des letzten ausgewerteten Datensatzes (1998 und 2015) in Relation zum Untersuchungsgebiet eingezeichnet. Der gewählte Bereich erstreckt sich von circa 2.070 m ü. A. bei der Möllschlucht im Bereich des Abflusses des Sandersees bis auf eine Höhe von etwa 2.300 m ü. A. am südwestlichen Rand des Untersuchungsgebietes.

Methoden

Die Datengrundlage dieser Arbeit beruht auf optischen Fernerkundungsdaten mit einer sehr hohen geometrischen Auflösung (Tab. 1). Mit Hilfe der Fernerkundung können auch schlecht erreichbare Bereiche im Hochgebirge abgedeckt werden. Andererseits können aber durch die Abb. 1: Untersuchungsgebiet: (a) Lage der Pasterze in Österreich. (b) Übersichtskarte der Pasterze mit Gletscherausdehnung in 2012, (c) Lage des Untersuchungsgebiets dieser Studie im Übergangsbereich zwischen **Gletscherende und** Gletschervorfeld mit den Enden der **Gletscherzunge von** 1998 und 2015. Hintergrundbild: Orthofoto 2015

Tab. 1: Datengrundlagen für die visuelle Klassifikation im Untersuchungsgebiet in den Jahren 1998, 2003, 2006, 2009, 2012 und 2015.

Jahr	Geometrische Auflösung	Aufnahmedatum	Quelle	
1998	0,5 m	Aug. 98	Nationalpark Hohe Tauen	
2003	0,5 m	13.08.03	Kaufmann et al. (2015)	
2006	0,5 m	22.09.06	Kaufmann et al. (2015)	
2009	0,5 m	24.08.09	Kaufmann et al. (2015)	
2012	0,2 m	18.08.12	KAGIS/BEV	
2015	0,2 m	28.08.15	KAGIS/BEV	

hohe Reliefenergie uneinheitliche Bildmaßstäbe entstehen oder auf Grund von Exposition und Hangneigung Schattenwürfe auftreten und somit Informationen im ansonsten sichtbaren Bereich verloren gehen (z. B. KAUFMANN et al. 2015). Witterungsbedingt oder aufgrund einer Schneedecke kann es im Gebirge des Weiteren vermehrt zu Aufnahmeschwierigkeiten sowie zu technischen Einschränkungen kommen (BISHOP & SHRODER 2004). Die genannten negativen Aspekte der Fernerkundung spielten aber für diese Studie keine Rolle, da die ursprünglichen Luftbilder im Bereich des relevanten Gebietes bei wolkenarmer Witterung aufgenommen wurden sowie geometrische Verzerrungen bereits entzerrt für die weitere Bearbeitung vorlagen. Die Bezugsebene für die vorliegenden Abbildungen ist das Bessel-Ellipsoid, als Projektion wurde eine Gauß-Krüger-Projektion verwendet, mit Koordinaten des Militärgeographischen Instituts (MGI) in Bezug auf den Meridian M31.

Für die Auswertung der Orthofotos wurde die Methode der visuellen Bildinterpretation herangezogen. Dabei werden durch Kontraste, Kanten, Linien und Farben Einzelflächen unterschieden, aber auch subjektive Sehgewohnheiten sowie die Erwartung des Beobachters fließen bei der Abgrenzung mit ein (ALBERTZ 2007). Für die Interpretation der Ergebnisse spielen in weiterer Folge neben der Helligkeit einer Fläche, der Größe und der Form der Objekte auch die Schattierung, die Textur der Oberfläche sowie die relative Lage der Objekte eine nicht zu unterschätzende Rolle (ALBERTZ 2007). Die Durchführung der Klassifikation wurde mit dem Open Source Programm QGIS (Version 10.3 – Girona) mit den erweiterten Digitalisierungswerkzeugen gemacht. Die Verwendung einer GIS-Software für die Klassifikation von Luftbildaufnahmen hat sich seit deren Aufkommen im Bereich der geomorphologischen Kartierung etabliert und wird aus Gründen der Aufteilung auf diverse Layer oftmals benutzt (CHANDLER et al. 2018). Für die anschließenden Flächenberechnungen wurde jedoch die Software ArcGIS (Version 10.2) verwendet. Die in QGIS entworfenen Grafiken wurden in Adobe Illustrator graphisch aufbereitet.

Für die Auswertung der Veränderungsdynamik wurde mit der Programmiersprache Python ein Code geschrieben, welcher jene Flächen detektiert, die sich über den gesamten Zeitraum stark verändern und daher besonders dynamisch erscheinen. Dafür wurden die Ergebnisse jedes Klassifizierungsjahres als 1x1-Meter-Raster als Array umgewandelt, wobei jedes Pixel einem Eintrag in der Matrix entspricht. Im darauffolgenden Schritt wurden die Einträge für jeweils zwei aufeinander folgende Untersuchungsjahre auf Gleichheit untersucht. War eine solche vorliegend, so wurde der Wert des neuen Elements auf eins, ansonsten auf zwei gesetzt. Im nächsten Schritt wurde durch Multiplikation der fünf Veränderungsmatrizen die gesamte Veränderung errechnet. Demnach setzen sich die Einträge x der Bildmatrix des Ergebnisses aus Werten der folgenden Formel zusammen:

> $x = 1^{n} \cdot 2^{m}$ (1), { $n, m \in \mathbb{N} \mid 0 \le n, m \le 5$ } mit n + m = 5.

Im Exponenten in Formel 1 steht die Anzahl der Einträge von Einsern beziehungsweise Zweiern des auszuwertenden Pixels in den fünf Veränderungsmatrizen. Daher nimmt ein Pixel, welches seine im Klassifizierungsprozess zugewiesene Klasse zu jedem Zeitpunkt ändert, in der Ausgabedatei den maximalen Wert von 32 (1^{0} · 2^{5}) an. Jene Pixel, die unverändert bleiben, haben einen Wert von 1 (1^{5} · 2^{0}).

Im Vorfeld der Klassifizierung wurde ein Interpretationsschlüssel angelegt, welcher zu einem achtstufigen Interpretationsschlüssel erweitert wurde. Diese acht Bodenbedeckungsklassen sollten den Untersuchungsbereich differenziert genug abdecken, um die Entwicklung des proglazialen Bereiches ausreichend genau zu betrachten. Für jede der Klassen wurde ein Kürzel, bestehend aus fünf Zeichen, eingeführt, welches im weiteren Verlauf auch in Grafiken und Tabellen verwendet wird. Eine Übersicht mit Kurzbeschreibung der Klassen ist Tabelle 2 zu entnehmen. Die Kartierung wurde zumeist im Maßstab 1:300 durchgeführt. Damit sollte eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse über alle Be-

Tab. 2: Kartierungsschlüssel für die visuelle Klassifikation im glazialenproglazialen Übergangsbereich der Pasterze.

Code	Kurzbeschreibung	Erläuterung			
FeVeg	Anstehende Fels- und Vegeta- tionsflächen	Flächen mit kleinwüchsigen Gräsern, Polsterpflanzen sowie ausdauernden Arte mit mächtigen Rhizomen (EICHMANN & BENOIT 2011) und anstehendem Gestein, vor wiegend um Silikate und Kalzite (Höck & PESTAL 1994).			
GroSe	Grobsediment- flächen	Silikatschutthalden sowie Flächen, die stark von Gesteinsbrocken durchsetzt sind, erkennbar durch eine hohe räumliche Frequenz im Bild.			
FeiSe	Feinsediment- flächen	Flächen, die durch eine Homogenität gekennzeichnet sind, und als Sand und Schluff erkennbar sind. Sowie Flächen mit nur einer geringen Anzahl erkennbarer Gesteinspartikel, die von BENN & EVANS (2006) als schluffig-sandige Flächen mit Kies und Geröllen definiert werden.			
WasFl	Wasserflächen	Zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahmen von Wasser bedeckte Flächen, jedoch nicht mit Wasser gefüllte Toteislöcher. Im Untersuchungsgebiet primär der Gletscher- bach und stehende Wasserflächen im Bereich des Sandersees.			
GleSA	Schuttarmes Gletschereis	Schuttarmes Gletschereis hat kaum Sedimente auf der Gletscheroberfläche und in Bezug auf die Pasterze befinden sich jene Flächen am orographisch linken Teil der Gletscherzunge (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2008).			
GleSB	Schuttbedecktes Gletschereis	Schuttbedeckte Gletschereisflächen sind von supraglazialen Sedimenten (jenen auf der Gletscheroberfläche) geprägt und nehmen laut Kellerer-Pirklbauer et al. (2008) in Bezug auf die Pasterze an Fläche zu. Supraglaziale Sedimente schützen darunterliegendes Gletschereis vor Abschmelzung.			
EisBg	Eisberg (klares Eis)	Flächen, die klares Eis abgetrennt von der Gletscherzunge darstellen und als solche eindeutig ersichtlich sind.			
TotEL	Toteisloch (z. T. mit Wasser gefüllt)	Toteislöcher entstehen, wenn Eisberge abschmelzen und weisen in der Regel nach BENN & EVANS (2010) einen Durchmesser zwischen drei und 40 Metern im Nahbereich der Gletscherzunge auf. Toteislöcher können entweder mit oder ohne Wasser gefüllt sein und sind von einer runden Struktur von Sedimenten umgeben.			

obachtungsjahre hinweg gegeben werden. Das Klassifizierungssystem selbst basiert auf Überlegungen und Einteilungen, die in AVIAN et al. (2018) publiziert sind.

Im Zuge der Kartierung kam es aufgrund des Kartierungsmaßstabes, optischen Störungen im Bildmaterial, Sonneneinstrahlung sowie Schatten und bei Klassenübergängen zu Schwierigkeiten in der Ausweisung. Flächenmäßig umfassten diese "Problemflächen" jedoch nur kleine Areale. Wegen des geringen farblichen Kontrastes ist beispielsweise beim Orthofoto aus dem Jahr 1998 zur Differenzierbarkeit einzelner Klassen in kleinere Maßstäbe gewechselt worden. Damit einhergehend ist iedoch eine Verschlechterung der Genauigkeit verbunden. Im Orthofoto aus dem Jahr 2003 hingegen ist eine auffällige Häufung von Störungen in Form von schwarzen, linienförmigen Elementen im Zehnermeter-Bereich erkennbar. Abseits von Klassengrenzen konnten diese jedoch gut gefiltert und somit nicht beachtet werden. Aufgrund der südöstlichen Ausrichtung der Gletscherzunge sind zum Zeitpunkt der Aufnahmen die meisten Flächen von der Problematik mit Schatten durch Bergflanken großmaßstäbig nicht betroffen, dennoch liegen kleinere Bereiche im Schatten. Vor allem bei Klassengrenzen in einem solchen Bereich konnten dadurch Ungenauigkeiten entstehen. Eine weitere Problematik trat bei fließenden Übergängen zwischen zwei Klassen, insbesondere zwischen Wasser- und Feinsedimentflächen auf. Dort ist zumeist anstatt einer klaren Trennungslinie eher ein Übergangsbereich erkennbar. In solchen Fällen wurde versucht, die Klassengrenzen in der Mitte der betroffenen Areale zu setzen.

Ergebnisse

Überblick und Kartierungen der Einzeljahre

In Tabelle 3 sowie in Abbildung 2 sind die relativen Anteile der unterschiedlichen Klassen für die sechs untersuchten Stände angegeben, wobei 100 % der Größe des Untersuchungsgebietes entspricht (1.769.570 m²). Bedingt durch die sehr geringe Flächenausdehnung der beiden Klassen EisBg und TotEL sind die Ergebnisse für diese zwei Klassen in Tabelle 3 auf drei Kommastellen genau angegeben. Abbildung 3 zeigt die Kartierungsergebnisse der sechs Jahre, worin klar erkennbar ist, dass das Schutt-arme Gletschereis im Beobachtungszeitraum extrem an Fläche abnimmt (49,1 auf 9,0 %), wohingegen der Anteil der Flächen bedeckt mit Grobsedimenten am stärksten zunimmt (2,3 auf 28,1 %).

Code	Jahr							
	1998	2003	2006	2009	2012	2015		
FeVeg	5,5	6,0	5,6	7,5	8,4	8,0		
GroSe	2,3	7,4	13,0	14,3	20,8	28,1		
FeiSe	6,6	6,7	10,8	8,9	12,3	8,3		
WasFl	3,7	5,4	2,5	6,9	5,7	14,0		
GleSA	49,1	40,7	34,9	30,2	22,5	9,0		
GleSB	32,9	33,7	33,1	32,1	30,2	32,5		
EisBg	0,000	0,002	0,000	0,001	0,003	0,002		
TotEL	0,002	0,003	0,089	0,023	0,047	0,020		
Summe	100	100	100	100	100	100		

Tab. 3: Relative Ergebnisse der Flächenauswertung unterschieden nach Klassen (Code siehe Tabelle 2) und Jahr (1998– 2015) in Prozent.



Abb. 2: Zusammenfassende Darstellung der prozentuellen Flächenverteilung der Untersuchungsklassen pro Kartierungsjahr. Erklärung der Codes siehe Tabelle 2.



Abb. 3: Ergebnisse der visuellen Bodenbedeckungskartierung für die Jahre (a) 1998, (b) 2003, (c) 2006, (d) 2009, (e) 2012 und (f) 2015 unterschieden auf die acht in Tabelle 2 definierten Klassen.

Abb. 4: Veränderungsdynamik im Untersuchungsgebiet: Änderung der Klassenzugehörigkeit (1x1-m-Rasterauflösuna) zwischen jeweils zwei zeitlich benachbarten Ständen: (a) Von 1998 auf 2003. (b) von 2003 auf 2006. (c) von 2006 auf 2009, (d) von 2009 auf 2012, (e) von 2012 auf 2015. (f) Gesamtveränderung zwischen 1998 und 2015: ie dunkler. desto öfter wurde die Klasse gewechselt.



Intensität der Veränderung

In den Abbildungen 4a bis 4e ist die Veränderung zwischen zwei aneinander folgenden Klassifizierungsjahren dargestellt. Dunkle Flächen stellen dabei jene Bereiche dar, die ihre Klassenzugehörigkeit geändert haben, während helle Flächen keine Veränderung anzeigen. In Abbildung 4f ist die gesamte Veränderung zwischen 1998 und 2015 dargestellt. Dabei weisen Pixel mit einem helleren Grauton eine geringe Variabilität hinsichtlich ihrer Klassenzugehörigkeit auf, während jene mit einem dunklen Grauton eine hohe Variabilität und folglich auch eine hohe Dynamik zeigen. Wie dieser Abbildung zu entnehmen ist, sind Flächen mit hoher Dynamik vor allem im Bereich des Sandersees und in jenem Teil des proglazialen Bereiches, der innerhalb des Untersuchungszeitraumes eisfrei geworden ist, zu finden. In den Bereichen, welche 2015 als Gletschereis (schuttarm oder schuttbedeckt) klassifiziert werden, aber auch in den Fels- und Vegetationsflächen kommt es kaum zu einer Veränderung während des gesamten Untersuchungszeitraumes.

Veränderungen in den unterschiedlichen Klassen

In manchen Diagrammen in Abbildung 5 wird auch eine Trendgerade unter Einbeziehung des Bestimmtheitsmaßes (R²) eingefügt. Obwohl in der Statistik üblicherweise erst ab einer Anzahl von 30 verschiedenen Messwerten statistische Parameter errechnet werden und damit die sechs Untersuchungsjahre als Datenpunkte bei Weitem nicht repräsentativ sind, kann durch Einführung einer Trendgerade die Entwicklung der einzelnen Klassen anschaulich aufgezeigt werden. Dies wird jedoch

572

nur bei jenen Klassen durchgeführt, die eine hohe Datenkorrelation aufweisen. Während des Untersuchungszeitraumes nimmt der Anteil der Flächen mit anstehendem Fels und Vegetation, wie in Abbildung 5a erkennbar ist, geringfügig zu. Dieser Flächenzuwachs ist überwiegend im nord- und südwestlichen Bereich des Untersuchungsgebietes vorzufinden. Der Trend kann mittels einer linearen Ausgleichsgeraden ausgedrückt werden. Diese weist eine Steigung von jährlich 2,508 Prozent-



Abb. 5: Flächenhafte Veränderung der verschiedenen Klassen zwischen 1998 und 2015 (anteilhaft an der Gesamtfläche): (a) Fels- und Vegetationsflächen, (b) Grobsedimentflächen, (c) Feinsedimentflächen, (d) Wasserflächen, (e) schuttarmes Gletschereis, (f) schuttbedecktes Gletschereis, (g) Eisbergflächen, (h) Toteislochflächen. Zu beachten die unterschiedlichen y-Achseneinheiten in (g) und (h).

punkten auf. Der Korrelationskoeffizient der Datenpunkte liegt bei $R^2 = 0,7857$ und somit ist mäßig starker, positiver Zusammenhang zwischen den Punkten erkennbar.

Bei der Klasse der Grobsedimentflächen kommt es zu einem relativ stetigen Zuwachs der Flächenanteile im gesamten Untersuchungszeitraum (Bestimmtheitsgrad von $R^2 = 0.9636$). Mit einem durchschnittlichen interpolierten Zuwachs von jährlich 24.600 m² ist diese Klasse die am stärksten kontinuierlich wachsende im Untersuchungsgebiet. Dieser Flächenzuwachs ist überwiegend im nord- und südwestlichen Untersuchungsbereich zu finden. Die Grobsedimentflächen im Bereich des Sandersees bleiben weitestgehend während des Untersuchungszeitraumes konstant und beschränken sich zum einen auf einen Schwemmkegel im nördlichen Bereich des Sandersees und zum anderen auf ebenso fluvial eingetragene Geröllfelder im südlichen Bereich des Sees. Eine differenzierte Entwicklung ist im Bereich zwischen dem Ende der Gletscherzunge jedes Kartierungsjahres und dem Sandersee zu betrachten. Dieser in seiner Klassenzugehörigkeit sehr variable Bereich zeichnet sich durch häufiges Zu- und Abnehmen der Grobsedimentflächen aus



Abb. 6: Ausdehnung der Feinsedimentflächen im Bereich des Sandersees während der sechs verschiedenen Stände.

Die Ausdehnung der Feinsedimentflächen, wie in Abbildung 5c erkennbar ist, unterliegt starken Schwankungen. Daher kann für die Flächen dieser Klasse kein linearer Trend festgestellt werden. Es lässt sich allerdings eine qualitative Beobachtung zur Entwicklung festhalten. Die Feinsedimentflächen beschränken sich 1998 noch weitestgehend auf den Bereich des Sandersees sowie bis hin zum damaligen Gletscherzungenende und nehmen mit fortschreitender Abschmelzung höher gelegene Flächen im Nahbereich der Wasserflächen ein. Zu betonen ist aber auch, dass aufgrund der unterschiedlich hohen Wasserstände des Schmelzwasserbaches es auch zu einer hohen Variation der Flächenanteile kommt, da manche Bereiche beispielsweise im Sandersee auf einigen Aufnahmen überflutet, auf anderen trockengelegt sind. Diese zeitliche Variabilität der Feinsedimentflächen im Bereich des Sandersees ist Abbildung 6 zu entnehmen.

Die schuttarmen Gletschereisflächen (Abbildung 5e) sind von einer starken Abnahme geprägt. Während im ersten Untersuchungsjahr noch fast die Hälfte (49,06 %) des Untersuchungsgebietes von Flächen dieser Klasse eingenommen wird, verringert sich der Anteil auf 8,96 % im Jahr 2015. Die interpolierte Ausgleichsgerade mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9549$ entspricht annähernd einer Geraden durch die Datenpunkte. Daraus ergibt sich ein jährlicher Verlust von rund 37.000 m². Dieser Flächenverlust ist sowohl auf eine Verkürzung in Bezug auf die Länge als auch in geringerem Maße auf die Breite zurückzuführen und im östlichen sowie am nördlichen Rand in Abbildung 7 erkennbar. Der Flächenverlust am südlichen Rand der Klasse beruht auf der Ausdehnung der Fläche mit Schuttbedecktem Gletschereis.

Die Flächen des schuttbedeckten Gletschereises nehmen, wie aus dem Diagramm in Abbildung 5f ersichtlich ist, nahezu konstant über die Kartierungsjahre ein Drittel der untersuchten Fläche ein. Allerdings ist diese gleichbleibende Flächeninanspruchnahme auf eine Umverteilung zurückzuführen und bedeutet keine Flächenkonstanz. Wie Abbildung 7 zeigt, ist das schuttbedeckte Gletschereis am südlichen und östlichen Rand der entsprechenden Klasse abgeschmolzen, sodass die schuttbedeckte Klasse im Jahr 2015 nur mehr etwa 75 % der Fläche des Polygons von 1998 einnimmt. Hingegen ist eine Flächenzunahme im nördlichen Bereich der Klasse zu erkennen, sodass der Eindruck einer sich nicht verändernden Klasse entsteht.

Die Eisbergflächen (Abb. 5g) sind im Bereich zwischen dem jeweiligen Gletscherzungenende und dem Beginn des Sandersees vorzufinden, sind aber mit ihrer maximalen Ausdehnung von circa 31 ppm (d. h. parts per million) des Untersuchungsgebietes flächenmäßig nicht von Relevanz. Dabei ist auch zu beachten, dass kein linearer Zusammenhang der einzelnen Werte zur zeitlichen Entwicklung erkennbar ist.

Auch die Flächenanteile der Toteislöcher (maximal 1.579,8 m² des Untersuchungsgebietes im Jahr 2006) sind im Gesamtbild der Arbeit zu vernachlässigen. Wie aus Abbildung 5h (y-Achse in Promille dargestellt) ersichtlich ist, weisen die Flächenanteile Schwankungen auf und spiegeln daher keinen linearen Veränderungstrend wieder. Die meisten Toteislöcher kleineren Ausmaßes sind im Bereich zwischen dem jewei-

Abb. 7: Veränderung der Flächen mit schuttarmem und schuttbedecktem Gletschereis zwischen 1998 und 2015.



ligen Ende der Gletscherzunge und dem Sandersee zu finden. Seit dem Untersuchungsjahr 2006 haben sich zudem auch Toteislöcher im Bereich des Sandersees entwickelt.

Diskussion

In der gesamten Zeitspanne der Untersuchungen zwischen 1998 und 2015 sind rund 70 ha im Bereich des Untersuchungsgebietes des Gletschereises oberflächlich ausgeschmolzen. Aus geophysikalischen Messungen ist jedoch bekannt, dass im Untergrund des Gletschervorfeldes der Pasterze noch großflächig Eiskörper im Untergrund zu finden sind (SEIER et al. 2017). Die Flächenabnahme von 70 ha entspricht für den Untersuchungszeitraum einer Halbierung der mit Gletschereis bedeckten Flächen von über 80 Prozent auf 40 Prozent der Fläche. Diese Veränderung ist deutlich in Abbildung 2 zu erkennen.

Durch die isolierende Wirkung der Schuttbedeckung ist im schuttbedeckten, orographischen rechten Teil der Gletscherzunge der Schmelzvorgang wesentlich verzögert, weshalb die meisten Veränderungen im Bereich der abschmelzenden schuttarmen Gletschereisflächen feststellbar sind (Kellerer-Pirklbauer et al. 2008), was sich auch massiv auf die Gletscherspaltenentwicklung nahe dem Gletscherende der Pasterze auswirkt (Kellerer-Pirklbauer & Kulmer 2018). Die freiwerdenden Flächen werden zum einen von den Grobsedimentflächen eingenommen, wie durch den stetigen Anstieg der Flächenanteile in dieser Klasse erkennbar ist, zum anderen von den anstehenden Fels- und Vegetationsflächen. Der Zuwachs der beiden Klassen ist maßgeblich im Bereich der orographisch linken Talflanke festzustellen. Durch das Abschmelzen des Eises kommt entweder direkt das Ausgangsgestein zum Vorschein oder es entwickeln sich Grobsedimentflächen. Diese entstehen durch Ablagerungen der Seitenmoränen, durch Eintrag der Sedimente aus dem Bereich der 1850er Moräne oder durch ausgeschmolzene Sedimente aus dem Bereich des schuttbedeckten Gletschereises (siehe auch AVIAN et al. 2018)

Die eisfreien Flächen, die sich durch den Rückzug der Gletscherzunge ergeben und sehr variabel in der Klassenzugehörigkeit sind, können nicht gänzlich auf ein Wachstum der Grobsedimentflächen zurückgeführt werden. Separiert betrachtet lässt sich jedoch weder bei den Feinsedimentflächen noch bei den Wasserflächen ein Trend erkennen, der die Entwicklung dieser Flächen charakterisiert. Werden diese Flächen hingegen gemeinsam anstatt einzeln betrachtet, so ist ein positiv ansteigender Trend mit einer Bestimmtheit von $R^2 = 0.9297$ für eine lineare Trendgerade der beiden summierten Flächen zu erkennen. Somit ist ein ähnliches Verhalten wie bei den Grobsedimentflächen und anstehenden Fels- und Vegetationsflächen zu sehen. Durch das zunehmende Abschmelzen des Eises nehmen also die potentiellen Flächen für Feinsedimente und Wasseroberflächen stark zu. Da jedoch bei den verwendeten Orthofotos Momentaufnahmen vorliegen, wird ein zeitlich begrenzter, aktueller Wasserstand aufgenommen, der potentielle Feinsediment- beziehungsweise Wasserflächen überdecken kann. Des Weiteren werden laut GEILHAUSEN et al. (2012) durchschnittlich circa 6,3 x 10⁴ Tonnen der Feinsedimente mit dem Gletscherbach abtransportiert, womit die Flächenanteile dieser Klasse wiederum verringert werden können, wenn andererseits nicht genug "frisches" Material von oben nachkommt. Somit ergänzen sich Wasser- und Feinsedimentflächen, die summiert einen zunehmenden Trend aufweisen. Dieser fällt mit einem Zuwachs von 118 % über den gesamten Zeitraum allerdings geringer aus, als das Ergebnis der Studie von Avian et al. (2018), in welcher eine Zunahme von 185 % in einem Zeitraum von drei Jahren angegeben wird. Diese Diskrepanz der Ergebnisse kann auf den flächenmäßig kleineren, auf diesen Teilbereich eingeschränkten Untersuchungsraum der Vergleichsstudie zurückgeführt werden, da sich dort die Veränderungen stärker bemerkbar machen. Die Studie zeigt methodisch indirekt, dass bei vergleichenden Studien mit ähnlicher Thematik die Auswahl des Arbeitsgebietes sich naturgemäß auch markant auf die numerischen Ergebnisse auswirken kann.

Weitere Veränderungen, welche nicht unmittelbar mit dem Rückzug des Gletschereises in Zusammenhang stehen, sind dort festzustellen, wo durch gravitative Prozesse Flächen der ersten Klasse von Moränensedimenten überlagert worden sind. Die proglazialen Bereiche sind nach BALLANTYNE (2002) vor allem in den ersten 30 Jahren nach dem Rückzug des Gletschers von den höchsten Raten an Massenbewegungen geprägt. Zumeist sind aufgrund der fehlenden Vegetation die Zusammensetzung der abgelagerten Sedimente sehr instabil und die Flanken stark übersteilt, sodass es häufig zu Massenbewegungen kommt (BALLANTYNE 2002). Somit können Grobsedimentflächen anstehende Fels- und Vegetationsflächen überlagern. An den steilen Talflanken des Untersuchungsgebietes ist auch lineare Erosion, in Form sogenannter Gully-Erosion, deutlich erkennbar (AVIAN et al. 2018).

Für die Eisbergflächen kann gesagt werden, dass diese abhängig von der Aufnahme eher zufällig auftreten, jedoch auf Grund ihres geringen Flächenanteils wenig Einfluss auf das Ergebnis haben. Im Gegensatz dazu stehen die Toteislochflächen. Diese Flächen, die ebenso nur geringe Flächenanteile einnehmen und wiederum abhängig vom Wasserstand des Schmelzwasserbaches sind, können ab dem Orthofoto 2006 im Bereich des Sandersees gesehen und je nach Wasserstand im Sandersee überspült werden. Im nordwestlichen Bereich bleiben diese jedoch gut sichtbar erhalten.

Die größten Änderungen sind häufig im Bereich zwischen dem Gletscherzungenende sowie dem Sandersee zu erkennen. Dieser dynamische Bereich zählt überwiegend zu den Klassen von Grobsediment-, Feinsediment- und Wasserflächen. Daher kann geschlossen werden, dass auf der Zeitskala dieser Untersuchung (1998–2015) vor allem der Schmelzwasserbach wesentlich zur Dynamik der Landbedeckungsänderungen beiträgt.

Fazit

Im Zeitraum der Untersuchung von 1998 bis 2015 kommt es im Bereich des Sandersees sowie der im Zeitraum eisfrei gewordenen Flächen zu den häufigsten Veränderungen des Klassifizierungsergebnisses, wobei die Ergebnisse mitunter stark vom Wasserstand zum Zeitpunkt der Aufnahme abhängig sind. Dies zeigt auch der Trend der Veränderungen allgemein. Während die Flächen des schuttarmen Gletschereises von fast der Hälfte des Untersuchungsgebietes im Jahr 1998 auf weniger als zehn Prozent im Jahr 2015 am stärksten zurückgehen, bleibt die Fläche des schuttbedeckten Teiles des Gletschers aufgrund von zunehmender Sedimentation der Gletscheroberfläche und geringeren Abschmelzraten annähernd konstant bei circa einem Drittel des Untersuchungsgebietes.

Der Prozess, dass Flächen des Gletschereises rückläufig sind, korreliert mit der Zunahme der Grobsedimentflächen und der anstehenden Fels- und Vegetationsflächen, wobei letztere ein wesentlich geringeres Wachstum aufweisen. Auch die beiden Klassen Feinsediment- und Wasserflächen, welche negativ korreliert zusammenhängen, weisen in Summe einen starken Zuwachs an Flächenanteilen auf und nehmen 2015 schon mehr als ein Fünftel der untersuchten Fläche ein. Es lässt sich allgemein sagen, dass die Flächen, die an den Hängen des Tales vom Gletschereis freigegeben werden, überwiegend den Fels- und Vegetationsflächen sowie den Grobsedimentflächen zuzuordnen sind, während die Flächen, die am Ende der Gletscherzunge am Talboden freigelegt werden, zumeist zu den Feinsediment- und Wasserflächen übergehen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass mit Hilfe von geometrisch hochaufgelösten optischen Daten und einem klar definierten Klassifizierungsschema – wie in dieser Studie gezeigt – sehr gut die geomorphologisch-glaziologische Entwicklung eines glazialen-proglazialen Bereiches darstellen lässt, wobei sich der größte Gletscher Österreichs hier sehr gut als Fallbeispiel anbietet und folglich auch wertvolle allgemeine Erkenntnisse in der Entwicklung der alpinen Gletscher und Gletschervorfelder liefert.

LITERATUR

- ALBERTZ J. (2007): Einführung in die Fernerkundung Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. – Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 250 S.
- AVIAN M., KELLERER-PIRKLBAUER A. & LIEB G. K. (2018): Geomorphic consequences of rapid deglaciation at Pasterze Glacier, Hohe Tauern Range, Austria, between 2010 and 2013 based on repeated terrestrial laser scanning data. – Geomorphology, 310: 1–14. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.003
- BALLANTYNE C. K. (2002): Paraglacial geomorphology. Quaternary Science Reviews, 21: 1935–2017.
- BENN D. I. & EVANS D. J. A. (2010): Glaciers & Glaciation 2. Edition. Taylor & Francis, London, 816 S.
- BISHOP M. P. & SHRODER J. F. (Ed.) (2004): Geographic information science and mountain geomorphology. Springer, Berlin, 486.
- CHANDLER B. M., LOVELL H., BOSTON C. M., LUKAS S., BARR I. D., BENEDIKTSSON Í. Ö., BENN D. I., CLARK C. D., DARVILL C. M., EVANS D. J., EWERTOWSKI M. W., LOIBL D., MARGOLD M., OTTO, J.-C., ROBERTS D. H., STOKES C. R., STORRAR R. D. & STROEVEN A. P. (2018): Glacial geomorphological mapping. A review of approaches and frameworks for best practice. – Earth-Science Reviews, 185: 806–846.
- FISCHER A., PATZELT G., ACHRAINER M., GROSS G., LIEB G. K., KELLERER-PIRKLBAUER A. & BENDLER G. (2018): Gletscher im Wandel: 125 Jahre Gletschermessdienst des Alpenvereins. – Springer Spektrum, 140 S. doi:10.1007/978-3-662-55540-8.
- GEILHAUSEN M. & SCHROTT L. (2011): Der Sandersee an der Pasterze vom Werden und Vergehen eines Gletschersees: 126–129. In: LIEB G. K. & SLUPETZKY H. (Eds.) (2011): Die Pasterze – Der Gletscher am Großglockner. – Nationalpark Hohe Tauern und Österreichischer Alpenverein, Pustet Verlag, Salzburg, 160 S.
- GEILHAUSEN M., OTTO J.-C., MORCHE D. & SCHROTT L. (2012): Decadal sediment yield from an Alpine proglacial zone inferred from reservoir sedimentation (Pasterze, Hohe Tauern, Austria). – International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publications, 356: 161–172.
- HÖCK V. & PESTAL G. (1994): Geologische Karte der Republik Österreich. 153 Grossglockner. – Geologische Bundesanstalt GBA, Wien.
- KAUFMANN V., KELLERER-PIRKLBAUER A., LIEB G. K., SLUPETZKY H. & AVIAN M. (2015): Glaciological studies at Pasterze Glacier (Austria) based on aerial photographs 2003–2006–2009: 173–198. In: YANG X. & LI J. (Eds.) (2015): Monitoring and Modelling of Global Changes: A Geomatics Perspective. – Springer, Heidelberg, 320 S.

- KELLERER-PIRKLBAUER A. (2018): Dealing with natural hazards caused by massive changes of the frozen environment: examples from Alpine Austria. – Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung, 48: 33–43.
- KELLERER-PIRKLBAUER A. & KULMER B. (2018): The evolution of brittle and ductile structures at the surface of a partly debris-covered, rapidly thinning and slowly moving glacier in 1998–2012 (Pasterze Glacier, Austria). – Earth Surface Processes and Landforms - Published online in Wiley Online Library; DOI:10.1002/esp.4552
- KELLERER-PIRKLBAUER A., LIEB G. K., AVIAN M. & GSPURNIG J. (2008): The response of partially debris-covered valley glaciers to climate change: the example of the Pasterze glacier (Austria) in the period 1964 to 2006. – Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 90 A/4: 269–285.
- KRISCH P. (2019): Morphologisch-hydrologische Veränderungen des proglazialen Talbodens der Pasterze, Hohe Tauern, im Zeitraum 1998–2015. – Bachelorarbeit, Universität Graz, 47 S.
- LIEB G. K. & KELLERER-PIRKLBAUER A. (2018): Die Pasterze, Österreichs größter Gletscher, und seine lange Messreihe in einer Ära massiven Gletscherschwundes: 31–51. In: FISCHER A., PATZEL G., ACHRAINER M., GROSS G., LIEB G. K., KELLERER-PIRKLBAUER A. & BENDLER G. (Eds.) (2018): 125 Jahre Gletschermessdienst des Alpenvereins. – Springer Spektrum, Heidelberg, 140 S.
- LIEB G. K. & SLUPETZKY H. (2004): Gletscherweg Pasterze. Naturkundlicher Führer zum Nationalpark Hohe Tauern (2. völlig neu bearbeitete Auflage), Innsbruck, 122 S.
- LIEB G. K. & SLUPETZKY H. (2011): Die Pasterze Der Gletscher am Großglockner. Nationalpark Hohe Tauern und Österreichischer Alpenverein, Pustet Verlag, Salzburg, 160 S.
- SEIER G., KELLERER-PIRKLBAUER A., WECHT M., HIRSCHMANN S., KAUFMANN V., LIEB G. K. & SULZER W. (2017): UAS-Based Change Detection of the Glacial and Proglacial Transition Zone at Pasterze Glacier, Austria. – Remote Sensing, 9(6), 549: 1–19. doi:10.3390/ rs9060549

Anschrift der Autoren

Philipp Krisch, BSc, Institut für Geographie und Raumforschung, Arbeitsgruppe Alpine Landschaftsdynamik (ALADYN), Universität Graz, Heinrichstrasse 36, 8010 Graz E-Mail: philipp. krisch@edu.unigraz.at

Mag. Mag. Dr. Andreas Kellerer-Pirklbauer, Institut für Geographie und Raumforschung, Arbeitsgruppe Alpine Landschaftsdynamik (ALADYN), Universität Graz, Heinrichstrasse 36, 8010 Graz E-Mail: andreas. kellerer@uni-graz.at

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Carinthia II

Jahr/Year: 2019

Band/Volume: 209_129

Autor(en)/Author(s): Krisch Philipp, Kellerer-Pirklbauer Andreas

Artikel/Article: Landschaftsdynamik im glazialenproglazialen Übergangsbereich der Pasterze im Zeitraum 1998–2015 565-580