

# Kapitel 3 | Gletscher in Tirol, ihre Verteilung und jüngsten Veränderungen

Jakob Abermann, Michael Kuhn, Astrid Lambrecht, Lea Hartl

## *Zusammenfassung*

In diesem Beitrag werden die Gletscherbedeckung Tirols und deren Veränderungen behandelt. Dabei wird ein Schwerpunkt auf Untersuchungen und Daten gelegt, die über die gesamte Eisbedeckung Aufschluss geben (z. B. Gletscherinventare), und weniger auf Studien einzelner Gletscher, wie etwa Untersuchungen von Längenänderungen und Massenbilanzen eingegangen. Seit dem letzten Gletschermaximum am Ende der kleinen Eiszeit (Little Ice Age, LIA) um 1850 haben die Tiroler Gletscher signifikant an Fläche und Volumen verloren. Allerdings konnten kleine Vorstöße in den 1870ern, 1920ern und 1980ern verzeichnet werden. 1969, im Jahr des ersten Gletscherinventars, war in Nord- und Osttirol eine Fläche von 393 km<sup>2</sup> eisbedeckt. 1997 hatte sich dort die Eisbedeckung auf 325 km<sup>2</sup> reduziert. In den letzten Jahren (zwischen 1997 und 2006) wird eine Beschleunigung des Rückzugs beobachtet, die auf positive Temperaturanomalien zurückgeführt wird.

Des Weiteren wird der Zusammenhang zwischen den topographischen Eigenschaften der Gletscher (z. B. Größe; Ausrichtung; mi-

nimale, maximale und mittlere Meereshöhe) und ihren Veränderungen quantifiziert. Zwei Drittel der gesamten Gletscherfläche haben eine Exposition von Nordwest über Nord bis Nordost. Die geringsten Verluste sind auf Gletschern mit Exposition nach Westen zu verzeichnen. Ein Zusammenhang zwischen diesen Eigenschaften und klimatischen Parametern wurde festgestellt und quantifiziert. Geringere mittlere Meereshöhen werden hauptsächlich durch erhöhte Winterniederschläge und kühlere Sommertemperaturen bedingt.

## *Abstract*

The glacier cover in Tyrol and its change with time is reviewed. A variety of data is used and emphasis is put on the data that allow for the assessment of total ice coverage (i.e. glacier inventories) in contrast to studies that deal with selected glaciers only (i.e. length change, mass balance). Since their maximum extent at the end of the Little Ice Age around 1850, area and volume of the Tyrolean glaciers reduced significantly. Small advances in the 1870s,

1920s and 1980s are reported. In 1969, the year with the first complete glacier inventory, an area of 393 km<sup>2</sup> in Tyrol (North and East Tyrol) was covered with ice. This was reduced to 325 km<sup>2</sup> by 1997. In very recent years (i.e. between 1997 and 2006) an accelerated retreat is observed, which is mainly attributed to positive temperature anomalies.

The relationship between the glaciers' characteristics (e.g. size, orientation, minimum, maximum and median elevation) and their changes is quantified. Two thirds of the total glacier area are exposed towards the sector from northwest over north to northeast. The smallest loss of ice thickness occurred in the west-exposed sector. A relationship between these characteristics and mean climatic values was found and quantified. Larger mean winter precipitation values coincide with generally cooler summer temperatures and are a primary reason for lower median elevations.

## 1. Einleitung

---

Die Tiroler Gletscher und ihre Veränderungen im Zuge klimatischer Schwankungen waren und sind Gegenstand zahlreicher Studien (z.B. Hoinkes 1970, Kuhn et al. 1997, Schöner & Böhm 2007, Abermann et al. 2011a). Gletscherschwankungen in Tirol sind für Anwendungsbereiche wie Wasserkraft (Kuhn 2003, Lambrecht & Mayer 2009, Leonhard et al. 2009) und Tourismus (Olefs & Fischer

2008, Fischer et al. 2010) von großer Bedeutung und liefern wichtigen Input für andere Forschungsfelder, wie z. B. Botanik (Raffl et al. 2006), Archäologie (Bonani et al. 1994) oder Zoologie (Kaufmann et al. 2002). Das Ziel modernen Gletschermonitorings ist es, zum Verständnis des Zusammenhangs zwischen Klima und Gletscher beizutragen, indem so viel Information wie möglich aus verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen zusammengetragen und kombiniert wird (Paul 2007, Zemp et al. 2007).

Kenntnis von Gletscherschwankungen im Untersuchungsgebiet wurde mit Hilfe folgender Quellen erlangt: Gemälde (Nicolussi 1993), schriftliche Aufzeichnungen (Walcher 1773), Karten (Richter 1888), Baumringe (Nicolussi et al. 2005), Längenänderungs- und Massenbilanzmessungen (Fischer & Markl 2008; Fischer, Kapitel 2 in diesem Buch), digitale Höhenmodelle (DEMs) einzelner Gletscher in 10-Jahres-Intervallen (Rentsch et al. 2004) und Gletscherinventare verschiedener Jahre (Patzelt 1980, Gross 1987, Lambrecht & Kuhn 2007, Abermann et al. 2009, Kuhn et al. 2008b). Während Gemälde, Karten und Baumringe lediglich Informationen über einen bestimmten Gletscher zu einem bestimmten Zeitpunkt liefern, gibt es Zeitreihen der Längenänderungen von 54 Gletschern, die teilweise bis 1891 zurückreichen (Fischer, Kapitel 2 in diesem Buch). Allerdings beschränken sich die Längenmessungen auf eine begrenzte Gruppe von Gletschern, die vor allem auf Grund ihrer Erreichbarkeit und weniger wegen ihrer Repräsentanz ausgewählt wurden.

Außerdem ist der Zusammenhang zwischen klimatischen Schwankungen und Längenänderungen auf Grund der unterschiedlichen Reaktionszeiten verschiedener Gletscher sehr kompliziert, was die Ableitung klimatischer Informationen aus diesen Daten schwierig macht. Jährliche Massenbilanzmessungen erlauben es, das Wetter einer Saison und den resultierenden Bilanzterm in direkten Bezug zur Gletschermasse zu setzen. Auf Grund des hohen Arbeitsaufwands beschränken sich die Massenbilanzmessungen auf einige wenige Gletscher im Untersuchungsgebiet wie etwa Jamtalferner, Hintereisferner, Kesselwandferner, Vernagtferner und Mullwitzkees (Fischer, Kapitel 2 in diesem Buch). Auch die Massenbilanzdaten sind auf Grund der wenigen untersuchten Gletscher nur bedingt repräsentativ (Fountain et al. 2009). Gletscherinventare bieten Momentaufnahmen der Fläche und der Oberflächentopographie sämtlicher Gletscher des Untersuchungsgebiets. Inventare verschiedener Jahre erlauben daher detaillierte Rückschlüsse auf Flächenänderungen und, sind digitale Höhenmodelle (DEMs) vorhanden, auch auf Volumenänderungen. Gletscherinventare werden im Abstand von einigen Jahrzehnten erstellt und implizieren daher ein vereinfachtes Massenbilanzsignal. Anhand einer Reihe von Inventaren kann auf klimatische Veränderungen rückgeschlossen werden. Außerdem können jährliche Massenbilanzen einzelner Gletscher rekonstruiert werden (Abermann et al. 2011b).

In dieser Studie werden die Ergebnisse des letzten vollständigen Tiroler Gletscherinven-

tars von 1998 gezeigt und Zusammenhänge zwischen Exposition, Fläche und charakteristischen Höhen (z. B. Minimum, Maximum und Median der Meereshöhe) der Gletscher untersucht. Des Weiteren werden Flächen- und Volumenänderungen zwischen 1969 und 1998 quantifiziert und besprochen. Zusätzlich werden erste Ergebnisse eines neuen Gletscherinventars von 2006 gezeigt, um den beschleunigten Gletscherrückzug zu verdeutlichen. Dieser Artikel gibt einen Überblick über die Gletscher Tirols und über jüngste Veränderungen in Relation zu klimatischen Parametern und rundet die Arbeit von Fischer (Kapitel 2 in diesem Buch) ab, in der Daten einzelner Gletscher in hoher zeitlicher Auflösung präsentiert werden.

## 2. Untersuchungsgebiet

---

Die 620 Tiroler Gletscher umfassen nach dem Gletscherinventar von 1998 eine Gesamtfläche von 325 km<sup>2</sup>. Das entspricht etwa 3 % der Fläche Tirols und etwa 69 % der Gesamtgletscherfläche Österreichs. In Abb. 1 ist die Lage der Gletscher mit Höheninformationen im Hintergrund dargestellt. Die stärkste Vergletscherung findet sich im Süden des Landes entlang des Alpenhauptkamms (Gipfel bis knapp 3800 m). In tiefer liegenden, niederschlagsreichen Gebieten im Nordwesten und Norden des Landes befinden sich einige sehr kleine Gletscher, wie etwa der Miemin-

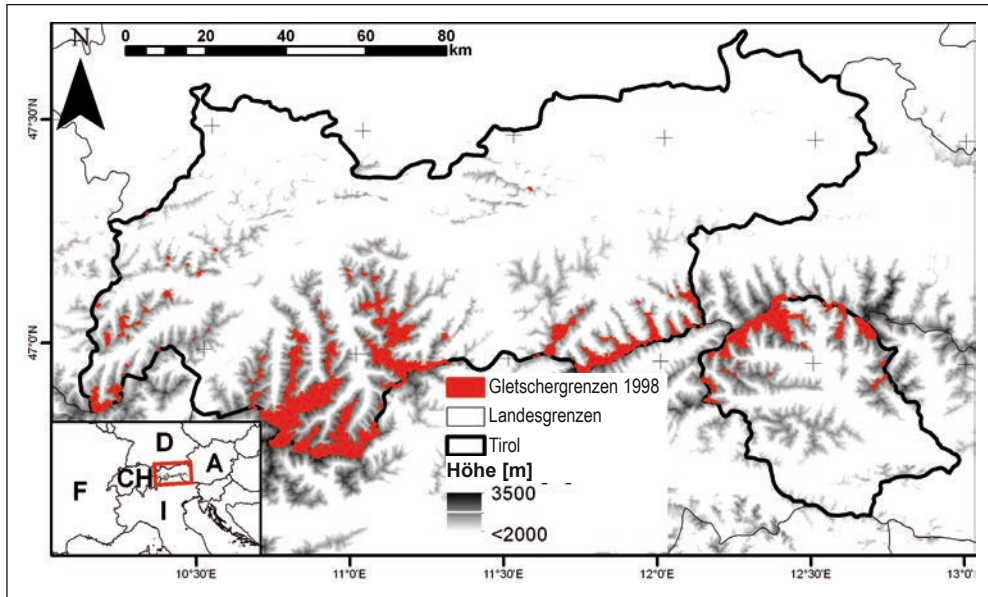


Abb. 1: Das Untersuchungsgebiet: Gletscher in Tirol (rot), Gebiete über 2000m sind grau schattiert. Im Hintergrund liegt ein ASTER Höhenmodell von 1998

ger Schneeferner (Abb. 2b). Die Gletscher in diesem Gebiet werden durch Lawinen und Winddrift gespeist und reagieren weniger stark auf Änderungen der Temperatur als große Gletscher wie beispielsweise der Gepatschferner (Abb 2c).

Abb. 2 zeigt beispielhaft verschiedene Gletschertypen im Untersuchungsgebiet. In Abb. 2a ist ein Talgletscher zusehen, in 2b ein Kargletscher und in 2c ein, mit einer weißen Ellipse markierter, regenerierter Gletscher. Abb. 2d zeigt mehrere interessante Phänomene: Ein Talgletscher mit vielen Spalten im linken Drittel des Bildes, ein kleiner Hängegletscher (weißer Pfeil) und ein von einer Moräne aufgestauter See (Kreuz). In Abb. 2e ist ein Plateau-artiger Gletscher zu sehen.

### 3. Klima

Tirol hat ein moderates Klima, das maßgeblich vom atlantischen Regime (milde Winter, kühle Sommer), vom kontinentalen Regime (kalte Winter, heiße Sommer) und vom mediterranen Regime (milde Winter, heiße Sommer) beeinflusst wird. Staueffekte an der Topographie können Niederschlagsmengen erhöhen oder verringern und beeinflussen die Temperatur. Wettersysteme, die sich den Alpen nähern, werden orographisch gehoben und es kommt zu Stauniederschlägen an den Hängen. Im Gegenzug ist es in inneralpinen Tälern auf Grund von Lee-Effekten (z.B. Föhn) und topographischer Abschattung relativ trocken (Fliri 1975). Die Temperaturver-

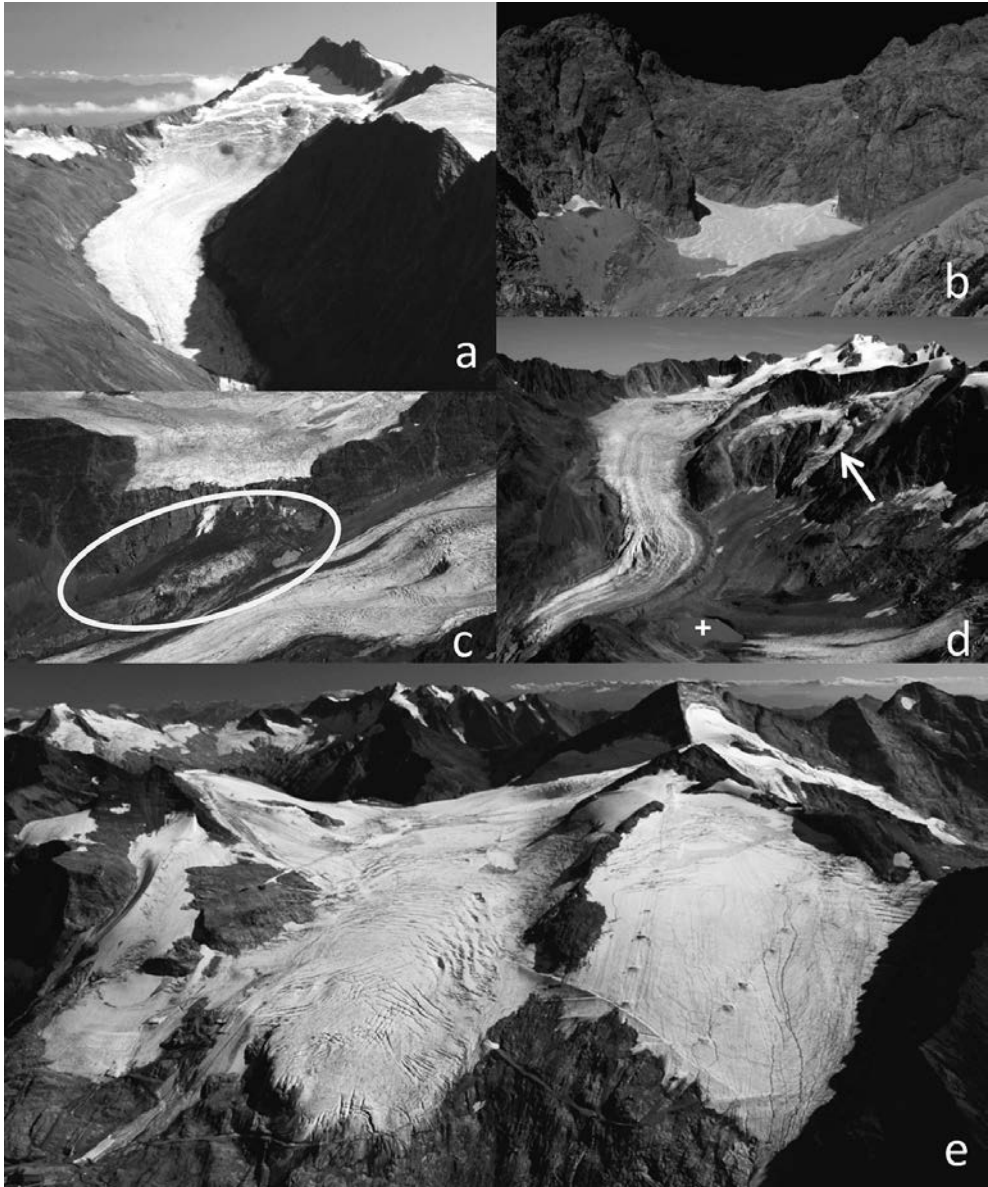


Abb. 2: Beispiele verschiedener Gletschertypen in Tirol: a) Langtaler Ferner, b) Mieminger Schneeferner, c) der westliche Rand des Gepatschferners über dem Langtaufener Ferner – die Ellipse markiert einen regenerierten Teil des Geptaschferners, d) Taschachferner – das Kreuz markiert einen kürzlich entstandenen Gletschersee, der Pfeil markiert einen Hängegletscher an der Seite des Taschachferners, e) Gefrorener Wand Kees (Fotos: Jakob Abermann, Sep. 2008)

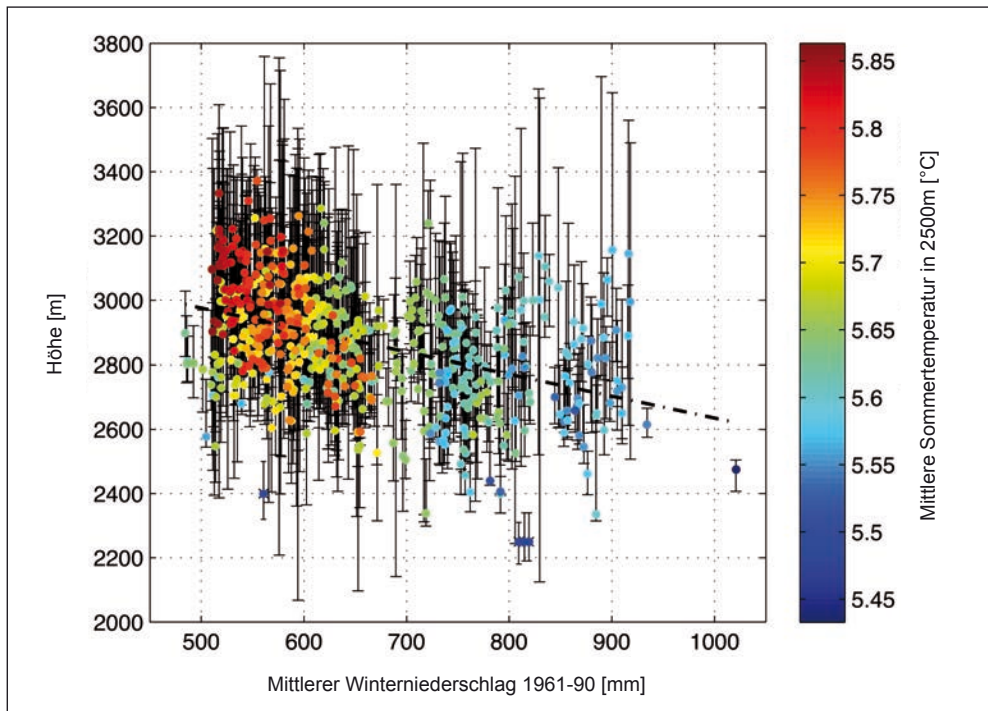


Abb. 3: Das Verhältnis zwischen mittlerem Winterniederschlag, Median- (Punkt), Maximal- und Minimalhöhe (oberer und unterer Querbalken) der Gletscher und der mittleren Sommertemperatur (Juni – August, Farbcode) in 2500 m Meereshöhe von allen Gletschern des Untersuchungsgebietes. Die gestrichelte Linie zeigt die Regressionsgerade zwischen Winterniederschlag und Median der Meereshöhe

teilung ist in erster Linie eine Funktion der Meereshöhe, jedoch beeinflussen Lee-Effekte stark die Sonnenscheindauer und damit auch die Temperatur. Vergleicht man Temperaturdaten gleicher Höhenlagen im Norden und Süden, zeigt sich ein schwacher, aber signifikanter Nord-Süd Gradient mit wärmeren Temperaturen im Süden. Dies ist auf maritime Einflüsse im Süden während des Winters zurückzuführen, sowie auf subtropische Hochdruckgebiete, die im Sommer den Süden des Landes erreichen (Abermann et al. 2011a).

Abb. 3 fasst die Lage der Gletscher in Relation zu den wichtigsten klimatischen Parametern zusammen. Die Temperaturdaten stammen aus den 700 und 850 hPa Druckniveaus des ERA40 Reanalyseprojekts (Uppala et al. 2005), während der mittlere Winterniederschlag mit Hilfe der HISTALP Datenbank (Efthymiadis et al. 2006) quantifiziert wurde. Details zur Berechnung des Winterniederschlags finden sich in Abermann et al. (2011a). Die maximalen und minimalen Meereshöhen stammen aus dem Österreichischen Gletscherinventar von 1998 (Lambrecht & Kuhn 2007). Die

Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen dem mittleren Winterniederschlag und dem Median der Meereshöhe. Der Korrelationskoeffizient beträgt  $-0,43$  und ist statistisch signifikant (die schwarze gestrichelte Linie zeigt die lineare Regression). Der Median der Meereshöhe ist an den Gletschern der trockenen, inneralpinen Gebiete wesentlich höher. Außerdem sind diese Gletscher allgemein höheren Sommertemperaturen ausgesetzt (s. Farbcode). Die schwarzen Balken im Hintergrund stellen die vertikale Ausdehnung der Gletscher dar. Gletscher in sehr trockenen Gebieten, d. h. mit weniger als 650 mm Winterniederschlag, befinden sich auch in relativ warmen Gegenden, können aber durch die große Höhe der Gipfel bis in niedrige Lagen vordringen. Es ist genug Platz für große Akkumulationsgebiete vorhanden und es kann Masse in niedrige Höhenzonen transportiert werden.

Entsprechend der Langzeittemperatur- und Niederschlagskurven für das Ötztal (Fischer, Abb. 6, Kapitel 2 in diesem Buch) ist quantitativ festzustellen, dass die Temperatur in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts anstieg, abgesehen von einer kurzen Unterbrechung um 1915. In den frühen 1950er Jahren kehrt sich dieser Trend um und bis in die 1970er Jahre werden negative Temperaturanomalien verzeichnet. Nach 1975 ist ein signifikanter, allmählicher Anstieg zu sehen. Die Niederschlagsdaten weisen keinen allgemeinen Trend auf, allerdings wurden einige Schwankungen dokumentiert. In jüngster Zeit gab es überdurchschnittlich viel Niederschlag. Abermann et al. (2011b) zeigt, dass sich die Tem-

peratur im Untersuchungsgebiet einheitlicher geändert hat, als der Niederschlag.

### 4. Gletscher-Fluktuationen

---

Dank der dritten militärischen Landesaufnahme von 1870 (Abb. 4) und der Arbeit von Richter (1888) sind die Schwankungen der Tiroler Gletscher in vergangener Zeit gut bekannt.

Eine detaillierte Studie zu Gletscherflächenänderungen in Österreich von Gross (1987) hat gezeigt, dass sich die Gesamtgletscherfläche zwischen dem Maximum der kleinen Eiszeit und 1895 um 20 % verringert hat, um dann bis etwa 1925 ungefähr konstant zu bleiben. Aufgrund des bereits erläuterten Temperaturanstiegs Anfang des 20. Jahrhunderts schrumpften die Gletscher bis 1969 auf eine Fläche von nur 56 % des LIA- Maximums (Gross 1987).

Das erste vollständige Gletscherinventar Österreichs wurde 1969 an der Universität Innsbruck zusammengestellt (Gross 1987, Patzelt 1978, 1980). Anhand von Luftbildern aller österreichischen Gletscher wurden photogrammetrische Gletscherkarten erstellt. Diese Karten enthalten Höhenlinien, Gletschergrenzen und Schneegrenzen in Skalen von 1:10000 und 1:5000 (Kuhn et al. 2009, Lambrecht & Kuhn 2007). Im Jahr 1969 betrug die Gesamteisbedeckung Tirols laut diesem Inventar 393 km<sup>2</sup>.



Abb. 4: Gletschergrenzen des Hintereisferners und des Kesselwandferners aus der dritten Landesaufnahme von 1870 (Abbildung: [www.tiris.at](http://www.tiris.at))

Während einer Periode von den späten 1960er Jahren bis etwa 1985 wurde der allgemeine Rückzugstrend des 20. Jahrhunderts von einem deutlichen Gletschervorstoß in den Alpen unterbrochen (Patzelt 1985). Seitdem schrumpfen die Gletscher ununterbrochen. In den letzten Jahren hat die Geschwindigkeit des Rückzugs zugenommen (Abermann et al. 2009). Die Gewinne an Fläche, Masse und Volumen nach 1969 gingen schnell wieder verloren und die Änderungen waren so stark negativ, dass ein neues Inventar geplant wurde. Die Aufnahme von Luftbildern der ersten Gebiete erfolgte 1996 (z. B. Lechtaler Alpen) und dauerte bis zum Jahr 2002 (z. B. Verwall und Samnaun) an (Lambrecht & Kuhn 2007). Die meisten Gletscher (73 % der Glet-

scher in Österreich und 81 % der österreichischen Gletscherfläche) konnten jedoch 1997 (z.B. Stubai und Ötztaler Alpen) und 1998 befliegen werden.

Eine neue Technik zur halbautomatischen Erstellung von DEMs auf Basis von Luftbildern wurde entwickelt. Details hierzu finden sich in Eder et al. (2000) und Würfländer & Eder (1998). Die so entstandenen hochqualitativen DEMs haben eine mittlere vertikale Genauigkeit von  $\pm 0,7$  m (Abermann et al. 2010) in einem 10 m Raster, das später auf ein 5 m Raster interpoliert wurde.

Die Gletschergrenzen wurden manuell auf Basis von Orthofotos erstellt. Außerdem wurde im Rahmen der Arbeiten zum neuen Inventar das alte von 1969 digitalisiert. Glet-



schergrenzen beider Inventare, sowie zusätzliche Informationen wie Einzugsgebiet, ID-Nummer, Name, Gebiet und Exposition von Akkumulations- und Ablationsgebiet wurden in einem Geoinformationssystem (GIS) zusammengeführt. Verwandte Größen wie Flächen-Höhen-Verteilungen und minimale, maximale sowie mittlere Meereshöhe der Gletscher wurden ebenso erfasst (Lambrecht & Kuhn 2007). Um für einen bestimmten Zeitabschnitt Vergleichbarkeit zu schaffen, präsentieren Lambrecht & Kuhn (2007) eine zeitliche Homogenisierung für 1998 auf Basis eines Gradtagmodells. Auf diese Weise wurde berechnet, wie groß jene Gletscher 1998 waren, die in einem anderen Jahr (d.h. zwischen 1996 und 2002) aufgenommen wurden. Die so berechnete Gesamtfläche von 1998 betrug 325 km<sup>2</sup>. Die Summe aller Eisflächen, die modifiziert wurden, beträgt 1,5 % der Gesamtfläche. Es wird angenommen, dass der eingeführte Fehler in der Größenordnung von 0,1 % liegt (Lambrecht & Kuhn 2007).

### **Gletscherausdehnung und Zusammenhang mit topographischen Eigenschaften**

Im folgenden Abschnitt werden die topographischen Eigenschaften der Tiroler Gletscher von 1998, sowie deren Änderungen zwischen 1969 und 1998 präsentiert. Die Abbildungen 5a-c zeigen wichtige Parameter wie Fläche 1969 und 1998 (Abb. 5a), Anzahl 1998 (Abb. 5b), Maximum, Median und Minimum der Meereshöhe der Gletscher 1998 (Abb. 5c) in Relation zur Exposition der Gletscher. Zwei

Drittel der gesamten Gletscherfläche sind nach NW über N bis NO ausgerichtet (Abb. 5a und b). Ursache dafür ist einerseits, dass auf der geographischen Breite Tirols nördlich ausgerichtete Flächen beschatteter sind und weniger Globalstrahlung erhalten. Andererseits sind die Gletscher auf der Südseite der Silvretta sowie der Ötztaler, Stubai- und Zillertaler Alpen nicht im Österreichischen Inventar erfasst, sondern in den Schweizer (Kääb et al. 2002) und Südtiroler (Knoll et al. 2009) Gletscherinventaren. Da die benachbarten Gletscher bezüglich Exposition sehr ähnlich verteilt sind (d.h. maximale Fläche im nördlichen Sektor, z.B. Knoll et al. 2009), würde sich die Form der Linien in Abb. 5 nicht wesentlich ändern, wenn man die Schweizer und Südtiroler Gletscher mit einbeziehen würde. Die Anzahl der Gletscher pro Expositions-kategorie ist nur für 1998 dargestellt (Abb. 5b), da sich dieser Wert seit dem letzten Inventar kaum verändert hat.

Maximum, Median und Minimum der Meereshöhe sind an jenen Gletschern niedriger, die in ihrer Exposition über eine Nord-Komponente verfügen (Abb. 5c). Aufgrund der topographischen Abschattung und des Einfallwinkels in nördlichen Sektoren ist hier weniger Energie für Schmelzprozesse vorhanden, als auf Flächen gleicher Höhe mit anderer Ausrichtung. Die mittleren Meereshöhen der Gletscher liegen zwischen 2600 m und 2800 m.

Abb. 5d-f zeigen die Beziehung zwischen den von 1969 bis 1998 beobachteten Änderungen und der Exposition der Gletscher.

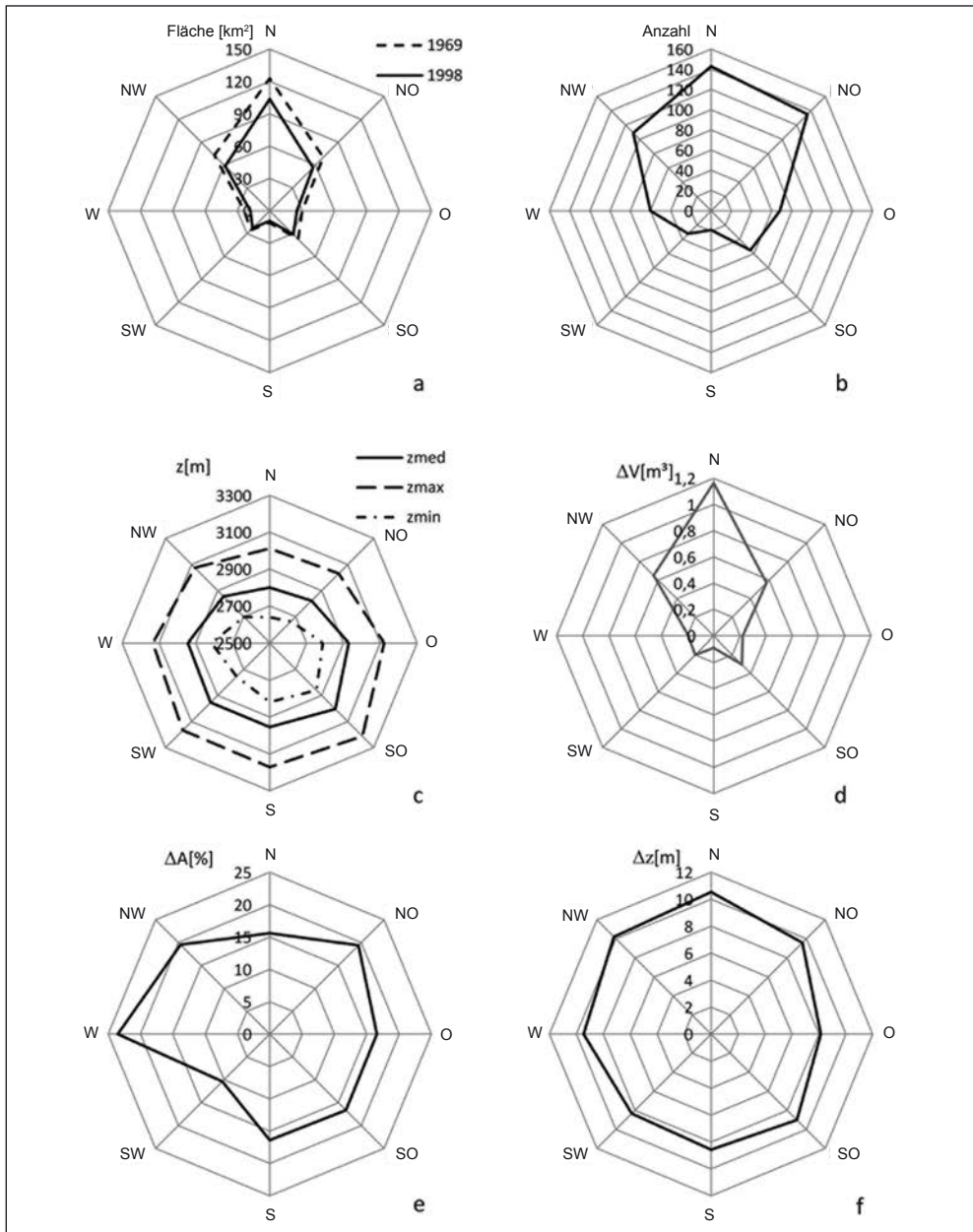


Abb. 5: Charakteristika der Tiroler Gletscher als Funktion der Exposition: a) Gletscherfläche 1969 und 1998, b) Anzahl der Gletscher 1998, c) Mittleres Minimum (zmin), Maximum (zmax) und Median der Höhe (zmed) 1998, d) Volumenverlust ( $\Delta V$ ) zwischen 1969 und 1998, e) relativer Flächenverlust ( $\Delta A$ ) zwischen 1969 und 1998, f) mittlerer Dickenverlust ( $\Delta z$ ) zwischen 1969 und 1998

Die absolute Volumensänderung ist in Abb. 5d dargestellt. Wie erwartet ähnelt die Kurvenform jener der Flächenverteilung und kann, wenn nötig, für absolute Werte verwendet werden. Um Unterschiede in den Volumenänderungen auf „normalisierte“ Weise zu vergleichen, ist die mittlere Änderung der Eisdicke (Abb. 5f) besser geeignet. Dieser Wert ergibt sich, wenn man die gesamte Volumenänderung zwischen zwei Zeitpunkten durch das arithmetische Mittel der Gletscherflächen zu diesen Zeitpunkten dividiert. Durchschnittlich kam es zwischen 1969 und 1998 zur Verringerung der mittleren Eismächtigkeiten von 8-10 m. Die geringsten Verluste verzeichnen dabei die Gletscher mit östlicher Ausrichtung (8 m).

Mit über 20 % Verlust waren die relativen Flächenänderungen auf westlich exponierten Gletschern am größten (Abb. 5e). Das ist auf sehr kleine, dünne Gletscher zurückzuführen, die schnell große Teile ihrer Fläche verloren haben. Absolut ist dies jedoch nicht signifikant (Abb. 5a). Am geringsten waren die Verluste mit nur -10 % auf Gletschern mit südwestlicher Exposition. Nördlich exponierte Gletscher weisen Verluste zwischen 15 % und 20 % auf und sind damit repräsentativ für die allgemein beobachteten Flächenänderungen. Den größten Anteil der Tiroler Gletscherfläche (134 km<sup>2</sup> im Jahr 1998, Abb. 6) bilden Gletscher mit einer Fläche von einem bis 5 km<sup>2</sup>. Nur neun Gletscher sind größer als 5 km<sup>2</sup>, dennoch machen sie über ein Viertel

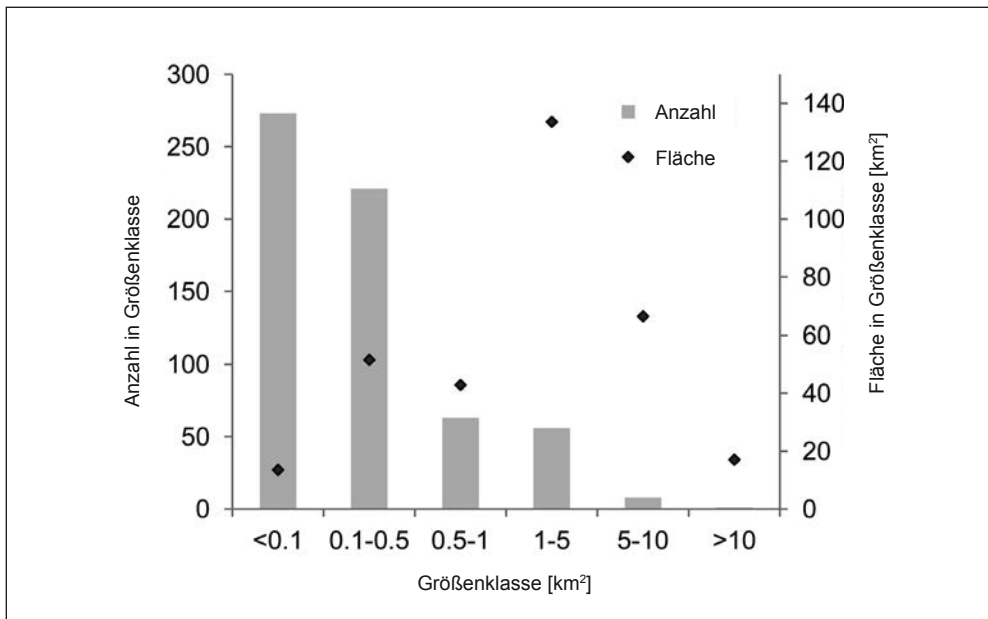


Abb. 6: Anzahl der Gletscher in den Größenklassen (linke Achse); Gletscherfläche 1998 als Funktion der Größenklasse (rechte Achse)

der Gesamtfläche aus. Die meisten Gletscher fallen jedoch in die kleinste Größenklasse; 273 Gletscher sind kleiner als 0,1 km<sup>2</sup>. Diese kleinen Gletscher bilden dennoch einen signifikanten Anteil der Gesamtgletscherfläche, was für das im Folgenden besprochene, aktuellste Gletscherinventar von Bedeutung ist (Abermann et al. 2009).

Abb. 7 zeigt die Abhängigkeit des mittleren Minimums, Maximums und Medians der Meereshöhe der Gletscher von der Größenklasse der Gletscher. Die Streuung der Werte nimmt mit der Größe ab, wie in Abermann et al. (2011b) exemplarisch gezeigt wird. Die großen Gletscher befinden sich in Gebieten mit hohen Bergen, daher sind die maximalen Höhen groß. Die Akkumulationsgebiete dort können eine große Ausdehnung erreichen und die resultierende Dynamik sorgt für ge-

ringe Minimalhöhen. Die Gletscher zwischen 5 und 10 km<sup>2</sup> Größe haben die höchsten Medianwerte (durchschnittlich knapp über 3000 m). Zur größten Klasse (>10 km<sup>2</sup>) gehört nur ein Gletscher in Tirol, der 17 km<sup>2</sup> große Gepatschferner in den Ötztaler Alpen. Analog zu den besprochenen Betrachtungen bezüglich der Exposition zeigt Abb. 8 die Abhängigkeit der Gletscheränderungen zwischen 1969 und 1998 von der Größe der Gletscher. Die kleinste Klasse zeigt mit insgesamt -51 % die größten relativen Flächenänderungen. Gletscher größer als 5 km<sup>2</sup> hingegen verloren nur zwischen 4 bis 11 % ihrer Fläche. Für mittlere Dickenänderungen gilt der Umkehrschluss: Große Gletscher haben mit bis zu -12 m wesentlich mehr verloren, als Gletscher, die weniger als 1 km<sup>2</sup> groß sind (-8 m). Die Erklärung hierfür liegt in der

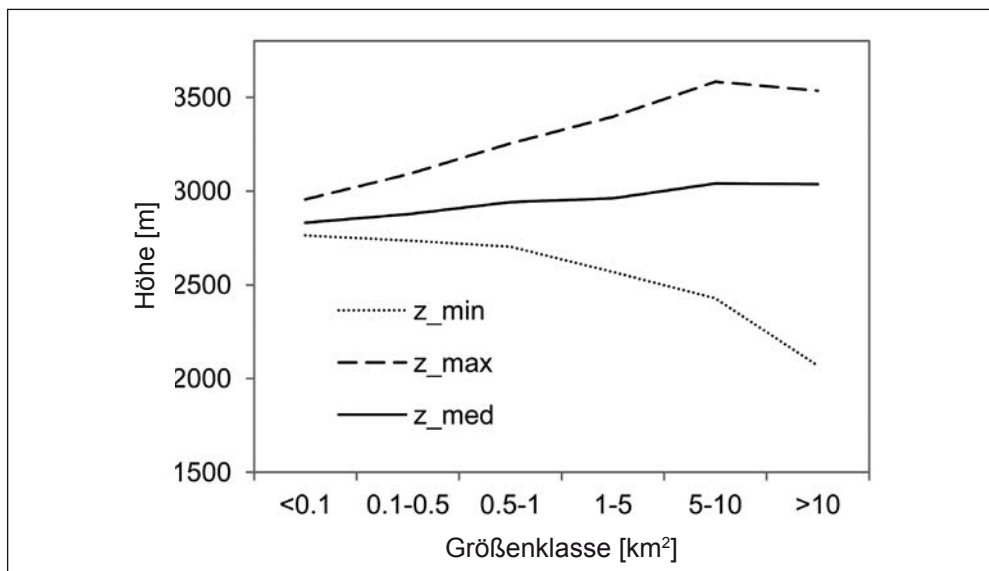


Abb. 7: Mittleres Minimum (zmin), Maximum (zmax) und Median (zmed) der Meereshöhe der Gletscher 1998 als Funktion der Größenklasse

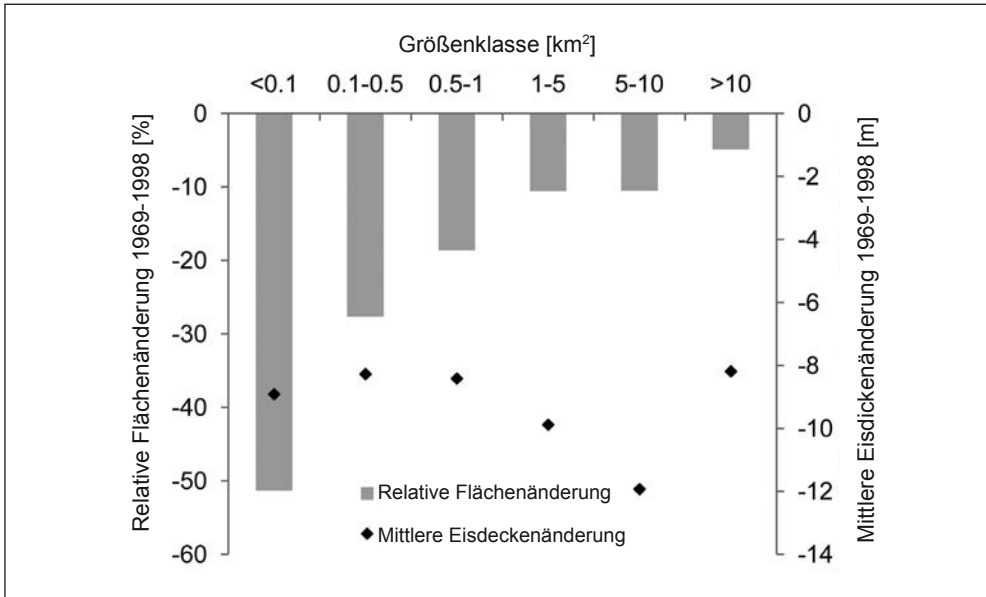


Abb. 8: Relative Flächenänderung zwischen 1969 und 1998, bezogen auf die Fläche von 1969 und die mittlere Eisdickenänderung

Geometrie der Gletscher: Der gleiche mittlere Dickenverlust bedeutet für kleine Gletscher einen größeren relativen Flächenverlust, da ihre Zungen im Allgemeinen dünner sind. Details hierzu finden sich in Abermann et al. (2011a). Der Gepatschferner, der größte Gletscher Tirols, hat im Schnitt nur 8 m seiner Mächtigkeit verloren. Dies ist auf den hohen Anteil der Akkumulations- an der Gesamtfläche zurückzuführen, wodurch die unteren Teile über eine starke Dynamik mit Eis versorgt werden.

## 5. Jüngste Gletscheränderungen

Während der letzten 15 Jahre war ein sehr starker Gletscherrückzug zu beobachten. Eine Reihe von Jahren mit negativen Massenbilanzen und die entsprechend großen Flächen- und Volumenänderungen machten die Erstellung eines neuen Gletscherinventars notwendig. DEMs aus Airborne Laser Scanning (ALS, flugzeuggestütztes Laserscanning)-Daten wurden verwendet, um die Gletscherausdehnung im Jahr 2006 in den Ötztaler Alpen (Abermann et al. 2009), den Stubai Alpen (Seiser 2010) und in West-Tirol (Goller 2010) zu bestimmen. Abb. 9a zeigt als Beispiel die Flächenänderungen, analysiert aus den drei Gletscherinventaren, für den Wasserfall- und

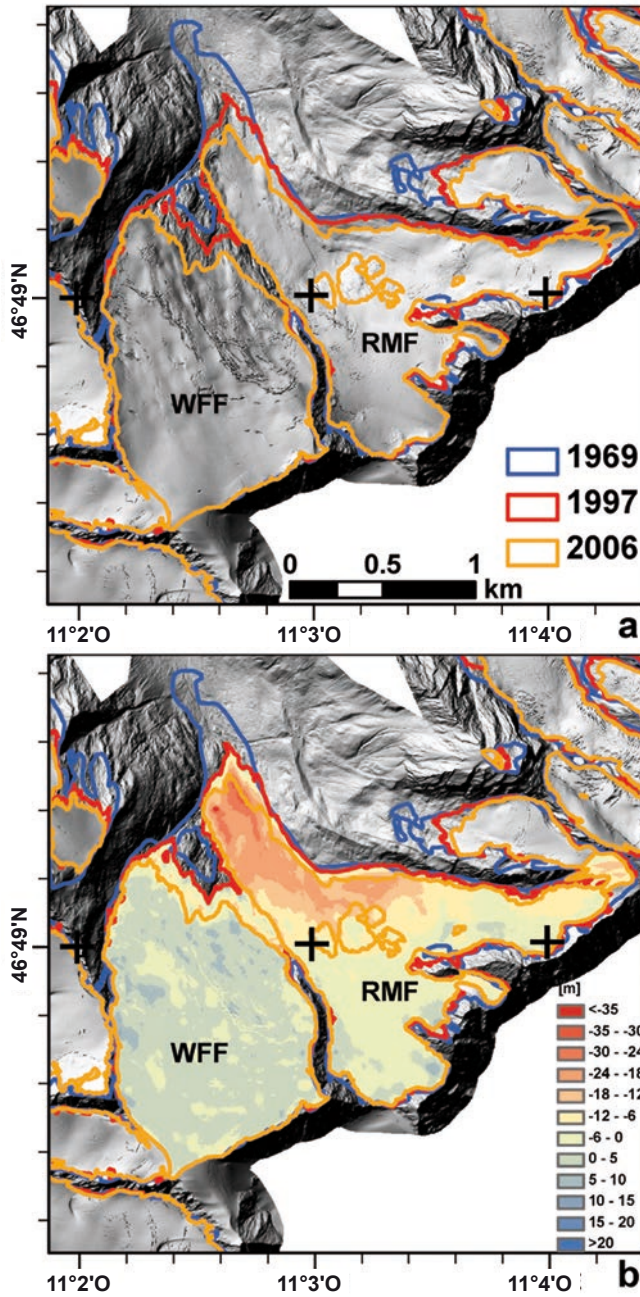


Abb. 9: a) ALS-DEM des Wasserfall- (WFF) und Rotmoosferners (RMF) und die jeweiligen Gletscher-  
grenzen von 1969, 1997 und 2006; b) Eisdickenänderungen zwischen 1997 und 2006 (aus: Abermann  
et al. 2009)

Rotmoosferner im inneren Ötztal. Letzterer wurde als Beispiel ausgewählt, da hier zahlreiche ökologische Gletschervorfeld-Studien unternommen wurden (z.B. Raffl et al. 2006, Koch & Erschbamer 2010). Zu beachten sind die in den letzten Jahren freigelegten Felsen am Rotmoosferner (RMF) und der geringe Dickenzuwachs am Wasserfallferner (WFF), der möglicherweise auf Veränderungen in der Dynamik, im Zuge des Aufspaltens des zusammenhängenden Gletschersystems RMF und WFF in zwei separate Gletscher, zurückzuführen ist.

Abermann et al. (2009) haben anhand der drei verfügbaren Inventare die Raten der Flächen- und Volumenänderungen verschiedener Zeitabschnitte verglichen. Es zeigt sich, dass Änderungsraten im Allgemeinen zwischen 1998 und 2006 stark zugenommen haben (verglichen mit den Jahren 1969 bis 1998). Dies ist im Wesentlichen durch die im Alpenraum besonders starke Zunahme der Oberflächentemperatur bedingt. Auch die Sonnenscheindauer hat in hohen Lagen signifikant zugenommen, wodurch sich die

kurzwellige Einstrahlung in diesen Gebieten erhöht (Auer et al. 2007). Die Raten der Volumenänderung nahmen wesentlich mehr zu als die Raten der Flächenänderung. Dies wird auf die geometrischen Eigenschaften der Gletscher zurückgeführt.

Die beiden am stärksten vergletscherten Regionen in Tirol sind die Ötztaler (Abermann et al. 2009) und Stubaier Alpen (Seiser 2010). Zusammen machen sie etwa 51% der Tiroler Gletscherfläche aus. Im Vergleich dieser beiden Regionen zeigte sich ein interessanter Gradient. Während zwischen 1969 und 1998 die Dickenverluste beider Regionen etwa gleich waren (-8,2 m in den Stubaier Alpen und -8,3 m in den Ötztaler Alpen), waren in der Periode von 1998 bis 2006 die Verluste in den Ötztaler Alpen um 2 m größer, als jene in den Stubaier Alpen. Abermann et al. (2010) zeigen einen möglichen Zusammenhang mit positiven Anomalien des Winterniederschlags, die in den Stubaier Alpen größer waren, als in den Ötztaler Alpen. Die Temperatur entwickelte sich in beiden Regionen ähnlich. Kuhn et al. (2009) zeigten, dass die

Tab. 1: Tiroler Gletscher im österreichischen Vergleich: Anzahl, Flächen-, Volumen- und Eisdickenänderungen

	Tirol	Österreich
Gletscheranzahl	622	896
Fläche 1969 [km <sup>2</sup> ]	393,3	567,1
Fläche 1998 [km <sup>2</sup> ]	325,1	469,7
Relative Flächenänderung [%]	-17,3	-17,2
Volumensänderung [km <sup>3</sup> ]	-3,4	-4,9
Durchschnittliche Eisdickenänderung [m]	-9,4	-9,5

mittleren Höhen und die Höhen der Gleichgewichtslinie der Gletscher in den Stubai-er Alpen geringer sind, als jene der Ötztaler Gletscher.

Die qualitativen Ergebnisse zu Untersuchungen der Gletscheränderungen in Tirol passen gut zu Studien aus anderen vergletscherten Teilen der Alpen. Aus Tab. 1 wird deutlich, dass die Änderungen in Tirol jenen in ganz Österreich sehr ähnlich und damit für Österreich repräsentativ sind.

## Literatur

---

- Abermann, J., Lambrecht, A., Fischer, A. & Kuhn, M. (2009) Quantifying changes and trends in glacier area and volume in the Austrian Ötztal Alps (1969-1997-2006). *The Cryosphere* 3 (2): 205-215.
- Abermann, J., Seiser, B. & Fischer, A. (2010) Towards a third Austrian glacier inventory: First results and a climatic interpretation. *Geophysical Research Abstracts* 12, EGU2010-12379, EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria.
- Abermann, J., Kuhn, M. & Fischer, A. (2011a) Climatic controls of glacier distribution and glacier changes in Austria. *Annals of Glaciology* 52 (59): 83-90.
- Abermann, J., Kuhn, M. & Fischer, A. (2011b) A reconstruction of annual mass balances of Austria's glaciers from 1969 to 1998. *Annals of Glaciology* 52 (59): 127-134.
- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R. & Schöner, W. (2007) HISTALP - historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology* 27 (1): 17-46.
- Bonani, G., Ivy, S., Hajdas, I., Niklaus, T.R., Suter, M. et al. (1994) AMS 14C age determinations of tissue, bone and grass samples from the Ötztal Ice Man. *Radio-carbon* 36: 247-250.
- Eder, K., Würländer, R. & Rentsch, H., (2000) Digital photogrammetry for the new glacier inventory of Austria. *IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33: 1 - 15.
- Efthymiadis, D., Jones, P.D., Briffa, K.R., Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., Frei, C. & Schmidli J. (2006) Construction of a 10-min-gridded precipitation data set for the Greater Alpine Region for 1800–2003. *Journal of Geophysical Research* 111 (D01105): 1-22.
- Fischer, A. & Markl, G. (2008) Mass balance measurements on Hintereisferner, Kesselwandferner, and Jamtalferner 2003 to 2006. Database and results. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 42 (1): 47-83.
- Fischer, A., Olefs, M. & Abermann, J. (2010) Glaciers, snow and ski tourism in Austria's changing climate. *Annals of Glaciology* 52 (58): 89-96.
- Fliri, F. (1975) *Das Klima der Alpen im Raume von Tirol*. Universitätsverlag Wagner, Innsbruck-München, 442 S.



- Fountain, A.G., Hoffman, M.J., Granshaw, F. & Riedel, J. (2009) The 'benchmark glacier' concept does it work? Lessons from the North Cascade Range, USA. *Annals of Glaciology* 50: 163-168.
- Goller, M. (2010) Gletscherinventar von Vorarlberg und Westtirol von 2006. Bachelorarbeit, Universität Innsbruck.
- Gross, G. (1987) Der Flächenverlust der Gletscher in Österreich 1850–1920–1969. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 23 (2): 131-141.
- Hoinkes, H. (1970) Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. Ergebnisse der Meßreihe Hintereisferner (Ötztaler Alpen) 1953-1968. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 6: 37-90.
- Käab, A., Paul, F., Maisch, M. & Häberli, W. (2002) The new remote-sensing-derived Swiss Glacier Inventory: II. First results. *Annals of Glaciology* 34: 362-366.
- Kaufmann, R., Fuchs, M. & Gosterxeier, N. (2002) The soil fauna of an alpine glacier foreland: colonization and succession. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 34 (3): 242-250.
- Koch, E.-M. & Erschbamer, B. (2010) Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl. *Alpine Forschungsstelle Obergurgl 1*, Innsbruck University Press, Innsbruck.
- Kuhn, M., Schlosser, E. & Span, N. (1997) Eastern alpine glacier activity and climatic records since 1860. *Annals of Glaciology* 24: 54-59.
- Kuhn, M. (2003) Redistribution of snow and glacier mass balance from a hydrometeorological model. *Journal of Hydrology* 282: 95-103.
- Kuhn, M., Abermann, J., Bacher, M. & Olefs, M. (2009) The transfer of mass-balance profiles to unmeasured glaciers. *Annals of Glaciology* 50 (6): 185-190.
- Kuhn, M., Lambrecht, A., Abermann, J., Patzelt, G. & Gross, G. (2008) Die österreichischen Gletscher 1998 und 1969, Flächen und Volumenänderungen. Vienna, Austrian Academy of Sciences Press.
- Knoll, C. & Kerschner, H. (2009) A glacier inventory for South Tyrol, Italy, based on airborne laser-scanner data. *Annals of Glaciology* 50 (53): 46-52.
- Lambrecht, A. & Kuhn, M. (2007) Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory. *Annals of Glaciology* 46: 177-184.
- Lambrecht, A. & Mayer, C. (2009) Temporal variability of the non-steady contribution from glaciers to water discharge in western Austria. *Journal of Hydrology* 376 (3-4): 353-361.
- Leonhard, G., Olefs, M., Neubarth, J., Thieken, A., Schönlaub, H., Schöberl, F. & Kuhn, M. (2009) Auswirkungen einer möglichen Klimaänderung auf ein alpines Speicherkraftwerk. *Dresdener Wasserbauliche Mitteilungen* 39: 475-485.
- Nicolussi, K. (1993) Bilddokumente zur Geschichte des Vernagtferners im 17. Jahrhundert. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 26 (2): 97-119.

- Nicolussi, K., Kaufmann, M., Patzelt, G., van der Plicht, J. & Thurner, A. (2005) Holocene tree-line variability in the Kauner Valley, Central Eastern Alps, indicated by dendrochronological analysis of living trees and subfossil logs. *Vegetation History and Archaeobotany* 14 (3): 221-234.
- Olefs, M. & Fischer, A. (2008) Comparative study of technical measures to reduce snow and ice ablation in Alpine glacier ski resorts. *Cold Regions Science and Technology* 52 (3): 371-384.
- Patzelt, G. (1978) Der Österreichische Gletscherkataster. *Almanach '78 der Österreichischen Forschung*, Vienna: 129-133.
- Patzelt, G. (1980) The Austrian glacier inventory: status and first results. *IAHS Publ.* 126: 181-183.
- Patzelt, G. (1985) The period of glacier advances in the Alps, 1965 to 1980. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 21: 403-407.
- Paul, F., Kääb, A. & Haeberli, W. (2007) Recent glacier changes in the Alps observed by satellite: Consequences for future monitoring strategies. *Global and Planetary Change* 56: 111-122.
- Raffl, C., Mallaun, M., Mayer, R. & Erschbamer, B. (2006) Vegetation succession pattern and diversity changes in a glacier valley, Central Alps, Austria. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 38 (3): 421-428.
- Rentsch, H., Eder, K. & Geiss, T. (2004) Der Gletscherrückgang in den Ostalpen in der letzten Dekade des 20. Jahrhunderts. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 39: 65-74.
- Richter, E. (1888) *Die Gletscher der Ostalpen*. Stuttgart, Engelhorn.
- Schöner, W. & Böhm, R. (2007) A statistical mass-balance model for reconstruction of LIA ice mass for glaciers in the European Alps. *Annals of Glaciology* 46: 161-169.
- Seiser, B. (2010) *Gletscherinventar 2006 der Stubaier Alpen*. Masterarbeit, Universität Innsbruck.
- Uppala, S. M., Källberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Da Costa, B., Fiorino, M., Gibson, L. K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A. et al. (2005) The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 131 (612): 2961-3012.
- Walcher, J. (1773) *Nachrichten von den Eisbergen in Tyrol*. Frankfurt and Leipzig, Kurzböcken.
- Würländer, R. & Eder, K. (1998) Leistungsfähigkeit aktueller photogrammetrischer Auswertemethoden zum Aufbau eines digitalen Gletscherkatasters. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 35: 167-185.
- Zemp, M., Paul, F., Hoelzle, M. & Haeberli, W. (2007) Glacier fluctuations in the European Alps 1850–2000: an overview and spatio-temporal analysis of available data. In: *The darkening peaks: Glacial retreat in scientific and social context*, Orlove B., Wiegandt E. & Luckmann B. (Hg.) Berkeley, CA, University of California Press, S. 11-167.

## Verzeichnis der AutorInnen

---

Jakob Abermann  
Österreichische Akademie der Wissenschaften  
Kommission für Geophysikalische  
Forschungen  
Dr. Ignaz-Seipel Platz 2, 1010 Wien

Institut für Meteorologie und Geophysik  
Universität Innsbruck  
Innrain 52, 6020 Innsbruck  
Jakob.Abermann@uibk.ac.at

Michael Kuhn  
Institut für Meteorologie und Geophysik  
Universität Innsbruck  
Innrain 52, 6020 Innsbruck  
Michael.Kuhn@uibk.ac.at

Astrid Lambrecht  
Institut für Meteorologie und Geophysik  
Universität Innsbruck  
Innrain 52, 6020 Innsbruck

jetzt:  
Kommission für Erdmessung und Glaziologie  
Bayerische Akademie der Wissenschaften  
Alfons-Goppel-Straße 11, 80539 München  
Astrid.Lambrecht@keg.badw.de

Lea Hartl  
Alpine Forschungsstelle Obergurgl  
Universität Innsbruck  
Gaisbergweg 3, 6456 Obergurgl  
Lea.Hartl@student.uibk.ac.at