

Kapitel 2 | Langzeitmonitoring von Gletschermassenbilanzen und -längenänderungen in Tirol

Andrea Fischer, Lea Hartl

Zusammenfassung

3 % der Landesfläche Tirols ist vergletschert. Seit dem Hochstand zum Ende der kleinen Eiszeit um 1850 verloren die Gletscher 50 % ihrer Fläche und hinterließen neue Flächen für die Besiedelung durch Lebewesen. Diese Änderungen der Gletscherfläche gehen mit klimatischen Änderungen und Änderungen der lokalen Hydrologie einher, die ihrerseits auch die mikroklimatischen Bedingungen für die Lebewesen beeinflussen.

Die Daten zur Änderung der Gletscher werden im Rahmen von 54 Längenmonitoringprojekten und fünf Langzeitreihen der Gletschermassenbilanz erhoben. Die Temperatur während der Ablationsperiode (Mai bis September) ist zwischen 1901 und 2008 um 1,6 °C gestiegen. Die Akkumulation in den Wintermonaten (Oktober bis April) zeigt in diesem Zeitraum keine signifikanten Trends. Wann und wie stark die einzelnen Gletscher auf klimatische Änderungen reagieren, hängt von ihren topographischen Eigenschaften ab. Die Längenmessungen spiegeln einen Gletscherrückzug wider, unterbrochen von Wachstumsperioden in den 1920er und 1980er Jahren. Die Massenbilanzmessungen

zeigen zunehmende Massenverluste während der letzten Jahrzehnte.

Abstract

3 % of the area of Tyrolean territory is covered by glaciers. After the end of the Little Ice Age about 1850, these glaciers retreated by about 50 % of their initial area providing open ground for succession of biota. The changes of glacier area take place simultaneously with changes in climate and local hydrology.

The annual glacier changes are recorded by 54 length monitoring and five long term mass balance programs. Between 1901 and 2008, the temperature during the ablation season (May to September) increased by 1.6 °C. In the same period, winter (October to April) accumulation showed no significant trends. The reaction of glaciers to the climate signal differs in timing and magnitude in relation to their topographic properties. The measurement of length changes show a general glacier retreat, but also advances in the 1920s and 1980s. The mass balance measurements show an increase in mass loss in the last decades.

1. Einleitung

Aufgrund des Klimawandels ziehen sich die Gletscher weltweit zurück (Lemke et al. 2007). Gletscherinventare und Moränen des letzten Gletschermaximums während der kleinen Eiszeit (LIA, Little Ice Age) um 1850 zeigen, dass die österreichischen Gletscher seit damals 50 % ihrer Fläche verloren haben (Gross 1987, Patzelt 1980, Lambrecht & Kuhn 2007, Abermann et al. 2009). Der Rückzug der Gletscher gibt Flächen für die Besiedlung durch Lebewesen frei und verändert die lokale Hydrologie und das Mikroklima. Vor allem in Tirol ist die Sukzession von Pflanzen im Bereich schwindender Gletscher seit Jahrzehnten gut dokumentiert (z.B. Klebelsberg 1913, Friedel 1939, Gams 1939, Janetschek 1949, Kaufmann 2001, Erschbamer et al. 2008).

Seit Jahrhunderten werden die Tiroler Gletscher beobachtet und untersucht. Besonders das innere Ötztal kann als Wiege der ostalpinen Gletscherforschung bezeichnet werden. Die erste skizzierte Karte des Vernagtferners entstand 1601 (Simony 1863, Richter 1892, Nicolussi 1990) und auch aus dem 19. Jahrhundert sind zahlreiche Gletscherbeschreibungen erhalten (Schlagintweit 1850, Sonklar 1857, 1860, 1877). Die Eisseen des Gurgler- und Vernagtferners in den Ötztaler Alpen überfluteten mehrfach bewohntes Gebiet und ihr Zustand wurde schon früh regelmäßig dokumentiert (Meixner & Siegl 2010).

Mit der Erstellung detaillierter Karten und Geschwindigkeitsmessungen an einzelnen

Gletschern begann Ende des 19. Jahrhunderts die Zeit systematischer glaziologischer Untersuchungen. Eisgeschwindigkeiten wurden am Hintereis- und Hochjochferner (Ötztaler Alpen) gemessen und Hintereis- (1894), Hochjoch- (Gruber 1913), Gepatsch- (1886/87), Vernagt- (1888) und Jamtalferner (publiziert 1909), sowie die Zunge des Alpeiner Ferners (1892) wurden kartiert. In Kombination mit den geomorphologischen Daten der LIA Moränen und jener von 1920 und 1980, sowie den Gletscherinventaren von 1969, 1998 und 2006, geben diese Karten Aufschluss über Änderungen der Gletscherflächen und -volumina. Einige Monitoringprojekte dokumentieren die jährlichen Gletscheränderungen in Tirol. Seit 1891 werden die Längenänderungen von etwa 10 % der Gletscher systematisch durch den Österreichischen Alpenverein dokumentiert. Die ersten Massenbilanzmessungen wurden 1894/95 am Hintereisferner durchgeführt (Hess 1904). Über 50 Jahre später begannen 1952/53 jährliche Bilanzmessungen am Hintereis- und Kesselwandferner in den Ötztaler Alpen. So entstand die weltweit längste Massenbilanzzeitreihe. Aktuell werden im Rahmen von Langzeitmonitoringprojekten am Hintereis-, Kesselwand-, Vernagt- und Jamtalferner, sowie am Mullwitzkees jährlich Massenbilanzmessungen durchgeführt. Die Reihen an Hintereis-, Kesselwand- und Jamtalferner sind Teil der LTER (Long-term Ecological Research) Plattform Tyrolean Alps.

Verschiedene Publikationen beschäftigen sich mit dem Zusammenhang zwischen Gletscher-massenbilanzen und dem Wachstum von

Bäumen (Nicolussi 1994, Nicolussi & Patzelt, 1996, 2001, Nicolussi et al. 2005). Dementsprechend können Modellierungen früherer Massenbilanzen und Gletschergößen Hinweise auf das vorherrschende Klima geben und wiederum mit dendochronologischen Proxydaten verglichen werden. Da Langzeitmessungen atmosphärischer Parameter fast ausschließlich an Wetterstationen in Tallagen stattfanden, können glaziologische Daten wichtige Informationen über das historische Klima in hochalpinen Regionen liefern, wobei hier besonders Sommertemperaturen, Niederschlag und Schneebedeckung hervorzuheben sind (z.B. Kerschner & Ivy-Ochs 2007). Dieser Artikel fasst die glaziologischen Zeitreihen Tirols zusammen und vergleicht sie mit Klimadaten. Messungen und Methoden wer-

den im Hinblick auf zukünftige ökologische Anwendungsbereiche beschrieben.

2. Material und Methoden

Untersuchungsgebiet

Etwa 33,5 km² der Tiroler Alpen sind von Gletschern bedeckt. Das entspricht ca. 3 % der Fläche Tirols. Jährliche Längenänderungen werden an 54 Tiroler Gletschern gemessen und fünf Gletscher sind Teil von Massenbilanz-Monitoringprojekten (Abb. 1).

Alle 5 Massenbilanzgletscher befinden sich nahe am Alpenhauptkamm. Der Vernagt-

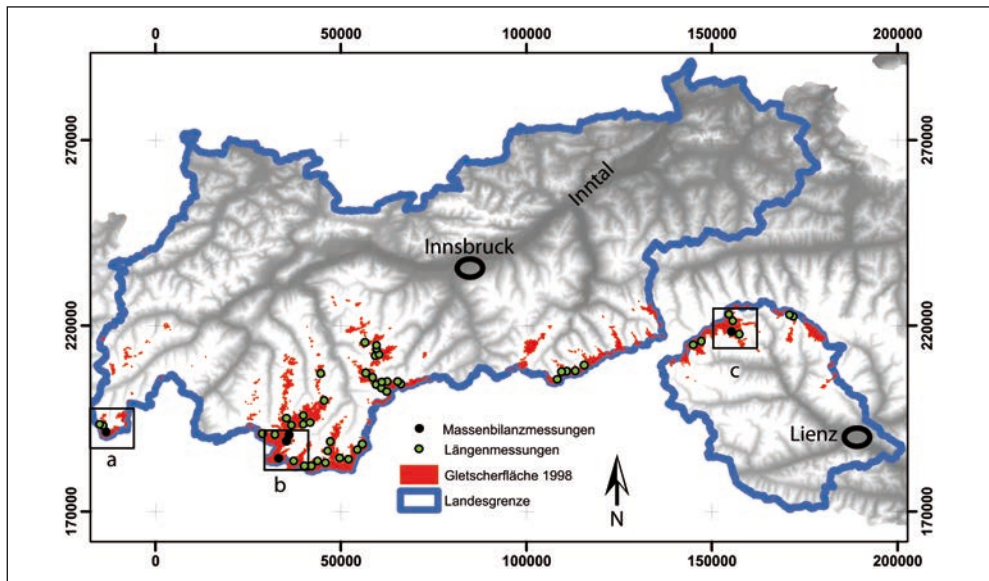


Abb. 1: Gletscher (rot) bedecken 3 % der Fläche Tirols (blau). An 54 Gletschern (grün) wird jährlich die Länge gemessen, an fünf Gletschern (schwarz) wird auch die Massenbilanz erhoben. Die Daten sind in Gauss-Krüger Projektion auf dem Höhenmodell von Jarvis et al. (2006) dargestellt

ferner, der Hintereisferner und der benachbarte Kesselwandferner liegen in den Ötztaler Alpen, der Jamtalferner liegt etwa 50 km westlich davon in der Silvretta und das Mullwitzkees befindet sich 140 km östlich in der Venediger Gruppe.

Der Hintereisferner ist ein typischer Talgletscher mit einer Fläche von etwa 7,8 km² (2450-3700 m). Der Vernagterferner (8,8 km², 2770-3630 m) hat eine ähnliche Fläche, unterscheidet sich aber in seiner Topographie: Der Gletscher ist nach Osten ausgerichtet und die Zunge wird aus drei großen Becken gespeist. Der Kesselwandferner (3,9 km², 2700-3500 m) befindet sich zwischen Vernagter- und Hintereisferner. Der Hauptteil des Gletschers liegt auf einem relativ flachen Plateau über 3000 m. Das Plateau war über eine schnell abschmelzende Spaltenzone mit einer kleinen Zunge verbunden. 2012 hat die Zunge die Verbindung zum Hauptgletscher verloren. Die drei Ötztaler Gletscher erhalten weniger Jahresniederschlag als der Jamtalferner (3,5 km², 2400-3200 m), ein Talgletscher, dessen Zunge sich aus drei Firnbecken speist. Das Mullwitzkees (3,2 km², 2690-3400 m) in der Venedigergruppe ist südexponiert. Die Zunge des Mullwitzkees bildet das so genannte Zettalunitzkees.

Der Hintereis-, Kesselwand- und Vernagterferner werden seit über einem Jahrhundert glaziologisch untersucht (z.B. Finsterwalder 1897, Blümcke & Hess 1899, Hess 1904, Srbik 1936, 1941a, Hoinkes 1970, Lang & Patzelt 1971, Schlosser 1997, Span et al. 1997, Kuhn et al. 1999, Fischer & Markl 2009, Fischer 2010).

Massenbilanzmessungen

Die Massenbilanz eines Gletschers ist die Zunahme oder der Verlust von im Gletscher über eine bestimmte Zeit gespeichertem Wasser. In mittleren Breiten wird die Bilanz meist über das hydrologische Jahr hinweg gemessen, also vom 1. Oktober bis zum 30. September des Folgejahres.

Während Längen- und Flächenänderungen von Gletschern durch eine Reihe von Faktoren, wie Klima, Eisdicke, Massenbilanz und Fließgeschwindigkeit beeinflusst werden, hängt die jährliche Änderung der Massenbilanz hauptsächlich von Klimaänderungen ab. Die direkte glaziologische Methode (Hoinkes 1970) ist die am häufigsten verwendete Methode um die Massenbilanz zu messen. Am Ende des hydrologischen Jahres wird die Ablation

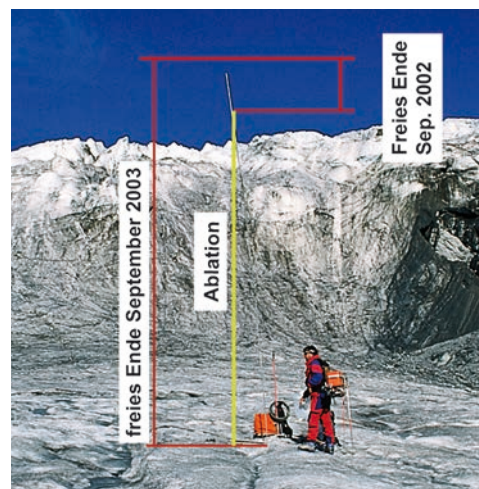


Abb. 2: Die direkte oder glaziologische Methode der Massenbilanzmessung beruht auf der Messung der Ablation an Pegeln und der Akkumulation an Schneeschächten, die über den Gletscher verteilt sind (Foto: Andrea Fischer)

tion durch Ablesen im Voraus gebohrter Ablationspegel festgestellt (Abb. 2). Die Anzahl der Pegel wird für jeden Gletscher je nach Variabilität der Oberflächenbilanz gewählt (Fountain & Vecchia 1999, Pelto 2000). Um die Akkumulation von Schnee und den Wassergehalt des Schnees zu messen, werden im Akkumulationsgebiet mehrere Schächte gegraben und die Schneedecke untersucht.

Die gemessenen Massenbilanzdaten werden anschließend über den gesamten Gletscher interpoliert. In die Interpolation fließen zusätz-

liche Informationen aus Karten der Schneedeckung, aus Webcam-Bildern und Beobachtungen zu Akkumulation durch Lawinen ein (Fischer & Markl 2009).

Die Gletscheroberfläche wird aus topographischen Karten bestimmt und für Hintereis-, Kesselwand-, Jamtalferner und Mullwitzkees werden jährliche Flächenänderungen gemessen. Die Gesamtmassenbilanz B für einen Gletscher wird in Bezug auf die Gletscherfläche in m^3 oder kg berechnet. Um verschiedene Gletscher besser vergleichen zu können,

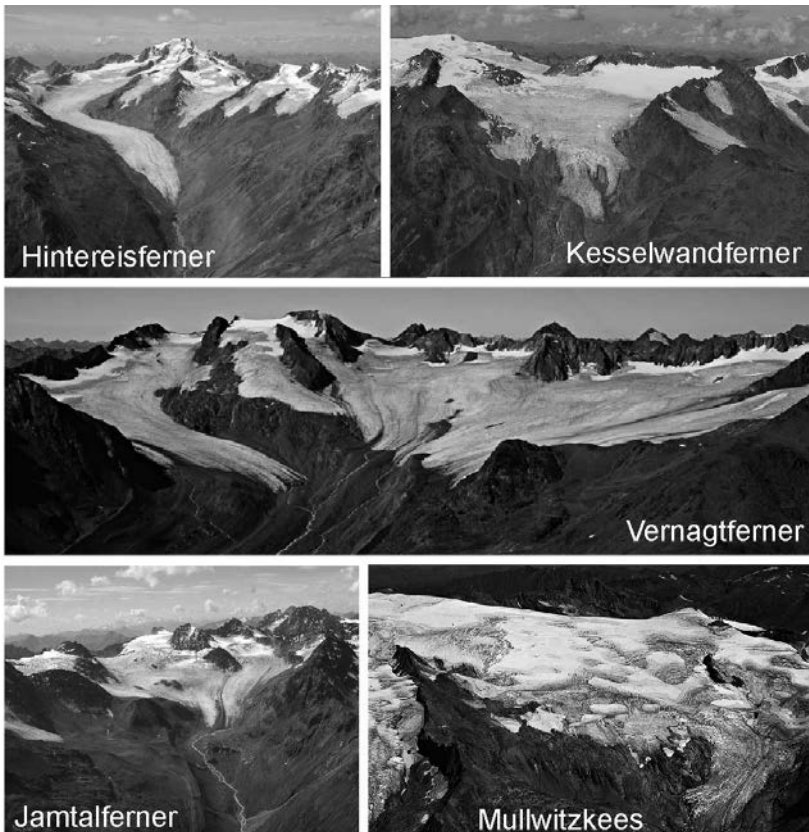


Abb. 3: An fünf Tiroler Gletschern werden Massenbilanzen erhoben. Hintereis-, Kesselwand- und Jamtalferner sind dabei Teil der LTER-Plattform Tyrolean High Alps (Fotos: Andrea Fischer)

wird die spezifische Massenbilanz b berechnet, als Massenbilanz B geteilt durch Gletscherfläche A :

$$b=B/A$$

Die spezifische Massenbilanz wird in kg/m^2 (Wassermasse pro Einheitsfläche) oder mm Wasseräquivalent (mm w.e.) angegeben. Letztere Einheit ist besonders für hydrologische Anwendungen nützlich, da die Bilanzwerte direkt mit dem Niederschlag verglichen werden können, der auch in mm oder Liter/m^2 angegeben wird.

Abb. 3 zeigt die fünf Tiroler Gletscher mit Langzeitmessreihen der Massenbilanz. Auf jedem dieser Gletscher sind zwischen 15 und

50 Ablationspegel installiert und jedes Jahr werden 5-10 Schächte gegraben (Reinwarth & Escher-Vetter 1999, Fischer & Markl 2009). In Abb. 4 ist das Netzwerk aus Pegeln und Schächten am Hintereisferner zu sehen, sowie die Gletschergrenzen zwischen 1953 und 2003. Der Umriss des LIA Maximums ist zu Vergleichszwecken auch gezeigt.

Die meisten Gletscher werden am oder um den 1. Mai untersucht, um die Winterakkumulation festzustellen. Dabei wird auch die Schneehöhe in bestimmten Höhenlagen gemessen.

Wie bei allen Langzeitmessungen haben sich Messinstrumente und -methoden seit Beginn der Messungen verändert. Die Massenbilanz-

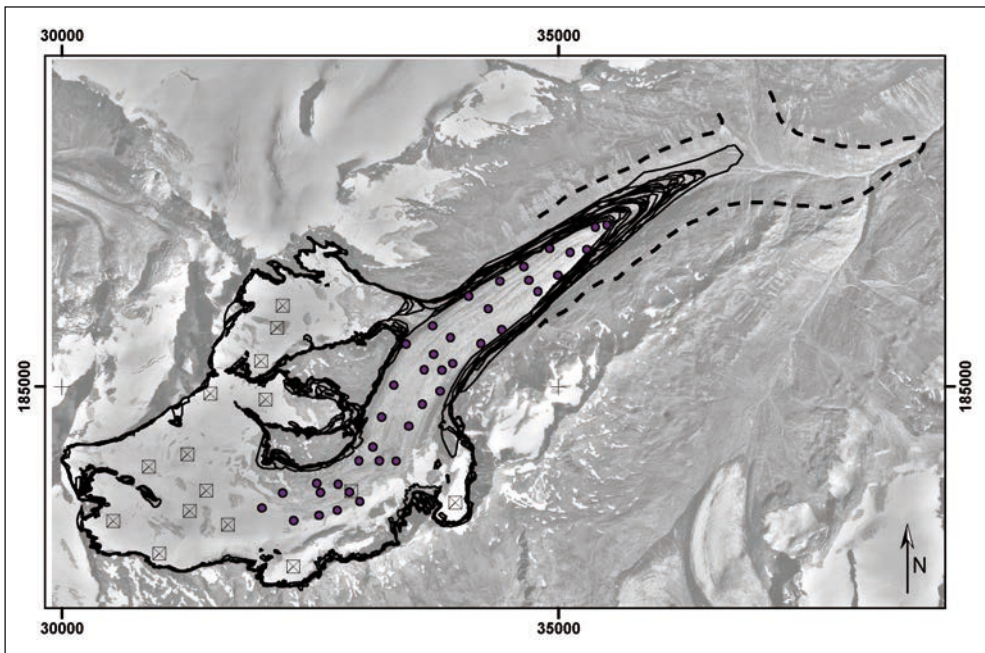


Abb. 4: Karte des Hintereisferners mit Lage der Schneeschächte (Quadrate) und Ablationspegel (Punkte) sowie den Gletschergrenzen des LIA (strichlierte Linie) und den Gletschergrenzen 1953 bis 2003 (durchgezogene Linie)

zeitreihe des Hintereisferners wurde homogenisiert, um diesen Veränderungen Rechnung zu tragen (Fischer 2010).

Messung der Längenänderung

Die Längenänderung von Gletschern ist der am längsten und häufigsten dokumentierte glaziologische Parameter. Der Abstand mehrerer Fixpunkte zur Gletscherzunge wird am Ende der Ablationsperiode in einer bestimmten Richtung gemessen (Abb. 5). Die jährliche Längenänderung wird als Mittelwert des Unterschiedes der Distanz zwischen den

Fixpunkten und der Zunge von einem Jahr zum Folgejahr berechnet. Die Fixpunkte sind farblich markiert. Der Name des Punktes und die Richtung, in die gemessen wird, sind an den Punkten vermerkt. Mit Hilfe der Gletscherjahresberichte für jeden Gletscher, die vom Österreichischen Alpenverein archiviert werden, kann die Position der Zunge anhand dieser Markierungen rekonstruiert werden.

In Österreich werden seit 1890 systematische Messungen von Gletscherlängenänderungen durchgeführt (Richter 1894). Die ersten Messungen und die Ergebnisse daraus wurden von Fritsch (1898) zusammengestellt. Die bis 1975 verfügbaren Daten sind in zwei Abhand-

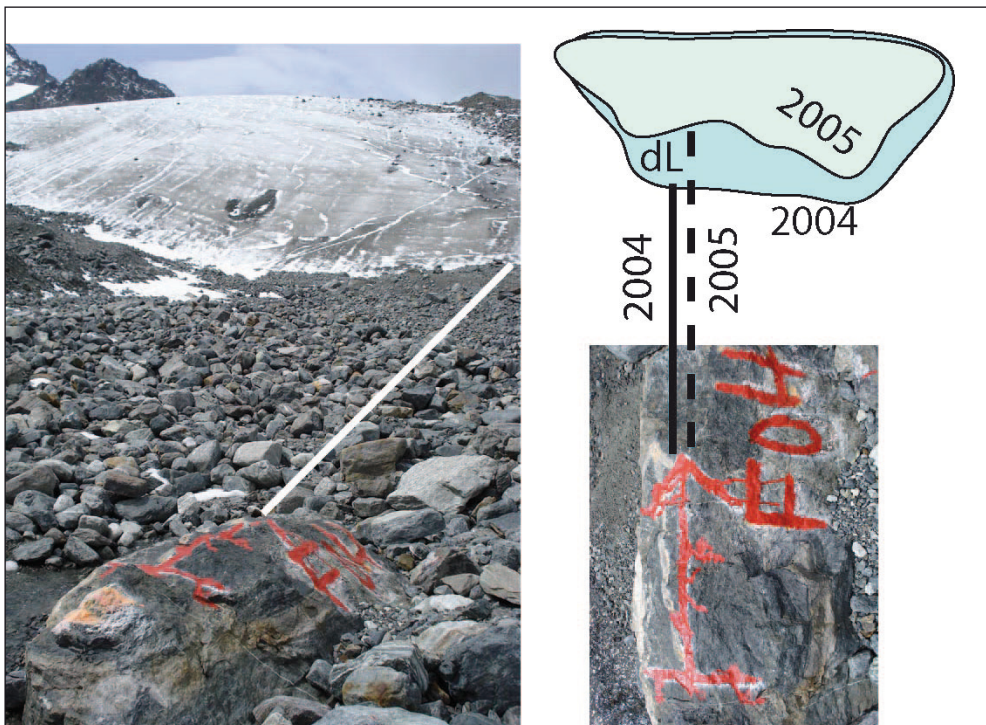


Abb. 5: Die Messung der Längenänderung wird seit 1891 mit derselben Methode durchgeführt (Fotos: Andrea Fischer)

lungen von Patzelt (1970, 1977) und in einer von Klebelsberg (1943) zusammengefasst. Im Magazin des Österreichischen Alpenvereins werden jährliche Berichte veröffentlicht (z.B. Patzelt 2005, Patzelt 2006). Zusätzlich zu den Längenänderungsmessungen enthält der Gletscherbericht Fotodokumentationen und Berichte über besondere Ereignisse wie das Abreißen von Nebengletschern, Felsstürze, Seenbildung oder das Einstürzen ganzer Gletscherzungen.

Abgesehen von Aufzeichnungen im Zusammenhang mit den katastrophalen Ausbrüchen der Gletscherseen am Vernagtferner 1600, um 1680, nach 1770 und 1845/48 (Nicolussi 1990), stammen einige der ältesten Gletscherbeobachtungen (Diener 1885) aus den Zillertaler Alpen (Zemmgrund). Die Karten von Ygl (1604/05, Kinzl 1962), Burgklechner (1608-1620, Richter 1902) und jene der zweiten (1806-1896, Franziszeische Landesaufnahme) und dritten (1869-1887, Franzisko-Josephinische Landesaufnahme) Landesaufnahme sind für alle beobachteten Gletscher Quellen weiterer Informationen über Zungenposition und Gletscherfläche (Arnberger 1970).

Klimadaten

Es gibt mehrere Langzeitklima- und Abflussmessreihen in Tirol. Für die Gletscher besonders relevant sind die im inneren Ötztal (Ekhart 1939, Finsterwalder 1891, Haeuser 1932). Die längste Zeitreihe stammt von der Klimastation der Universität Innsbruck, kür-

zere Reihen existieren für Obergurgl (Patzelt 1987), Vent, Galtür und Lienz. Gegenwärtig betreibt die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (www.zamg.ac.at) ein Netzwerk von Klimastationen und automatischen Wetterstationen. Der Hydrographische Dienst des Landes Tirol betreibt Abfluss- und Niederschlagspegel, sowie automatische Wetterstationen (<http://gis.lebensministerium.at/eHYD>, HZB 2002).

Einige der Langzeitstationen wurden seit Beginn der Messungen verlegt und Instrumente, Beobachter und Methoden haben sich geändert. Dadurch entstehen Sprünge in den Messreihen, die korrigiert werden müssen, um die Klimaänderung von Änderungen der Messtechnik unterscheiden zu können. Im Rahmen des HISTALP Projekts (Auer et al. 2007) wurden im Zuge einer sogenannten Homogenisierung Langzeitklimareihen korrigiert. Die Daten wurden anschließend verwendet um einen Rasterdatensatz von Temperatur und Niederschlag für den Alpenraum und seine Umgebung zu erstellen.

Die Station in Vent wird vom Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck als Teil des Langzeitmonitorings an Hintereis- und Kesselwandferner betrieben. Die Lufttemperatur wird in einer Stevenson Wetterhütte gemessen, für den Niederschlag gibt es eine Niederschlagswaage und einen manuellen Regenschirm. Im Einzugsgebiet der Rofenache in Vent, wo der Abfluss gemessen wird, werden sechs manuelle Regenschirme betrieben, um die Niederschlagssumme festzustellen. Der höchstgelegene Regenschirm befindet sich in 2970 m Höhe.

3. Ergebnisse

Klimadaten

Die Klimastation in Vent (1908 m) verzeichnet einen Anstieg der Lufttemperatur während der Ablationsperiode von Mai bis September, aber keine signifikanten Trends im Winterniederschlag (Abb. 6).

Die maximale mittlere Sommertemperatur trat mit 10,6 °C im Extremsommer 2003 auf und lag damit 2,6 °C über dem Mittel der Jahre 1961-1990 (man verwendet immer mindestens 30-jährige Mittel zur Berechnung eines klimatischen Durchschnittswertes).

Während der Ablationsperiode von 1947 war es mit einer mittleren Temperatur von 10,0 °C nur geringfügig kälter. Die Minimumtemperatur zwischen 1901 und 2008 wurde 1910 mit 6,1 °C erreicht. Das Niederschlagsmittel in der Akkumulationsperiode von 1961-1990 beträgt in Vent 261 mm. In 2970 m fallen im Schnitt 716 mm, also wesentlich mehr als im Tal. Der Niederschlagsgradient zwischen der Station im Tal und höheren Lagen variiert von Jahr zu Jahr. Dies ist zum Teil dadurch zu erklären, dass anströmende Luftmassen durch die umliegenden Berge kleinräumig modifiziert werden, wodurch es zu orographischen Niederschlagsereignissen kommt.

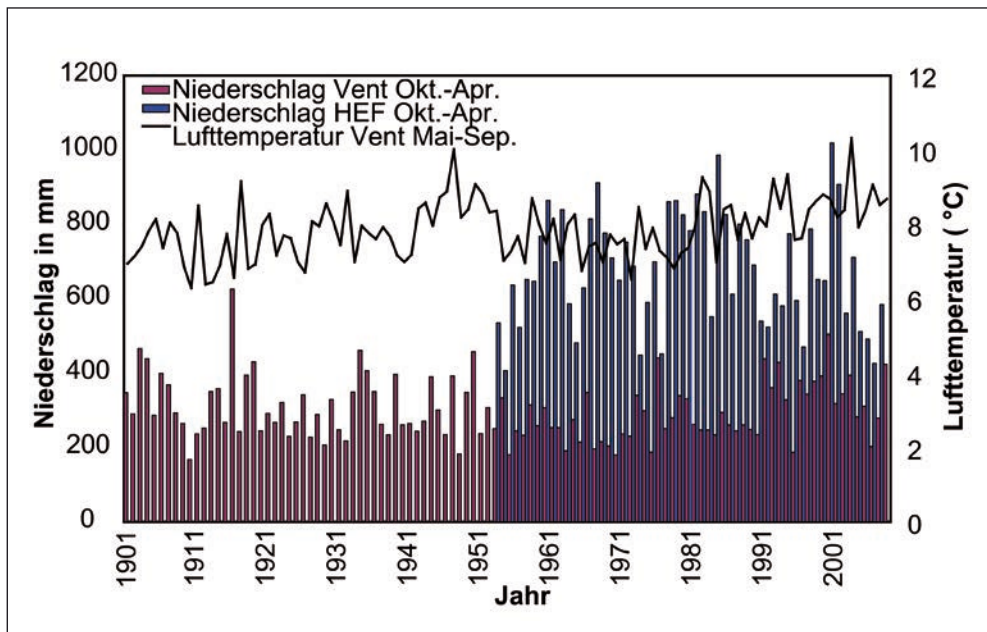


Abb. 6: Mittel der Lufttemperatur (schwarze Linie) in der Ablationssaison (Mai bis September) in Vent, Niederschlagssumme (rote Balken) in der Akkumulationssaison (Oktober bis April) in Vent 1901-2008. Der Winterniederschlag an der Station Hintereisferner (blaue Balken) ist signifikant höher als der in Vent gemessene

Die Unsicherheit der Niederschlagsmessung im Hochgebirge wird aufgrund der starken Winde während der Niederschlagsereignisse und dem hohen Anteil festen Niederschlags auf 30 % geschätzt. Von 1901 bis 2008 lag der Niederschlag während der Akkumulationsperiode in Vent zwischen 168 mm und 625 mm. Das gleitende Zehnjahresmittel der Temperatur während der Ablationsperiode erreicht im Intervall 1907-1916 ein Minimum von 7,1 °C und in den letzten zehn Jahren ein Maximum von 8,7 °C. Zwischen 1947 und 1959, sowie seit 1988 erreicht das gleitende Mittel Werte über 8,0 °C. Während dieser Perioden waren also in jedem Jahr die jeweils 10 vorangegangenen Jahre wärmer als 8,0 °C.

Längenänderungen

Abb. 7 zeigt beispielhaft für Längenänderungsmessungen, die an über 50 Tiroler Gletschern durchgeführt werden, die Längenänderungen am Hintereis-, Kesselwand-, Jamtal- und Vernagtferner, sowie am Zettalunitzkees (Zunge des Mullwitzkees). Vor allem während der Kriegsjahre sind einige Datenlücken vorhanden. Es gibt auch bisher keine Datenreihe homogenen Formats, da der Fokus der frühen Beobachtungen auf der Anzahl vorstoßender, stagnierender und schrumpfender Gletscher lag, nicht auf dem quantitativen Ausmaß der Veränderungen. In manchen Fällen wurde in Zweijahresperioden gemessen und es ist unklar, wie die Änderungen auf einzelne Jahre

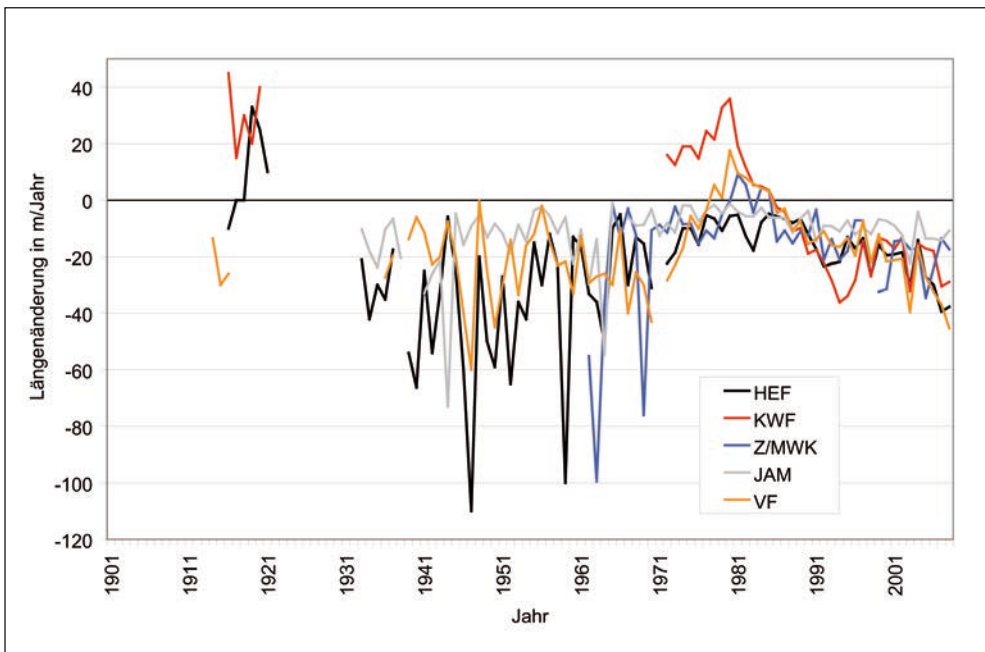


Abb. 7: Längenänderungen von Hintereisferner (HEF), Kesselwandferner (KWF), Zettalunitz/Mullwitzkees (Z/MWK), Jamtalferner (JAM) und Vernagtferner (VF)

umverteilt werden könnten. Nichtsdestotrotz sind die Längenmessungen eine einzigartige Datenreihe, die die Reaktion der Gletscher auf den Klimawandel dokumentiert. Aus Abb. 7 wird deutlich, dass die Gletscher unterschiedlich auf die gleichen Klimasignale reagieren. Der Hintereisferner zieht sich in den 1940ern und 1950ern stärker zurück als die anderen Gletscher. In den 1960ern zieht sich dagegen das Zettalunitz-/Mullwitzkees am schnellsten zurück und der Hintereisferner verliert nur langsam an Länge. Zu begründen ist dies nicht durch Unterschiede im Klimasignal, sondern durch die Mechanismen des Gletscherrückzugs. An den Zungen der Talgletscher der Ostalpen ist das Eis üblicherweise zwischen 70 und 270 m dick. Wenn dieses Eis schmilzt und der Eisfluss Richtung Zunge aufgrund geringer Akkumulationsraten abnimmt, wird die Zunge über Jahre oder Jahrzehnte hinweg langsam dünner. Erreicht das Eis eine kritische Dicke einiger Meter, fällt die Zunge über einen sehr kurzen Zeitraum in sich zusammen. Die Länge ändert sich daher einige Zeit sehr stark, bis sich eine neue Gletscherstirn stabilisiert hat. Es handelt sich hierbei um einen normalen Rückzugsmechanismus von Talgletschern, der im letzten Jahrzehnt, sowie in den 1930ern und 1940ern beobachtet wurde (z.B. Srbik 1941b). Einige der in Abb. 7 gezeigten Gletscher stoßen während der kühleren 1970er und 1980er vor, manche jedoch nicht. Der Kesselwandferner gewann in dieser Periode insgesamt 600 m Länge, während sich der Hintereisferner weiter zurückzog. Auch dies ist nicht auf das an beiden Gletschern gleiche

Klimasignal zurückzuführen, sondern vor allem auf die unterschiedliche Topographie der Gletscher. Die Akkumulation in höheren Lagen des Hintereisferners erreichte die Zunge nicht, während die Akkumulation im Firnbecken des Kesselwandferners schnell an die kurze, steile Zunge weitergegeben wurde, was die Reaktionszeit auf das Klimasignal verkürzte.

Massenbilanz

Die kumulative Summe der spezifischen Massenbilanzen (Abb. 8) war während der Messperiode am Hintereis-, Kesselwand-, Jamtal- und Vernagferner und am Mullwitzkees negativ. Es ging wesentlich mehr Masse durch die Eisschmelze verloren, als durch Akkumulation von Schnee gewonnen wurde. In den meisten Jahren ist die Massenbilanz des Hintereisferners stärker negativ als die der anderen Gletscher. Die große, bis in tiefe Lagen reichende Zunge macht den Hintereisferner besonders anfällig für warme, trockene Perioden. Der benachbarte Kesselwandferner erfährt das gleiche Klima, liegt aber höher und hat ein großes Akkumulationsgebiet und eine kleine Ablationszone. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Massenbilanzen hier üblicherweise am positivsten ausfallen. Wie auch die Längenänderungen sind die Massenbilanzen das Ergebnis eines Zusammenspiels von Klima und Gletschertopographie. Für Hintereis- und Kesselwandferner wird dies von Kuhn et al. (1985) genauer besprochen. Nach dem Beginn der Messungen 1953 ver-

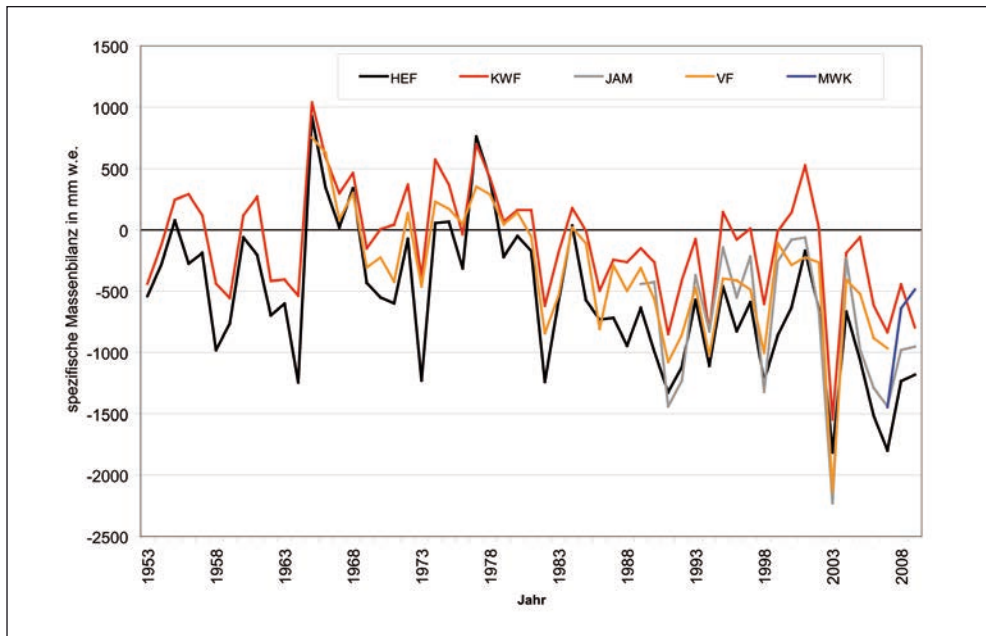


Abb. 8: Spezifische Massenbilanz des Hintereisferners (HEF), Kesselwandferners (KWF), Mullwitzkees (MWK), Jamtalferners (JAM) und Vernagtferners (VF)

loren Hintereis- und Kesselwandferner Masse. In den 1960er und 1970er Jahren verzeichneten diese beiden Gletscher ebenso wie der Vernagtferner Massengewinne. Nach 1982 zeigte nur noch der Kesselwandferner Massengewinne. Er erreichte 1985 seine maximale Fläche. Der extrem warme Sommer 2003 verursachte stark negative Massenbilanzen. Während der Ablationsperiode von 2003 verschwanden Teile des Firns im Akkumulationsgebiet, was zu einer Abnahme der mittleren Albedo der Gletscheroberfläche führte. Deswegen und aufgrund weiterer warmer Sommer nach 2003 waren die Massenbilanzen der letzten zehn Jahre stärker negativ als jene früherer Jahrzehnte.

4. Diskussion

Während der letzten 100 Jahre stieg das gleitende Zehnjahresmittel der Temperatur der Ablationsperiode (Mai bis September) in Vent in einer Höhe von 1908 m um 1,6 °C. Der Niederschlag während der Akkumulationsperiode zeigt keine signifikanten Trends. Die Reaktion eines Gletschers auf klimatische Veränderungen hängt von den individuellen Charakteristika des Gletschers ab. Längenänderungen werden von der Massenbilanz beeinflusst, aber auch die Eisdicke, die Neigung des Gletschers und die Eisgeschwindigkeit spielen eine Rolle. Die Eisdicke wiederum ist durch die Geschichte des Gletschers bedingt.

Gletscher befinden sich zu jedem Zeitpunkt in einem von drei möglichen Stadien. Ist der Gletscher im Gleichgewicht mit dem Klima, verändert er seine Form nicht. Wird das Klima wärmer oder trockener, verliert der Gletscher Masse und die Zunge zieht sich zurück. Wird das Klima kühler oder feuchter, wächst der Gletscher. In beiden Fällen ändert sich die Massenbilanz schneller als die Länge der Zunge. Je größer und flacher ein Gletscher ist, desto langsamer reagiert er auf ein neues Klima. Je größer die klimatische Veränderung ist, desto länger braucht der Gletscher, bis er erneut ein Gleichgewichtsstadium erreicht. Die fünf detailliert besprochenen Gletscher

zeigen unterschiedliche Reaktionen auf ähnliche klimatische Veränderungen. Wenn wir das Klima mit Hilfe der Gletscher verstehen wollen, muss eine große Anzahl von Gletschern untersucht werden. Nur Trends, die an Gletschern in verschiedenen Höhen und mit unterschiedlicher Topographie auftreten, sind verlässliche Klimaindikatoren.

Sollen Klimaveränderungen an einem einzelnen Gletscher untersucht werden, müssen Daten verwendet werden, die an diesem Gletscher erhoben wurden, da es sehr schwer ist, von der Massenbilanz oder der Rückzugsrate eines Gletscher auf die eines anderen zu schließen.



Abb. 9: Flächen unterhalb der Station Hintereisferner auf 3050 m Seehöhe (Foto: Andrea Fischer)

Das Netzwerk der Längenmessungen an Tiroler Gletschern dokumentiert den Gletscherrückzug seit 1890 in einer einzigartigen Datenreihe außergewöhnlich gut. Diese Daten sind als Grundlage für Sukzessionsstudien im Gletschervorfeld von großem Wert, da sich die Gletscher nicht kontinuierlich zurückziehen, sondern wechselweise sehr aktive sowie kaum bewegte Phasen durchleben.

Aktuell verändert sich die Gletscherfläche nicht nur im Bereich der Stirn, sondern auch in höheren Lagen. Änderungen dort werden während der Massenbilanzmessungen dokumentiert. Diese geben zusätzlich Auskunft über die Höhe der Winterschneedecke und das zur Verfügung stehende Schmelzwasser in der Ablationsperiode. Eine Untersuchung der sich ändernden Bedingungen für Lebewesen in höheren Lagen wäre ein interessantes Anwendungsgebiet dieser Daten (Abb. 9). In Kombination mit dendrochronologischen Daten (Nicolussi & Patzelt 2001, Nicolussi et al. 2005, Nicolussi & Thurner 2012) könnte so mehr über das Klima und die Ökologie seit dem Ende der letzten Eiszeit vor mehr als 10 000 Jahren in Erfahrung gebracht werden.

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: 205-215. doi:10.5194/tc-3-205-2009
- Arnberger, E. (1970) Die Kartographie im Alpenverein. *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte* 22, 253 S.
- Auer, I., Böhm R, Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P. D., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z. & Nieplova, E. (2007) HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *International Journal of Climatology* 27: 17-46.
- Blümcke, A. & Hess, H. (1899) Untersuchungen am Hintereisferner. *Wissenschaftliche Ergänzungshefte zur Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins* 1/2: 1-87.
- Diener, C. (1885) Studien an den Gletschern des Schwarzensteingrundes. *Zeitschrift des DÖAV* 16: 66-78.
- Ekhart, E. (1939) Die klimatischen Verhältnisse des Venter Tales. *Das Venter Tal. Zweig Mark Brandenburg d. DAV, München*, S. 13-36.
- Erschbamer, B., Niederfriniger Schlag, R. & Winkler E. (2008) Colonization processes on a central Alpine glacier foreland.

- Journal of Vegetation Science 19: 855-862.
- Finsterwalder, S. (1891) Die Pegelstation Vent. Mitteilungen des DÖAV 7(17): 65-66.
- Finsterwalder, S. (1897) Der Vernagtferner. Seine Geschichte und seine Vermessung in den Jahren 1888 und 1889. Wissenschaftliche Ergänzungshefte zur Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins 1 (1): 112.
- Fischer, A. & Markl, G. (2009) 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. (2010) Glaciers and climate change: Interpretation of 50 years of direct mass balance of Hintereisferner. Global and Planetary Change 71/1-2: 13-26.
- Fountain, A. & Vecchia, A. (1999) How many stakes are required to measure the mass balance of a glacier? Geographical Annals 81A: 563-568.
- Friedel, H. (1939) Die Pflanzenbesiedlung im Vorfeld des Hintereisferners. Zeitschrift für Gletscherkunde 26: 215-239.
- Fritsch, M. (1898) Verzeichnis der bis zum Sommer 1896 in den Ostalpen gesetzten Gletschermarken. DÖAV, Wien, 129 S.
- Gams, H. (1939) Die Pflanzendecke der Venter Täler. Das Venter Tal. Zweig Mark Brandenburg d. DAV, München: 56-63.
- Gross, G. (1987) Der Flächenverlust der Gletscher in Österreich 1850-1920-1969. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 23 (2): 131-141.
- Gruber, O. (1913) Der Hochjochferner im Jahre 1907. Seine Vermessung in den Jahren 1907 und 1908. Zeitschrift für Gletscherkunde 7: 1-36.
- Haeuser, J. (1932) Niederschlagsmessungen am Hintereis- und Vernagtferner. Meteorologische Zeitschrift 49: 314-315.
- Hess, H. (1904) Die Gletscher. Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, 426 S.
- Hoinkes, H. (1970) Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 6: 37-90.
- HZB (2002) Hydrographisches Jahrbuch von Österreich. Hydrographisches Zentralbüro / Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt, Wien: Hydrograph. Zentralbüro. – CD-ROM
- Janetschek, H. (1949) Tierische Successionen auf hochalpinem Neuland. Nach Untersuchungen am Hintereis-, Niederjoch- und Gepatschferner in den Ötztaler Alpen. Schlern-Schriften 7: 215.
- Jarvis, A., Reuter, H., Nelson, A. & Guevara, E. (2006). Hole-filled seamless SRTM data V3. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), <http://srtm.csi.cgiar.org>, last access: 1 May 2006.
- Kaufmann, R. (2001) Invertebrate succession on an alpine glacier foreland. Ecology 82: 2261-2278.

- Kerschner, H. & Ivy-Ochs, S. (2007) Palaeoclimate from glaciers: Examples from the Eastern Alps during the Alpine Lateglacial and early Holocene. *Global and Planetary Change* 60 (1-2): 58-71.
- Kinzl, H. (1962) Die Karte von Tirol des War-
mund Ygl 1604/05. Innsbruck, 54 S.
- Klebsberg, R. v. (1943) Die Alpengletscher
in den letzten 30 Jahren (1911-1941).
Petermanns Mitteilungen 89: 23-32.
- Klebsberg, R. v. (1913) Das Vordringen der
Hochgebirgsvegetation in den Tiroler
Alpen. *Österreichische Botanische Zeit-
schrift*, 23 S.
- Kuhn, M., Markl, G., Kaser, G., Nickus, U.,
Obleitner, F. & Schneider, H. (1985)
Fluctuations of climate and mass balance:
Different responses of two adjacent gla-
ciers. *Zeitschrift für Gletscherkunde und
Glazialgeologie* 21: 409-416.
- Kuhn, M., Dreiseitl, E., Hofinger, S., Markl,
G., Span, N. & Kaser, G. (1999) Meas-
urements and Models of the Mass Balance
of Hintereisferner. *Geografiska Annaler*
81 A (4): 659-670.
- 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 Gla-
ciology* 46: 177-184.
- Lang, H. & Patzelt, G. (1971) Die Volu-
menänderungen des Hintereisferners
(Ötztaler Alpen) im Vergleich zur Mas-
senänderung im Zeitraum 1953-64.
*Zeitschrift für Gletscherkunde und Gla-
zialgeologie* VII (1-2): 229-238.
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R.B., Allison, I., Car-
rasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G.,
Mote, P., Thomas, R.H. & Zhang, T.
(2007) Observations: Changes in Snow,
Ice and Frozen Ground. In: *Climate
Change 2007 – The Physical Science
Basis. Contribution of Working Group
I to the Fourth Assessment Report of
the Intergovernmental Panel on Climate
Change*, Solomon, S., Qin D., Manning
M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B.,
Tignor M. & Miller H.L. (Hg.) Cam-
bridge University Press, Cambridge, Uni-
ted Kingdom and New York, NY, USA,
S. 338-383.
- Meixner, W. & Siegl, G. (2010) Historisches
zum Thema Gletscher, Gletschervorfeld
und Obergurgl. In: *Glaziale und perigla-
ziale Lebensräume im Raum Obergurgl*,
Koch, E.-M. & Erschbamer, B. (Hg.),
Alpine Forschungsstelle Obergurgl 1,
innsbruck university press, Innsbruck,
S. 9-25.
- Nicolussi, K. (1990) Bilddokumente zur Ge-
schichte des Vernagtferners im 17. Jahr-
hundert. *Zeitschrift für Gletscherkunde
und Glazialgeologie* 26 (2): 97-119.
- Nicolussi, K. (1994) Jahrringe und Massen-
bilanz; dendroklimatologische Rekonst-
ruktion der Massenbilanzreihe des Hin-
tereisferners bis zum Jahr 1400 mittels
Pinus cembra-Reihen aus den Ötztaler
Alpen, Tirol. *Zeitschrift für Gletscher-
kunde und Glazialgeologie* 30: 11-52.
- Nicolussi, K. & Patzelt, G. (1996) Recon-
structing glacier history in Tyrol by means

- of tree-ring investigations, *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 32: 207-215.
- Nicolussi, K. & Patzelt, G. (2001) Untersuchungen zur holozänen Gletscherentwicklung von Pasterze und Gepatschferner (Ostalpen). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 36: 1-87.
- 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: 221-234.
- Nicolussi, K. & Thurner, A. (2012) Jahresringuntersuchungen an rezentem und subfossilem Holzmaterial aus dem Raum Obergurgl – Klimaanalysen und holozäne Waldentwicklung. In: *An den Grenzen des Waldes und der menschlichen Siedlung*, Koch, E.-M. & Erschbamer, B. (Hg.), Alpine Forschungsstelle Obergurgl 2, Innsbruck university press, Innsbruck: 147-162.
- Patzelt, G. (1970) Die Längenmessungen an den Gletschern der österreichischen Ostalpen 1890-1969. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 6/1-2: 151-159.
- Patzelt, G. (1977) Statistik der Längenmessungen an den österreichischen Gletschern 1960 bis 1975. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 12/1: 91-94.
- Patzelt, G. (1980) The Austrian Glacier inventory: Status and first results. *IAHS Publ.* 126: 181-183.
- Patzelt, G. (1987) MaB-Projekt Obergurgl. Veröffentlichungen des Österreichischen MaB Programms, Universitätsverlag Wagner, Innsbruck, 350 S.
- Patzelt, G. (2005) Gletscherbericht 2003/2004. Sammelbericht über die Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins im Jahre 2004. *Mitteilungen des Österreichischen Alpenvereins* Jg. 60 (130), 2/05: 24-31.
- Patzelt, G. (2006) Gletscherbericht 2004/2005. Sammelbericht über die Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins im Jahre 2005. *Bergauf* 2/2006: 6-11.
- Pelto, M. S. (2000) The impact of sampling density on glacier mass balance determination. *Hydrological Processes* 14/18: 3215-3225.
- Reinwarth, O. & Escher-Vetter, H. (1999) Mass balance of Vernagtferner, Austria, from 1964/65 to 1996/97: Results for three sections and the entire glacier. *Geografiska Annaler* 81 A (4): 743-751.
- Richter, E. (1885) Beobachtungen an den Gletschern der Ostalpen. II. Die Gletscher der Ötztaler Gruppe im Jahre 1883. *Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins* 16: 54-65.
- Richter, E. (1892) Urkunden über die Ausbrüche des Vernagt- und Gurglergletschers im 17. und 18. Jahrhundert. *Forschungen zur deutschen Landes- und Volkskunde* 6: 345-440.
- Richter, E. (1894) Die wissenschaftliche Erforschung der Ostalpen seit der Gründung des Österreichischen und Deutschen

- Alpenvereins. Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins 25: 1-94.
- Richter, E. (1902) Mathias Burgklechners Tirolische Landtafeln 1608, 1611, 1620. Wien, 35 S.
- Schlagintweit, K. & Schlagintweit, A. (1850) Untersuchungen über die physikalische Geographie der Alpen in ihren Beziehungen zu den Phänomenen der Gletscher, zur Geologie, Meteorologie und Pflanzengeographie. Leipzig, 600 S.
- Schlosser, E. (1997) Numerical simulations of Hintereisferner, Ötztal Alps, since AD 1850. *Annals of Glaciology* 24: 199-202.
- Simony, F. (1863) Beitrag zur Kunde der Ötztaler Alpen. *Mitteilungen des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins* 1: 1-24.
- Sonklar, K. v. (1857) Das Ötztaler Eisgebiet. *Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft Wien*, S. 1-15.
- Sonklar, K. v. (1860) Die Ötztaler Gebirgsgruppe, mit besonderer Rücksicht auf Orographie und Gletscherkunde. Gotha, 292 S.
- Sonklar, K. v. (1877) Studie über den Gurgler Gletscher in der Ötztaler Gebirgsgruppe. *Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins* 8: 1-14.
- Span, N., Kuhn, M. & Schneider, H. (1997) 100 years of ice dynamics of Hintereisferner, Central Alps, Austria, 1894-1994. *Annals of Glaciology* 24: 297-302.
- Srbik, R. v. (1936) Ein Vierteljahrhundert Ötztaler Gletschermessungen. *Zeitschrift für Gletscherkunde* 24: 188-191.
- Srbik, R. v. (1939) Die Gletscher der Gurgler Tales. *Festschrift des Zweiges Karlsruhe des DÖAV*, 18 S.
- Srbik R. v. (1941a) Aus der Frühzeit der Gletscherforschung südlich Vent. *Zeitschrift für Gletscherkunde* 27: 332-336.
- Srbik, R. v. (1941 b) Die Gletschereinbrüche am Schalf- und Marzellferner (Ötztaler Alpen). *Zeitschrift für Gletscherkunde* 27: 329- 331.

Verzeichnis der Autorinnen

- Andrea Fischer
Institut für Meteorologie und Geophysik
Universität Innsbruck
Innrain 52, 6020 Innsbruck
Andrea.Fischer@uibk.ac.at
- Institut für Gebirgsforschung
Mensch und Umwelt
Österreichische Akademie der Wissenschaften
Technikerstraße 25, 6020 Innsbruck
- Lea Hartl
Alpine Forschungsstelle Obergurgl
Universität Innsbruck
Gaisbergweg 3, 6456 Obergurgl
Lea.Hartl@student.uibk.ac.at