



Die Gletscher im Wandel der Zeit – Gletschermonitoring am Beispiel der Pasterze

Wolfgang Sulzer und Gerhard K. Lieb, Graz

Kurzfassung

Die Gletscher im Wandel der Zeit – Gletschermonitoring am Beispiel der Pasterze: Das zentrale Thema dieses Beitrags ist die räumliche und zeitliche Veränderung der Gletscher unter veränderten Klimabedingungen. Zu diesem Zweck wird ein kurzer Überblick über glaziologische Grundbegriffe gegeben. Anschließend wird die Verteilung und Veränderung der Vergletscherung aus globaler Sicht unter besonderer Berücksichtigung der Situation seit dem Pleistozän diskutiert. Anhand der Pasterze, dem größten Gletscher Österreichs, wird der kontinuierliche Gletscherrückgang seit dem Jahre 1850 dokumentiert. Der Gletscherrückgang wird sowohl mit traditionellen als auch mit modernen (unter spezieller Berücksichtigung der Fernerkundung) Methoden durchgeführt. Ein Vergleich der verwendeten Beobachtungsmethoden zeigt, dass die besten Ergebnisse bei einer Kombination traditioneller mit modernen Methoden erzielt werden.

Schlüsselwörter: Klimawandel, Gletschermonitoring, Pasterze

Abstract

Glaciers in the change of time – glacier monitoring by the example of Pasterze: The leading topic of this paper is the spatio-temporal reaction of glaciers to the changing climatic conditions. For this purpose a short overview of basic terms of glaciology is given first. Then the glacial phenomenon is discussed on a global perspective with special regard to the Pleistocene and the development since then. Pasterze glacier is used as an example of pronounced shrinking of a glacier since 1850. The glacier retreat is monitored by traditional as well as modern methods (with special focus on Remote Sensing) which are compared in the last chapter. The results show that the best way of monitoring the behavior of glaciers is to use a set of different methods.

Keywords: climate change, glacier monitoring, Pasterze

1. Einleitung

Der Beitrag soll einen geowissenschaftlichen Überblick über das Werden und Vergehen von Gletschern geben. Dabei wird der Bogen über Grundbegriffe der Gletscherkunde bis hin zu Methoden des Gletschermonitorings am Beispiel der Pasterze gespannt. Die historischen Veränderungen der Vergletscherung in den Alpen spiegeln eine abwechslungsreiche Klimageschichte wider. Verschiedene wissenschaftliche Methoden erlauben es, Veränderungen von Gletscherausdehnungen weit in die Vergangenheit zurück zu verfolgen. Unmittelbar dokumentiert und vermessen werden die Veränderungen der Gletscher seit der 2. Hälfte des 19. Jhs. – an der Pasterze, Österreichs größtem Gletscher, existiert eine der weltweit längsten Messreihen seit 1879. In jüngster Zeit erlauben moderne Methoden wie etwa die Fernerkundung einen exakteren und flächenhaften Einblick in den vom Klimawandel klimagesteuerten Gletscherrückzug.

2. Grundbegriffe der Gletscherkunde

„Unter einem Gletscher versteht man eine aus festem atmosphärischen Niederschlag entstandene Masse aus Schnee und vor allem körnigem Eis, die sich in teils gleitender, teils fließender

Bewegung von einem Nähr- in ein Zehrgebiet befindet.“ Diese gängige Definition spricht die wichtigsten Rahmenbedingungen, den inneren Aufbau und die daraus resultierende Dynamik der Gletscher an und soll die Leitlinie der folgenden Erläuterungen bilden.

Die Bildung von Gletschern setzt Klimaverhältnisse voraus, unter denen über viele Jahre hinweg mehr Schnee fällt als abschmilzt. Dies ist in Abhängigkeit von einem ausreichend tiefen Temperaturniveau nur in den hohen Breiten (Arktis, Antarktis) und in großen Höhen der Gebirge der Fall. Wenn sich der **Schnee** anhäuft, wandelt er sich durch Setzung, Auftauen und Wiedergefrieren allmählich zu **Firn** (=Schnee, der älter ist als ein Jahr) und unter dem Druck der überlagernden Schneeschichten nach einigen Jahren schließlich zu grobkörnigem **Gletschereis** um.

Da sich Schnee und Eis auf diese Weise nicht beliebig hoch auftürmen können, kommt es zu einer der Schwerkraft folgenden Massenverlagerung (**Fließbewegung**) talabwärts, die einerseits durch Gleiten am Untergrund und andererseits durch interne Verformung der Eismasse zustande kommt. Hierdurch gelangt ein Teil des Gletschers in eine tiefere Höhenstufe, in der im

Laufe eines Jahres mehr Schnee abschmilzt als fällt. Das bedeutet, dass im Sommer nicht nur der hier gefallene Schnee wieder verschwindet, sondern darüber hinaus auch noch Gletschereis abschmilzt (**Zehr- oder Ablationsgebiet** des Gletschers). Wird der Betrag dieser Abschmelzung durch den Eisnachschieb (aus dem **Nähr- oder Akkumulationsgebiet**) kompensiert, so ändert sich die Ausdehnung des Gletschers nicht (=stationäres Verhalten). Ist der Eisnachschieb größer, so schiebt sich der Gletscher nach vor, vergrößert also sein Areal (= **Gletschervorstoß**); ist der Eisnachschieb kleiner, schmilzt der Gletscher zurück (=sogenannter Gletscherrückzug, oder **Gletscherschwund**).

Diese Variationen der Ausdehnung des Gletschers hängen vom Massenumsatz ab, der zahlenmäßig als **Massenbilanz** ausgedrückt werden kann und sich (nach einem gerne verwendeten Vergleich mit einem Unternehmen) aus der Summe der „Einnahmen“ (Akkumulation) und der „Ausgaben“ (Abschmelzung = Ablation) zusammensetzt (Abbildung 1). Dabei sind die Witterungsverhältnisse des jeweiligen Jahres der wirtschaftlichen Konjunktur vergleichbar. Zentrale Größe hierbei ist die Höhenlage der **Gleichgewichtslinie**, die Nähr- und Zehrgebiet voneinander trennt, bzw. ihr langjähriges Mittel, die **Schneegrenze**. Bei stationären Gletschern gilt im Alpenraum als grobe Faustregel, dass Nähr- und Zehrgebiet meist ein Flächenverhältnis von etwa 2:1 besitzen.

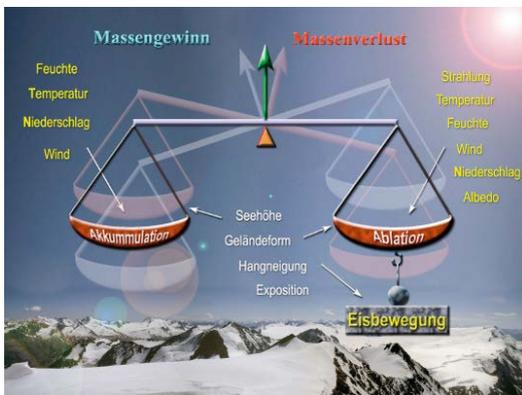


Abb. 1: Die Massenbilanz eines Gletschers (Quelle: Weber, 2004)

3. Die Verbreitung der Gletscher im Wandel der Zeit

3.1 Übersicht

In kontinentaleuropäischer Perspektive spielen Gletscher flächenmäßig eine nur geringe Rolle, bedecken sie doch selbst im „Parade-Gebirgsland“ Schweiz nicht mehr als 3% der Staatsflä-

che. Auf der gesamten Erde hingegen umfassen die Gletscher rund 16 Millionen Quadratkilometer oder rund 11% der Festlandsfläche, wovon 86% auf den fast ganz vergletscherten Kontinent Antarktis, 11% auf Grönland und nur 3% auf alle übrigen Gebiete entfallen. Mehr noch als die Flächen ist jedoch die in Gletschereis gebundene Wassermenge von Interesse. 97,5% des Wassers der Erde sind Salzwasser und vom verbleibenden Rest sind wiederum etwa 70% des Süßwassers als Eis in Gletschern gebunden. Damit rücken abschmelzende Gletscher als mögliche Süßwasserlieferanten für eine verstärkt unter Wassermangel leidende Menschheit ins Blickfeld.

Da Gletscher klimaabhängig sind und sich das Klima beständig ändert – derzeit wegen der vom Menschen verursachten Verstärkung des „Treibhauseffektes“ besonders dynamisch –, wandelt sich auch das Verbreitungsbild der Gletscher. Noch vor rund 20.000 Jahren etwa lag in der Würm-Eiszeit ganz Nordeuropa unter einem Eispanzer und die Gletscher der Alpen stießen bis vor die Tore Münchens vor. In den Ausläufern der östlichen Ostalpen reichten die mächtigen Talgletscher entlang der Talungen der Mur bis Judenburg, der Drau bis Völkermarkt und der Enns bis etwa Hiefalau (Abbildung 2).



Abb. 2: Rekonstruktion der würmzeitlichen Vergletscherung der östlichen Ostalpen (Ausschnitt aus van Husen, 1987)

Viele Naturphänomene – von den Alpen- und Alpenrandseen über die Urstromtäler des Norddeutschen Tieflandes bis zu den Fjorden Norwegens – zeugen davon. Umgekehrt kennt die Erdgeschichte aber auch viele Millionen Jahre

andauernde Phasen, in denen es auf der Erde überhaupt keine Gletscher gab. Aussagen zur gegenwärtigen Vergletscherung sind also nur Momentaufnahmen in einem permanenten Anpassungsprozess der Gletscher an die sich laufend wandelnden Klimabedingungen. Vor diesem Horizont schenkt die moderne Forschung den Gletschern als sensible „Klimazeigern“ hohe Aufmerksamkeit. Die Datenbestände über die räumliche Verteilung und zeitlichen Veränderung werden durch den World Glacier Monitoring Service (2009) in Zürich verwaltet und fortgeführt.

3.2 Die Vergletscherung in den Alpen

Im 20. Jahrhundert haben die Gletscher aller Gebirge der Erde – mit wenigen Ausnahmen – an Fläche, Länge und Volumen verloren. Beim letzten Gletscherhochstand um 1850 betrug die gesamtalpine Gletscherfläche ca. 4470km², 1970 dann noch 2909km² und 2000 nur noch 2270km². Innerhalb von 150 Jahren hat sich somit die alpine Gletscherfläche um 50% reduziert. Noch drastischer ist der Volumenverlust (Tabelle 1): Zwischen 1975 und 2000 ist im Schnitt jährlich rund 1% des verbleibenden Eisvolumens verloren gegangen. Seither sind die durchschnittlichen jährlichen Verluste auf ca. 2 – 3% gestiegen. Das Extremjahr 2003 allein hat geschätzte 8% des restlichen Eises eliminiert (Haeberli und Maisch, 2007; Zryd 2008).

	1850	1975	2000	2005
Volumen (km ³)	200	105	75	65
Rel. Änderung des Volumens (%)		-47,5	-28,5	-12,5
Änderungsrate (% pro Jahrzehnt)		-3,8	-11,4	-25,5

Tabelle 1: Eisvolumen und Änderungsraten von 1850-2005 (nach Haeberli und Maisch, 2007)

Der Anteil der Gletscherfläche von rund 0,5% an der österreichischen Staatsfläche ist übrigens ähnlich dem der Weinbaufläche: Beide Phänomene sind in der österreichischen Flächenstatistik Marginalien, denen aber jeweils große wirtschaftliche Bedeutung und ideelle Wertschätzung – mit starker Rückwirkung sogar auf regionale Identitäten – zukommt. Die Gletscher umfassten übrigens selbst bei ihrem letzten „Hochstand“ in der Mitte des 19. Jhs. nur 1,1% des heutigen Staatsgebietes. Das in allen Gletschern gespeicherte Wasservolumen spielt im gesamtösterreichischen Wasserhaushalt eine geringe Rolle: Die Wassermenge entspricht nur einem Fünftel der Menge, die jährlich als Niederschlag auf Österreich fällt.

Szenarien für die Zukunft zeigen, dass selbst bei einem günstigen Klimaszenario – einer Stabilisierung der globalen Temperaturzunahme bei etwa 2 Grad und einem um rund den Faktor 2 verstärkten Effekt im Hochgebirge – die Alpengletscher innerhalb weniger Jahrzehnte bis auf kümmerliche Reste verschwinden dürften (Haeberli und Maisch, 2007).

In der Schweiz wird bei einer Erwärmung bis 2080 von 2,8 Grad ein Schneegrenzanstieg um 400m erwartet (Haeberli et. al, 1998). Für Österreich werden sich die Gletscher aufgrund der wesentlich geringeren Vergletscherung und Gebirgshöhen zum Ende des 21. Jahrhunderts in die höchsten Lagen und Kare zurückziehen, Talgletscher werden keine mehr vorhanden sein (Wakonigg, 2007).

4. Die Pasterze und ihre Messungen

4.1 Übersicht

Die Pasterze, der größte Gletscher Österreichs und der Ostalpen, gilt als ein besonders gut erforschter Gletscher, wobei in jüngster Zeit zahlreiche wissenschaftliche Einzelprojekte, die sich etwa mit Fragen der Klimaänderung, der Abschmelzung oder der Massenbilanz befassten (Slupetzky et. al 1998, Herbst et. al, 2002, Oerlemanns 2005, Geiser 2006, Böhm et. al, 2007, Kellerer-Pirklbauer A., 2008). Das Besondere an der Pasterze aber sind die außerordentlich langen Datenreihen aus Standardmessungen, die bereits seit 1879 alljährlich – im September 2009 also zum 130. Mal – durchgeführt wurden.

Der Pasterzengletscher liegt am Fuß des Großglockners (Hohe Tauern) im Einzugsgebiet der Möll bzw. der Drau, in welchen die Vergletscherung während der Würmkaltzeit bis an das östliche Ende des Klagenfurter Beckens vorgestoßen ist (Abbildung 2).

An der Pasterze wurden in den letzten Jahren vom Gletscherbach immer wieder Hölzer unter dem Gletscher herausgespült (Slupetzky 1993; Nicolussi und Patzelt 2000, 2001). Diese Reste von teilweise über 300 Jahre alt gewordenen Bäumen, jeweils Lärchen bzw. Zirben, datieren vor allem ins frühe Holozän und belegen durchwegs Perioden mit einer geringeren Eisausdehnung der Pasterze als heute. Abbildung 3 veranschaulicht die Gletschervorstöße von Pasterze und Gepatschferner (Ötztaler Alpen), die mit den klimaabhängigen Jahresringbreiten der Zirbe (geringere Werte signalisieren kühle Klimaphasen) erwartungsgemäß relativ gut übereinstimmen (Nicolussi und Patzelt 2001).

chen undeutlich reagiert. So etwa gab es bei keinem der beiden von vielen Alpengletschern bekannten Vorstoßphasen des 20. Jhs. (um 1920 und 1965-1980) einen Gletschervorstoß „im Sinne eines raumgreifenden Vorschubs der gesamten Gletscherfront“ (Wakonigg und Lieb, 1996). Umso mehr muss die spätestens seit etwa 1990 beobachtbare Verstärkung des Gletscherschwundes zu denken geben, die nicht nur in den Messwerten (die Gletscherzunge ist z.B. in der Dekade 1994-2003 jährlich im Mittel um 4,24 m eingesunken, das ist das 2 1/2-fache des Mittelwertes für 1936-1994), sondern auch im Erscheinungsbild des Gletschers erkennbar wird.

Jahr	1852	1924	1969	1985	2002
Länge	11,4km	10,3km	9,5km	9,0km	8,4km
Fläche	26,5 km ²	22,6 km ²	19,8 km ²	18,9 km ²	18,5 km ²
Vol.	3,5 km ³	2,9 km ³	2,2 km ³	2,0 km ³	1,8 km ³

Tabelle 2: Länge, Fläche und Volumen der Pasterze 1852-2002 (Quelle: Lieb und Slupetzky 2004)



Abb. 5: Der Blick vom Glocknerhaus um 1900 (oben) und im Jahre 2005 (unten) (Archiv, Photo Lieb)

Abbildung 5 zeigt den Blick vom Glocknerhaus in Richtung Pasterze. Um 1900 (oben) reicht die Pasterze noch mächtig in die Schlucht am Elisabethfelsen hinein, während sie 2005 (unten) vom Glocknerhaus nicht mehr zu sehen war.

Die mittlerweile schon zum „Klassiker“ gewordene Summenkurve, die von einer Verflachung in den 20er-Jahren des 20. Jhs. abgesehen steil nach unten weist, ist zusammen mit den Einzeljahreswerten in Abbildung 6 wiedergegeben. Die wichtigste, aus den langjährigen Standardmessungen ableitbare Aussage ist die, dass die Pasterze sich über den gesamten Zeitraum hin praktisch ununterbrochen verkleinerte. Dies zeigt die Längenänderung am klarsten: sie beträgt in Summe (seit dem Hochstand 1851) rund 1700m und war nie positiv – abgesehen von wenigen Jahren in der zweiten bis vierten Dekade des 20. Jahrhunderts mit mehr oder weniger stationärem Verhalten, worin sich die vergleichsweise gletschergünstige Periode um 1920 abbildet.

Die Messung der Höhenänderung erfolgt tachymetrisch: Hierbei handelt es sich um Schnellmessungen von Entfernung und Höhe mittels Theodolit und Messlatte. Die Messpunkte sind entlang von 5 Querprofilen über den Gletscher angeordnet und voneinander meist 100m entfernt. Sie sind durch exakt eingemessene Fixpunkte an der linken Seite des Gletschers und vorgegebene Richtungen definiert. Die Nettoakkumulation des Nährgebietes wirkt dem Einsinken der Firnfelder entgegen, im Zehrgebiet wirkt die Nettoablation dem „Aufquellen“ der Zunge entgegen. Eine gegenüber dem Vorjahr gleiche Oberfläche besagt daher nur, dass sich Eisnachschub und Abschmelzen die Waage halten, aber nicht, dass es keine Abschmelzung gegeben hätte. Wegen der trägen Bewegungskomponente sind Änderungen der Haushaltsgrößen Akkumulation und Ablation in den Einzeljahren sehr gut erkennbar. Die an den tiefer gelegenen Profilen vorherrschenden negativen Werte der Höhenänderung bedeuten eine laufende Erniedrigung der Gletscheroberfläche, die die Volumenverluste widerspiegelt.

Die Höhenänderungen (Abbildung 7 und Abbildung 8) zeigten ebenfalls in den weitaus meisten Jahren negative Werte – also ein Einsinken der Gletscheroberfläche. Allein die Zeit zwischen 1974 und 1980 war an den beiden hoch gelegenen Profilen eine Phase kontinuierlicher Aufhöhung des Gletschers (am Firnprofil in Summe um 7,16m, an der Linie am Hohen Burgstall um 8,45m) unter den damals gletschergünstigen Witterungsbedingungen („Vorstoßperiode 1965-1980“).

Im Mittel für die gesamte Gletscherzunge kam es nur in zwei Jahren (1978 und 1980) zu geringfügigen Aufhöhungen; von 1938 bis 1999 sank die Zunge um insgesamt 135m ein, was größenordnungsmäßig einem Volumenverlust von 800 Millionen Kubikmetern entspricht.

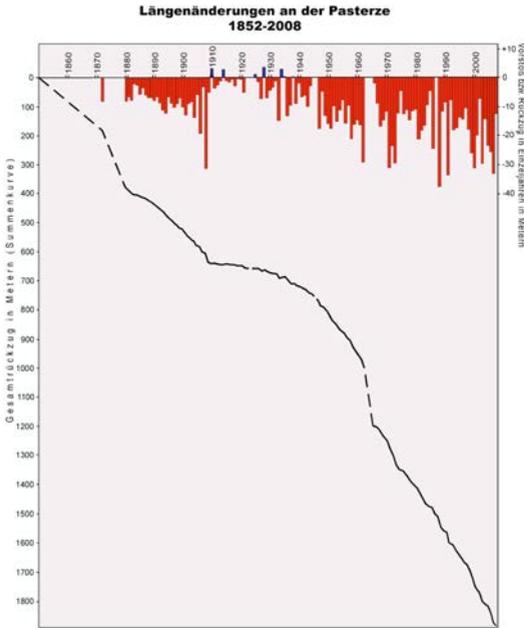


Abb. 6: Längenverluste der Pasterze in Einzeljahren (Stäbe) und in Summen (Kurve) (1852-2008), Quelle: eigene Daten, Graphik: M. Krobath



Abb. 7: Die mittlere Höhenänderung der Pasterze nach Einzeljahren (1947-2007), (Quelle: Institut für Geographie und Raumforschung 2009)

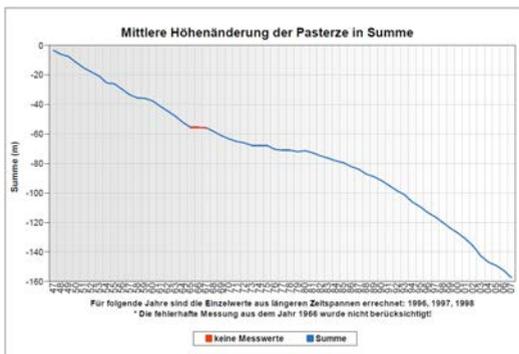


Abb. 8: Die mittlere Höhenänderung der Pasterze in Summe (1947-2007), (Quelle: Institut für Geographie und Raumforschung 2009)

Abbildung 9 dokumentiert eindrucksvoll den Gletscherhöhenchwund im Zungenbereich entlang der Seelandlinie im mittleren Teil der Gletscherzunge. Seit dem Hochstand um 1850 hat hier die Pasterze rund 2/3 der Mächtigkeit verloren.

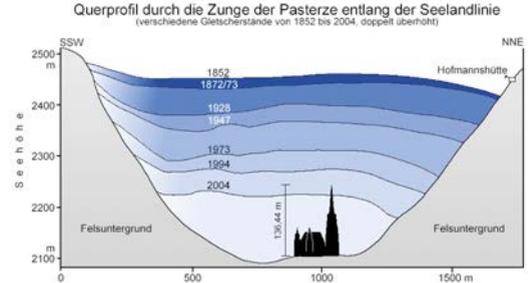


Abb. 9: Querprofil durch die Zunge der Pasterze entlang der Seelandlinie (Quelle: Lieb und Slupetzky, 2004)

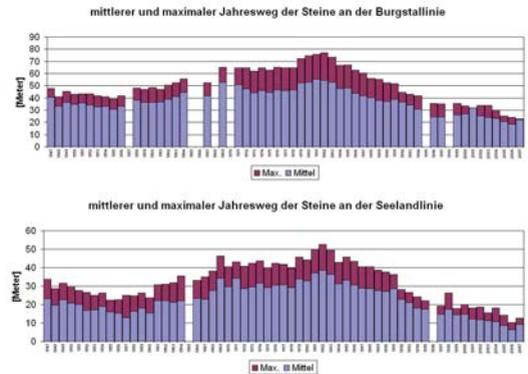


Abb. 10. Der mittlere und maximale Jahresweg der Steine an der Burgstalllinie und Seelandlinie (1947-2007), (Quelle: Institut für Geographie und Raumforschung 2009)

Die Messungen der Horizontalbewegung an der Gletscheroberfläche erfolgen nach der „Steinlinien-Methode“: Entlang von 4 Profillinien (alle außer dem Firnprofil) werden an den Messpunkten der Höhenänderung nummerierte Steinplatten hinterlegt. Diese bewegen sich auf der Gletscheroberfläche talabwärts. Der dabei zurückgelegte Jahresweg wird als Abstand zwischen den im Vorjahr hinterlegten und den jeweils am selben Punkt der Profillinie neu hinterlegten Steinen mittels Maßband gemessen. Da die Jahreswege ihr Maximum in der Gletschermittre erreichen, ist es sinnvoll, neben dem Mittelwert aus allen Steinen eines Profils auch den jeweils höchsten Jahresweg mitzuteilen (Abbildung 10). Auch die Oberflächengeschwindigkeiten lassen eine Abhängigkeit vom jeweils vorherrschenden Witterungscharakter insofern erkennen, als sich ungünstige Ernährungsbedingungen für den

Gletscher wenigstens verzögert als Phasen abnehmender Bewegung erweisen. So etwa lagen die maximalen Jahreswege an der Burgstalllinie 1981 bei 75m, in den 50er-Jahren des 20. Jahrhunderts hingegen um nur 40m.

4.3 Spezielle Untersuchungen mit modernen Technologien

Fernerkundungsmethoden zum Gletschermonitoring können in verschiedenen räumlichen, spektralen und zeitlichen Dimensionen und Maßstabebenen durchgeführt werden. Laut Käab (2005) versteht man unter räumlichen Dimensionen Punkt bzw. Linie (1D), Fläche (2D), Oberfläche inklusive Höheninformation (2,5D) und „echter“ Höheninformation (3D). Die spektrale Dimension kann monospektral, multispektral bzw. hyperspektral sein, und die zeitliche Dimension spiegelt wieder, ob Daten für einen, zwei oder mehrere Zeitpunkte zur Verfügung stehen.

Beim Gletschermonitoring werden sowohl passive als auch aktive Fernerkundungssensoren verwendet, die auf luftgestützten, weltraumbasierten oder auch terrestrischen Plattformen montiert sind. In Abbildung 11 werden die gängigsten Sensoren und Methoden zum Gletschermonitoring angeführt.

Digitale Höhenmodelle bzw. Höhenmessungen an Gletschern sind der Schlüssel zu Berechnungen des Volumens von Gletschern. Aus Volumenänderungen können Änderungen der Massenbilanz eines Gletschers abgeleitet werden, die Rückschlüsse auf Klimaänderungen zulassen. Methoden zur Generierung von Höhenmodellen aus Fernerkundungsdaten sind in Tabelle

3 aufgelistet. Der Vollständigkeit halber wurde die Tabelle durch terrestrische Methoden ergänzt, die im Untersuchungsgebiet zur Ermittlung von Höheninformationen verwendet wurden.

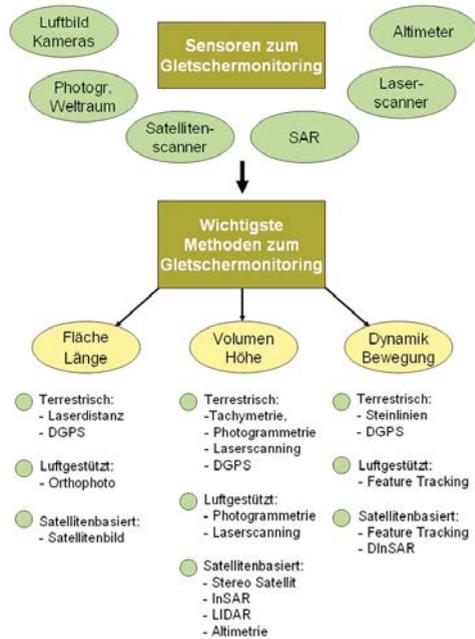


Abb. 11: Sensoren und Methoden zum Gletschermonitoring. (Quelle: Moser, 2008)

Die Fließgeschwindigkeit an der Gletscheroberfläche kann mittels optischen Luftbild- oder Satellitenbilddaten bzw. differenzieller Radarinterferometrie ermittelt werden. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über anwendbare Fernerkundungsmethoden.

Terrestrische Methoden	Luftgestützte Methoden	Satellitengestützte Methoden
Tachymetrische Methoden (Distanz, Winkel)	Photogrammetrie mit Digitalen Luftbildern von Messkameras oder gescannten Messbildern	Stereo Satellit: - Along-Track - Across-Track
Terrestrische Photogrammetrie	Digitale Luftbildphotogrammetrie mit Pushbroom Sensoren	Radarinterferometrie (InSAR)
Terrestrisches Laserscanning (TLS)	Luftgestütztes Laserscanning (ALS, LIDAR)	LIDAR Altimetrie
GNSS (z.B. DGPS)	Luftgestütztes InSAR	Radar-Altmetrie

Tabelle 3: Methoden zur Generierung von Höhenmodellen (nach Käab, 2005)

Terrestrische Methoden	Luftgestützte Methoden	Satellitengestützte Methoden
Steinlinienmethode	Feature Tracking (Orthophoto)	Feature Tracking (Orthophoto)
GNSS (z.B. DGPS)		Differenzielle Radarinterferometrie (DInSAR)

Tabelle 4: Bewegungsmessung mit Fernerkundungsmethoden (Quelle: Moser, 2008)

An der Pasterze werden seit 2001 kontinuierlich neue Methoden des Gletschermonitorings im Rahmen des FWF-Projektes „Alpchange“ erprobt. Im Folgenden sollen hier Ergebnisse von Studien über den Einsatz von Laserscanning, Differential-GPS und Luft- und Satellitenbilddauswertungen vorgestellt werden.

Terrestrisches Laserscanning an der Pasterzengunge wird seit 2001 jährlich durchgeführt. Die Ergebnisse (Abbildung 12) zeigen deutliche Einsinkbeträge am moränenfreien Teil der Gletscherzunge (C); bei (B) werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Ablationsbedingungen auf schuttbedecktem und schutfreiem Eis verdeutlicht. Am schutfreien Teil der Gletscherzunge sind die Einsinkbeträge deutlich geringer. Abbildung 13 dokumentiert die Veränderungen von 2004 auf 2005, wobei in dieser Abbildung (B) und (C) jeweils Bereiche mit ausgeprägtem Eiszerfall zeigen.

DGPS Messungen an der Pasterze wurden von Avian et. al (2007) eingesetzt, um die a) exakte Position der Gletscherumrahmung, b) Geschwindigkeitsmessungen an der „Seelandlinie“ (Mittelabschnitt der Gletscherzunge), c) Grenzbestimmung für den schuttbedeckten und den schutfreien Gletscherzungenbereich, und d) Ground Control Points als Unterstützung für das Laserscanning zu erfassen.

Der Vergleich der traditionellen und der modernen Gletschermessungen hat gezeigt, dass die Ergebnisse prinzipiell keine kontroversiellen Daten erbracht haben. Vielmehr bringt die Kombination der verschiedenen Methoden einen generellen Gewinn für das Gletschermonitoring. GPS erbringt einerseits genaue 3D Informationen (z.B. Linien und Punkte), andererseits liefert Laserscanning flächenhafte Information in annähernd gleicher Genauigkeit. Tachymetrische Messungen besitzen noch immer Vorteile in den Messungen der Oberflächenbewegung und liefern zusätzliche Informationen für die modernen Messmethoden.

Die terrestrischen Laserscanning Aufnahmen beschränkten sich bislang aufgrund des hohen Geräteaufwandes auf Teile der unteren Gletscherzunge. 2008 wurde im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Geographie und Raumforschung in Graz eine Studie mittels konventioneller Stereoauswertung von Luftbildern (1982 und 2006) des BEV durchgeführt (Moser 2008), um den Zungenbereich der Pasterze flächendeckend zu analysieren. Die Luftbilder wurden jeweils in der 3. Septemberwoche auf-

genommen und stimmen zeitmäßig mit den Gletschermessungen am Ende des Haushaltsjahres gut überein.

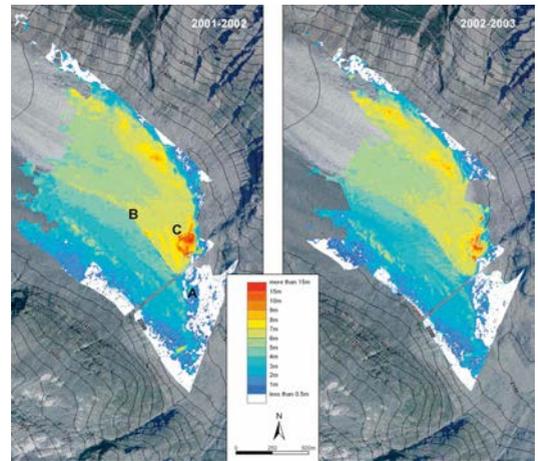


Abb. 12: Die räumliche Verteilung der Oberflächenveränderungen an der Pasterze in den Perioden 2001/2002 und 2002/2003 (Quelle: Avian et al., 2006)

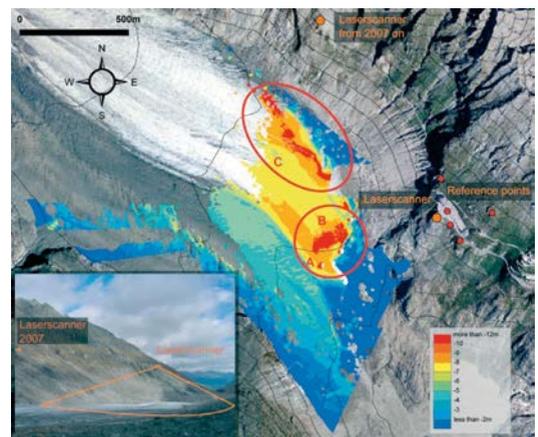


Abb. 13: Die räumliche Verteilung der Oberflächenveränderungen an der Pasterze in den Periode 2004/2005 (Quelle: Avian et al., 2007)

Die Länge der Gletscherzunge von der fiktiven oberen Begrenzung bis zum Eisrand beträgt 4680m (schuttbedeckt) und 4390m (schutfrei) für das Jahr 1982 sowie 4350m (schuttbedeckt) und 3880m (schutfrei) für das Jahr 2006. Die Längenänderung von 1982 – 2006 beträgt 510m am schutfreien Teil (21m/a) und 330m am schuttbedeckten Teil (14m/a).

Die Höhenänderung der Gletscherzunge von 1982 – 2006 wird in Abbildung 15 visualisiert. Große Verluste von über 100m bis zum maximalen Wert von -122m konnten im linken unteren Bereich der Gletscherzunge ermittelt werden.

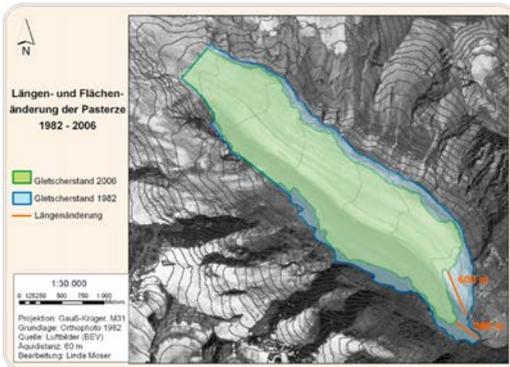


Abb. 14: Die Gletscherstand 1982 (grün) und 2006 (blau), (Quelle: Moser 2008)

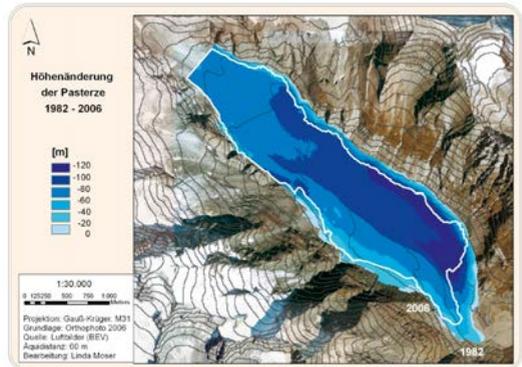


Abb. 15: Höhenverlust der Pasterzenzunge 1982 – 2006; Gletscherstand 2006 (weiße Linie), (Quelle: Moser, 2008)

4.4 Vergleich der Methoden des Gletschermonitorings

Aufgrund des Vorhandenseins sowohl einer langen Zeitreihe aus Routinemessungen als auch von Daten aus den „modernen“ Forschungen bietet sich deren Vergleich an. Damit soll das Gletschermonitoring, sollten sich kostengünstigere und genauere Methoden auf tun, langfristig vereinfacht – das Hauptproblem ist die schwierige Zugänglichkeit der Gletscher – und verbessert werden. Im Folgenden werden einige Ergebnisse aus diesem laufenden Methodenvergleich präsentiert:

Kellerer-Pirklbauer et al. (2007) verglichen tachymetrische Messwerte am schuttbedeckten und schutfreien Teil der Pasterzenzunge mit digitalisierten Höhenmodellen, die für die Jahre 1964, 1981 und 2000 aus Karten erstellt wurden. Zusammengefasst waren die wichtigsten Ergeb-

nisse (Abbildung 16): Der Volumenverlust war in der Periode von 1981-2000 um das 2,3fache größer als in der Periode 1964-1981. Die Höhenänderungen von 1981-2000 betrugen -70m an der Gletscherstirn und -40m im oberen Teil der Gletscherzunge. Durchschnittlich verlor der schuttbedeckte Teil der Gletscherzunge 41,6m und der schutfreie 55m. Im Jahr 1964 nahm der schuttbedeckte Teil der Gletscherzunge 5,4% der gesamten Gletscheroberfläche ein, bis zum Jahr 2001 vergrößerte sich der Flächenanteil auf 7,3%. Durch die Zunahme der Schuttbedeckung auf dem rechten Teil der Gletscherzunge vergrößern sich die Unterschiede zwischen den beiden Gletscherteilen zunehmend, was sowohl mit den tachymetrischen Messungen als auch mit Auswertungen dieser Art gezeigt werden kann,

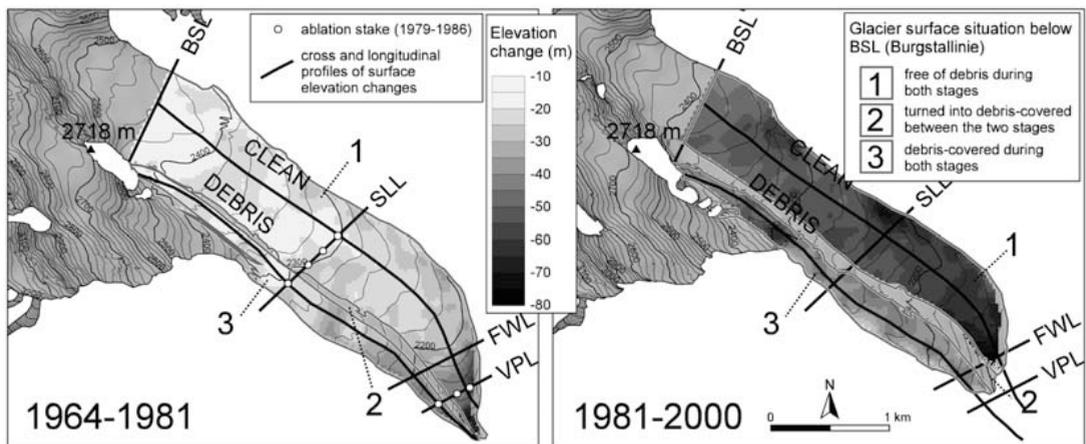


Abb. 16: Höhenänderungen der Pasterze unterhalb der Burgstalllinie (BSL) basierend auf Subtraktion digitaler Höhenmodelle. a) 1964-1981, Isohypsen 1981, b) 1981-2000, Isohypsen 2000. Schutfreier Bereich in jeweils beiden Jahren (1), Bereich, der während der Periode schuttbedeckt wurde (2), vorher und nachher schuttbedeckter Teil (3) (Quelle: Kellerer-Pirklbauer et al., 2007)

Die tachymetrisch eingemessenen Koordinaten aller Messpunkte der 3 Profillinien an der Gletscherzunge wurden mit den aus den Luftbildern berechneten DHMs mit Auflösungen von 3m, 5m und 10m (2006) und 5m und 10m (1982) verglichen. Zusätzlich wurde auch noch das 10m-DHM des BEV aus dem Jahr 2006 miteinander bezogen.

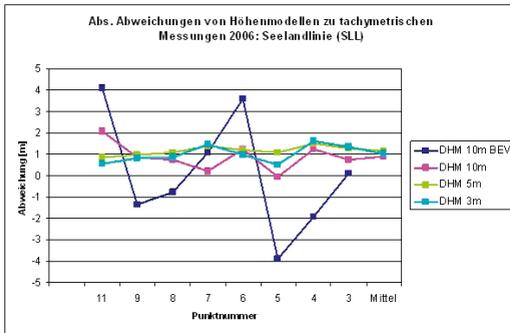


Abb. 17: Absolute Abweichungen von Höhenmodellen zu tachymetrischen Messungen 2006, (Quelle: Moser, 2008)

An der in der Mitte der Gletscherzunge gelegenen Seelandlinie (Abbildung 17) zeigte der Vergleich die geringsten Abweichungen zu den terrestrischen Messungen. Die Tendenz ist, dass alle Messungen im Mittel um einen Meter zu hoch liegen. Nur das 10m-DHM des BEV weist Werte von -3,90 bis +4,10 m auf und weist eine sehr hohe Streuung auf. Ein Grund für die Abweichung liegt auch in der kleinreliefierten Topographie des Gletscherabschnittes, wo sich aufgrund der Spalten auf kurzer Distanz relativ rasch Höhenunterschiede über den Meterbereich einstellen

Hall et al. (2001, 2003) erarbeiteten Anfänge satellitengestützten Gletschermonitorings an der Pasterze und analysierten Abweichungen der Gletscherstände aus alten topographischen Karten und rezenten Satellitenbildern. Verwendet wurden Alpenvereinskarten verschiedener Jahre, die älteste Karte war die Spezialkarte von Österreich-Ungarn (1893), zitiert bei Hall et al. (2003). Weiters standen 8 Landsat-Szenen zur Verfügung, die vom Jahr 1976 (MMS) bis 2001 (ETM+) reichten. Zusätzlich wurden noch zwei Ikonos-Bilder aus den Jahren 2000 und 2001 verwendet. Die Messgenauigkeit ist von drei Faktoren abhängig: Von der Koregistrierung, der Pixelauflösung und der Genauigkeit des Gletscherstandes auf den topographischen Karten, welche nicht überprüft werden konnte. Alle Satellitenbilder und Karten wurden auf eine Landsat-Szene von 1984 mit einer Auflösung von 28,5m

koregistriert. Die erreichte Genauigkeit für Karten und Landsat-Szenen wurde mit $\pm 0,5$ Pixel angegeben - was in etwa ± 14 Meter entspricht - mit Ausnahme von Landsat MSS (± 23 m). Die Ikonos-Szenen lagen bereits georeferenziert vor. Die Genauigkeit der Koregistrierung in Kombination mit der Messgenauigkeit ergab mögliche fragwürdige Abweichungen von ± 54 m für TM und ETM+, und ± 136 m für MSS. Jedoch wurde lediglich eine Abgrenzung des schutfreien Gletschersees vorgenommen, da der schuttbedeckte Teil der Pasterze von der Umgebung nicht abgrenzbar war. Diese Methode eignet sich nur bedingt für einen so gut dokumentierten Einzeltgletscher wie die Pasterze. Für großräumige Inventuren in entlegenen Hochgebirgen der Erde liefert sie hingegen ausreichend Informationen über die Veränderungen von Gletscherflächen.

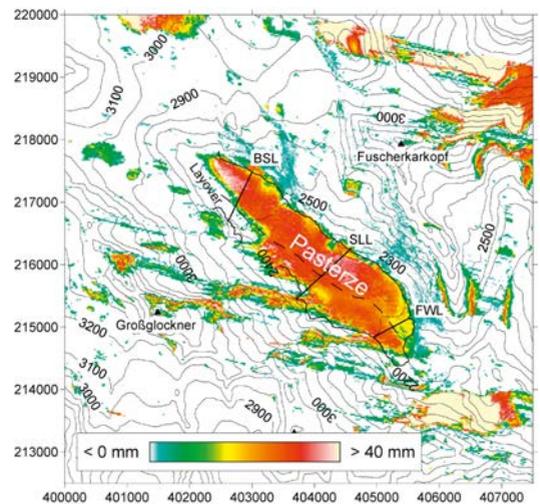


Abb. 18: Geokodiertes differentielles SAR-Interferogramm des Orbit-Bildpaares 20.8.–21.8.1995. (Quelle: Kaufmann et al., im Druck)

V. Kaufmann et al. (2005 und im Druck) untersuchten die messtechnische Erfassung der Gletscherbewegung (Oberflächendeformation) der Pasterze mittels satellitengestützter (ERS-1/2) differentieller SAR-Interferometrie (DINSAR). Für die Bewegungsanalyse standen SAR-Bilddaten von Sommermonaten zur Verfügung. Eines von drei vorhandenen Bildpaaren der ERS Tandem-Mission wies für den Zungenbereich der Pasterze genügend Kohärenz auf, um daraus ein aussagekräftiges Interferogramm (Bewegungsbild) ableiten zu können (Abbildung 18). Für den eintägigen Beobachtungszeitraum im August 1995 wurden maximale Oberflächenverschiebungen von 30–40 mm/Tag in SAR-Blickrichtung festgestellt.

Ausgehend von diesem Messergebnis, welches um den Einfluss einer abgeschätzten mittleren Ablation von 2cm/Tag korrigiert wurde, kann unter vereinfachten Annahmen, wie z. B. oberflächenparalleles Fließen und über das Jahr gleich bleibende Fließgeschwindigkeit, eine maximale jährliche Fließgeschwindigkeit der Gletscherzunge der Pasterze von 20–30m für das Jahr 1995 abgeschätzt werden (Kaufmann et. al. im Druck).

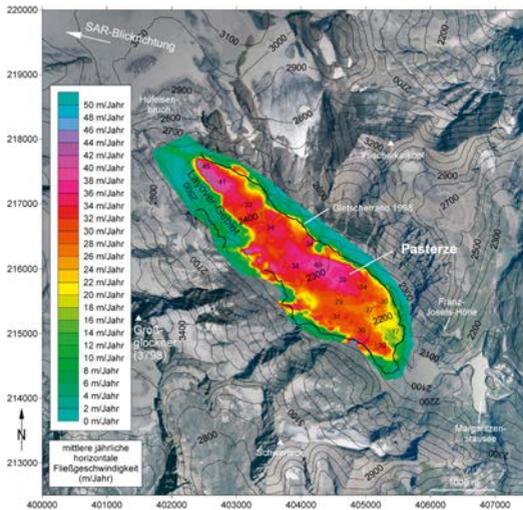


Abb. 19: Die geschätzte mittlere horizontale Jahresfließgeschwindigkeit der Pasterze abgeleitet aus dem eintägigen ERS-1/2 Interferogramm für den Zeitraum 20.8.1995–21.8.1995, (Quelle: Kaufmann et al., im Druck)

5. Zusammenfassung und Diskussion

Die Ergebnisse der Methodenvergleiche, die u.a. im Rahmen der Forschungsaktivitäten der Autoren weitergeführt werden, haben gezeigt, dass alle Methoden ihre speziellen Stärken – und sei es nur die Kostengünstigkeit oder einfache Durchführbarkeit auch für Nicht-Fachleute haben und keine ohne weiters die andere ersetzen kann. Aus diesem Grund ist die Zweckmäßigkeit von Fall zu Fall neu zu prüfen und im Idealfall eine Kombination mehrerer Methoden einzusetzen, wie dies in den meisten modernen Forschungsprojekten auch geschieht.

Literaturverzeichnis

[1] ALPCHANGE (2009): www.alpchange.at (Zugriff: 08/2009)

[2] Avian M and Bauer A. (2006): First Results on Monitoring Glacier Dynamics with the Aid of Terrestrial Laser Scanning on Pasterze Glacier (Hohe Tauern, Austria). In: Proceedings of the 8th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography (V.

Kaufmann and W. Sulzer, ed.). Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung, Bd. 41, 27-36.

[3] Avian M., Lieb G.K., Kellerer-Pirklbauer A. and Bauer, A. (2007): Variations of Pasterze Glacier (Austria) Between 1994 and 2006 – Combination of Different Data Sets for Spatial Analysis. In: Proceedings of the 9th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography (V. Kaufmann and W. Sulzer, ed.). Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung, Bd. 43, 79-88.

[4] Bayr K.J., Hall D.K. and Kovalick W.M., (1994): Observations on glaciers in the eastern Austrian Alps using satellite data. In: International Journal of Remote Sensing, 15(9):1733-1752.

[5] Bätzing W. (2007): Gletscher im Treibhaus – die Klimaerwärmung und ihre Folgen für die Alpen. In: Jahresmitteilungen der Naturhistorischen Gesellschaft Nürnberg, 2007, Nürnberg, 31-40.

[6] Böhm R., Schöner W., Auer I., Hynek B., Kroisleitner Chr. and Weyss G. (2007): Gletscher im Klimawandel – Vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Hohen Tauern. Eigenverlag der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, 111S.

[7] Endlicher W. and Gerstengarbe W. (Hrsg., 2007): Der Klimawandel – Rückblicke, Einblicke und Ausblicke. Potsdam, 134 S.

[8] Gspurning J., Tintor W., Tribusser M. and Wakonigg H. (2004): Volumen- und Flächenänderungen an der Pasterze von 1981 bis 2000. In: Carinthia II, 194./114. Jahrgang, Klagenfurt, 463-472.

[9] Geiser E. (2006): Frozen Chrysolmelids from Alpine Glaciers – Witnesses of the Postglacial Resettlement. In: Bonner zoologische Beiträge, Band 54, Heft 4 239-245.

[10] Haberli W. ; W., Hoelzle W. und Maisch M. (1998): Gletscher – Schlüsselindikatoren der globalen Klimaänderung. In: Lozán J. L., Graßl H. und Hupfer, P.(Hrsg.): Warnsignal Klima. Wissenschaftliche Fakten. Hamburg, S. 213 – 221.

[11] Haeberli W. und Maisch M. (2007): Klimawandel im Hochgebirge. In: Endlicher W. und Gerstengarbe W. (Hrsg., 2007): Der Klimawandel – Rückblicke, Einblicke und Ausblicke, 98-107.

[12] Hall D.K., Bayr, K., Bindschadler, R.A., und Schöner, W. (2001): Changes in the Pasterze Glacier, Austria, as Measured from the Ground and Space, - 58th Eastern Snow Conference Ottawa, Ontario, Canada, 2001.

[13] Hall D.K., Bayr, K., Schöner, W., Bindschadler, R.A. und Chien, J.Y.L. (2003): Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893-2001). – Remote Sensing of Environment, 86, S.566-577.

[14] Herbst P., Flandera, T. and Neubauer, F., 2002: A three-dimensional model of the Pasterze glacier, Austria. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Bd. 38, Heft 2, 179-184.

[15] Ivy-Ochs S., Kerschner H., Maisch M., Christl M., Kubik P.W. and Schluchter Chr. (2009): Latest Pleistocene and Holocene glacier variations in the European Alps. Quaternary Science Reviews xxx (2009) 1–13

[16] Käab A. (2005): Remote sensing of mountain glaciers and permafrost creep. Schriftenreihe Physische Geographie. 48, 266 p.

- [17] Kaufmann V., Kenyi L.W. und Avian M. (2005): Messung der Fließgeschwindigkeit von Gletschern mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie in der Schobergruppe (Nationalpark Hohe Tauern). Gletscherbewegungsmessung mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie am Beispiel der Pasterze (Glocknergruppe, Hohe Tauern, Kärnten) - Endbericht zum Forschungsprojekt des Kärntner Nationalparkfonds, 43-56 S.
- [18] Kaufmann V., Kellerer-Pirklbauer, L. und Wan I. (im Druck) Gletscherbewegungsmessung mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie: Die Pasterze (Glocknergruppe, Hohe Tauern, Kärnten). In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 42/1 (2008), S. 85–104.
- [19] Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Avian M., Gspurning, J. (2007): 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*, Volume 90 Issue 4, Pages 269 – 285.
- [20] Kellerer-Pirklbauer A. (2008): The Supraglacial Debris System at the Pasterze Glacier, Austria: Spatial Distribution, Characteristics and Transport of Debris. In: *Z. Geomorph. N.F.* 52, Suppl. 1: 3-25.
- [21] Lieb, G. K. (1999): Die Pasterze in Vergangenheit und Zukunft – 150 Jahre Gletscherforschung. – In: *Ewiges Eis? Eine Tagung zum Rückgang der Gletscher in den Alpen in Heiligenblut*. Tagungsbericht. Nationalparkakademie Hohe Tauern, 49-52.
- [22] Lieb G. K. und Slupetzky, H. (2004): Gletscherweg Pasterze. - Naturkundlicher Führer zum Nationalpark Hohe Tauern, Band 2, Innsbruck, 122 S.
- [23] Moser L. (2008): Fernerkundungsmethoden zum Gletschermonitoring – Einsatz ausgewählter Luftbilder und Orthofotos. Unveröff. Diplomarbeit am Institut für Geographie und Raumforschung der Universität Graz, Graz, S.199.
- [24] Moser L., Sulzer W. and Avian M. (2009): Monitoring of Glacier Variability at Pasterze Glacier (Austria) between 1982 and 2006 Using Very High Resolution Aerial Imagery. *Geophysical Research Abstracts*, ol. 11, EGU2009-846, 2009; EGU General Assembly 2009
- [25] Nicolussi K. and Patzelt G. (2000): Discovery of Early Holocene wood and peat on the forefield of the Pasterze Glacier, Eastern Alps, Austria. - *The Holocene* 10/2: 191-199.
- [26] Nicolussi K. and Patzelt G. (2001): Untersuchungen zur holozänen Gletscherentwicklung von Pasterze und Gepatschferner (Ostalpen). - *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 36: 1-87.
- [27] Oerlemans J. (2005): Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science*, 308(5722), 675-677.
- [28] Schöner W. (2009): Paläoklimainformationen aus Kenngrößen der Gletschermassenbilanz – Beispiele für die Alpen seit der ausgehenden Kleinen Eiszeit. In: *Alpine Space - Man & Environment*, Vol. 6: Klimawandel in Österreich, Innsbruck University Press, 127-144.
- [29] Slupetzky H. (1993): Holzfunde aus dem Vorfeld der Pasterze. Erste Ergebnisse von 14C-Datierungen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 26/2: 179-187.
- [30] Slupetzky H., Krisai R. und Lieb G.K. (1998): Hinweise auf kleinere Gletscherstände der Pasterze (Nationalpark Hohe Tauern, Kärnten) im Postglazial. Ergebnisse von 14C-Datierungen und Pollenanalysen. In: *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Nationalpark Hohe Tauern* 4: 225-240.
- [31] Van Husen D. (1987): Die Ostalpen in den Eiszeiten. *Popularwiss. Veröffentlichung der Geologischen Bundesanstalt*, Wien, 24 S.
- [32] Wakonigg H. 2007: *Klima im Wandel*. LIT Verlag, Wien, Wien, 188S.
- [33] Wakonigg H. und Lieb G. K. (1996): Die Pasterze und ihre Erforschung im Rahmen der Gletschermessungen. - In: *Wissenschaft im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten*. Kärntner Nationalpark-Schriften 8, Großkirchheim, 99-115.
- [34] Weber M. (2004): Mikrometeorologische Prozesse bei der Ablation eines Alpengletschers. Dissertation an der Universität Innsbruck, Innsbruck, 311S.
- [35] World Glacier Monitoring Service (2009): www.geo.unizh.ch/wgms (Zugriff: 08/2009).
- [36] Zemp M, Haeberli W, Hoelzle M., Maisch M. und Paul F. (2007). Europäische Alpen bald ohne Gletscher? In: *Jahrbuch Ökologie, Becksche Reihe*, München, 68-83.
- [37] Zryd A. (2008): Eine kleine Geschichte der Gletscher – Alpengletscher im Klimawandel. Haupt Verlag, Zürich, 140S.

Anschrift der Autoren

Ass. Prof. Mag. Dr. Wolfgang Sulzer, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl Franzens Universität Graz, Heinrichstrasse 36, A-8010 Graz.
E-Mail: wolfgang.sulzer@uni-graz.at

Ao. Univ. Prof. Mag. Dr. Gerhard Karl Lieb, Institut für Geographie und Raumforschung, Karl Franzens Universität Graz, Heinrichstrasse 36, A-8010 Graz.
E-Mail: gerhard.lieb@uni-graz.at

Vortragender

Ass.-Prof. Dr. Wolfgang Sulzer

- 1990 Sponision zum Mag.rer.nat. Geographie
- 1990 Vertragsassistent am Institut für Geographie
- 1994 Forschungsaufenthalt in Dresden (Institut für Kartographie an der Technischen Universität Dresden)
- 2000 – 2006 Universitätsassistent am Institut für Geographie und Raumforschung
- seit 2006 Ass. Prof. am Institut für Geographie und Raumforschung

Forschungsbereiche:

Physische Geographie und Fernerkundung, Veränderungen von Natur- und Kulturlandschaften in Hochgebirgsräumen im Bereich Alpen, Himalaya und Anden. 10 Jahre Mitglied im Gletscheresmessteam der Glockner- und Schobergruppe.