



Überblick

Die ungewisse Zukunft der Gletscher

Ein modernes Hochgebirgsumweltlabor: Seit 50 Jahren betreibt die Akademie Gletscherforschung, insbesondere auch am Vernagtferner in den Öztaler Alpen. Er dürfte heute einer der am besten erforschten Gletscher weltweit sein.

VON REINER RUMMEL UND CHRISTOPH MAYER



einmalige Messreihe unterschiedlicher Parameter des Vernagtferners in den Öztaler Alpen und zusätzlicher Datensätze ausgewählter Gletscher in den Ostalpen. In den kommenden Jahren soll die vermehrte Nutzung moderner Satellitenmessverfahren und die Verknüpfung mit Bodenmessungen und erweiterten Modellansätzen den Schluss vom lokalen System Vernagtferner auf das Verhalten der Gletscher in anderen Regionen unserer Erde erleichtern.

Gletscherforschung an der Akademie

1962 entstand auf Initiative von Richard Finsterwalder (1899–1963, Akademiemitglied seit 1952) die Kommission für Glaziologie, die heutige Kommission für Erdmessung und Glaziologie. Sie begann ihre Arbeiten mit der systematischen geodätischen Erfassung verschiedener Gletscher der bayerischen und österreichischen Alpen. Schon lange vorher beschäftigten sich Hermann von Schlagintweit (1826–1882; Akademiemitglied ab 1862) und seine Brüder im 19. Jahrhundert mit Gletscherforschung in den Alpen und in Asien. Sie beschrieben unter anderem auch den Vernagtferner nach seinem letzten schnellen Vorstoß bis in das Rofental im Jahr 1845 – zu einer Zeit, als mit den Arbeiten von Louis Agassiz (1807–1873) überhaupt erst die Erforschung der Eiszeiten begann.

Der Beginn der Messreihe des Vernagtferners geht zurück auf Sebastian Finsterwalder (1862–1951; Akademiemitglied ab 1903), einen herausragenden Mathematiker mit ausgeprägtem Interesse an geodätischen Messverfahren und der Vermessung und Kartierung von Gletschern. Mit seiner ersten Vermessung aus dem Jahr 1889 begann die wissenschaftliche Beobachtung des Vernagtferners, die heute mehr als 120 Jahre umfasst und seit 50 Jahren von der Akademiekommission betreut wird. Bisher wurden 12 Kartierungen erstellt sowie über längere Zeiträume die Eisbewegung und die Eisdicke im Zungenbereich bestimmt. Seit 50 Jahren werden jeweils die jährlichen und saisonalen Massenbilanzen dokumentiert. Die Daten werden parallel mit komplementären Verfahren erhoben, der geodätischen und der glaziologischen Methode. Seit 1974 (im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 81 der DFG) werden diese Beobachtungen durch die Erfassung des Abflusses aus dem Gletschergebiet erweitert und um zunehmend komplexere meteorologische Aufzeichnungen ergänzt. Der Vernagtferner wurde so zum modernen Hochgebirgsumweltlabor.

Abb. 1: Lager an der Gorbunov Station (2009), oberhalb des Fedtschenko Gletschers in 4.200 m Höhe. Der Fedtschenko Gletscher im Pamir (Tadschikistan) ist einer der größten Gebirgsgletscher der Welt (72 km lang) und wurde 1928 schon von Richard Finsterwalder eingehend untersucht. Die Kommission für Erdmessung und Glaziologie befasst sich seit 2009 wieder mit der wissenschaftlichen Untersuchung des Gletschers.

NACH DEM ENDE des letzten Gletscherhochstandes um 1850 hat sich die Fläche der Alpengletscher in den zurückliegenden 150 Jahren beinahe kontinuierlich und mittlerweile sogar beschleunigt verkleinert, nur sporadisch unterbrochen von kurzen Gletschervorstößen. Obwohl der momentane Rückzug evident erscheint, so ist er dennoch in seinen Wechselwirkungen mit Atmosphäre, Wasserhaushalt und fester Erde komplex und in diesem Bezugssystem immer noch nicht voll verstanden. Eine grundlegende Voraussetzung für die Erforschung solcher Wechselwirkungen im Erdsystem sind lange, umfassende und sehr genaue Messreihen. Dank des Weitblicks einiger ihrer Mitglieder verfügt die Bayerische Akademie der Wissenschaften heute über eine weltweit

Modellvorstellung eines Gletschers

Gletscher stehen in Wechselwirkung mit den anderen Komponenten des Erdsystems: über den Strahlungshaushalt, den Niederschlag und die Verdunstung mit der Atmosphäre, über die Eisschmelze und den Abfluss mit dem regionalen Wasserhaushalt und, da die Eismassen Schutzschild, Auflast und Erosionsursache sind, auch mit der festen Erde. Jeder Gletscher hat jedoch sein eigenes charakteristisches Verhalten, das geprägt ist sowohl von der Beschaffenheit des Untergrunds und der Umgebung wie auch vom lokalen Klima, d. h. den Windverhältnissen, dem Feuchtetransport und der Strahlungsbilanz vor Ort. Damit ergibt sich die in Abbildung 2 dargestellte Grundstruktur eines theoretischen Gletschermodells mit den Wechselwirkungen zur Umwelt und den Komponenten des Erdsystems.

Vom Einzelgletscher zum Klimaindikator

Das Mikroklima und die lokale Beschaffenheit von Untergrund und Umgebung tragen wesentlich zur Komplexität des Gletscherverhaltens bei und erschweren den Schluss vom Verhalten eines Einzelgletschers auf das einer ganzen Gletscherregion. Es ist jedoch unbestritten, dass die Gletscherentwicklung ein sehr wichtiger Klimaindikator ist. Zudem tragen diese Änderungen zum beobachteten mittleren Meeresspiegelanstieg um circa 3 mm pro Jahr bei. Die Ursachen hierfür sind einerseits

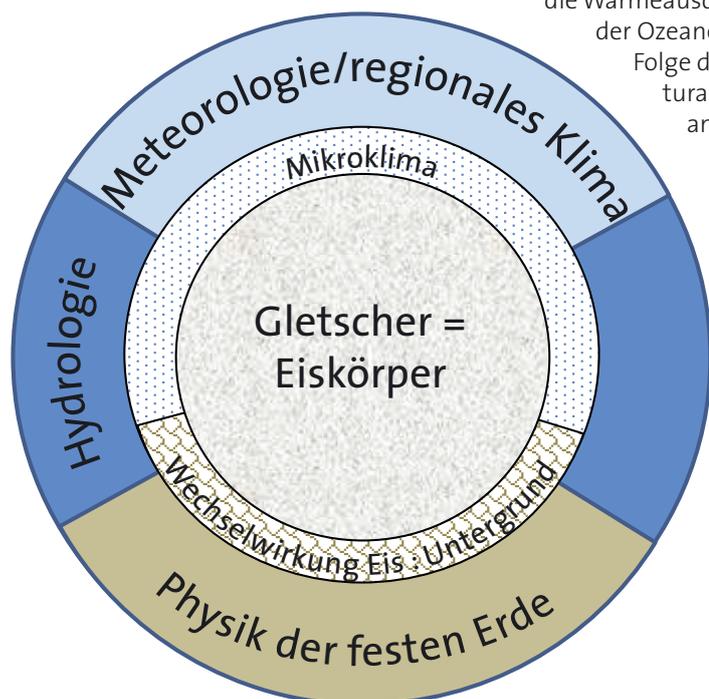
die Wärmeausdehnung der Ozeane als direkte Folge des Temperaturanstiegs und andererseits

der Masseneintrag in die Ozeane durch das Abschmelzen der Eisgebiete als indirekte Folge.

Beim Masseneintrag denkt man vielleicht in erster Linie an das Abschmelzen der großen Eisschilde Grönlands und der Antarktis. Es mag daher überraschen, dass Gebirgsgletscher (also die Gletscher *ohne* die Eisschilde Grönlands und der Antarktis) zwar nur 0,5 % zum gesamten Eisvolumen der Erde beitragen, ihr Anteil am Meeresspiegelanstieg aus der Eisschmelze derzeit jedoch mit bis zu 70 % beziffert wird. In einer aktualisierten Studie wurden 2011 die Einzelbeiträge zum Meeresspiegelanstieg erneut bilanziert, wobei man von einem momentanen Meeresspiegelanstieg pro Jahr zwischen 2,6 mm (aus Gezeitenpegeln) und 3,2 mm (abgeleitet aus der gemeinsamen Analyse von Satellitenaltimetrie und Gezeitenpegeln) ausgeht. Die Ergebnisse zeigen einen Masseneintrag durch Eisschmelze in die Ozeane, der etwa doppelt so groß ist wie der Anstieg in Folge der Wärmeausdehnung der Ozeane, d. h. ca. 1,75 mm pro Jahr gegenüber 0,9 mm pro Jahr. In dieser Bilanz liegt der Beitrag der Gebirgsgletscher immerhin bei ca. 1,0 mm pro Jahr.

Der Klimatologe Atsumu Ohmura skizzierte 2011 in der Zeitschrift „Surveys in Geophysics“ den Weg von einer globalen Inventur aller Gebirgsgletscher zu repräsentativen Aussagen des regionalen Gletscherverhaltens. Insgesamt gibt es ca. 200.000 Gletscher weltweit, von denen rund 110.000 mit Lage und Größe im World Glacier Inventory (WGI) aufgenommen sind. Von 27 vergletscherten Regionen sind laut Ohmura nur für 16 einigermaßen vollständige Erhebungen verfügbar. Gleichzeitig liegen aber weltweit nur für 35 Gletscher jährliche und saisonale Massenbilanzen über einen Zeitraum von mehr als 30 Jahren vor. Das Wissen über die Beziehung zwischen der Klimaentwicklung und der Gletscherreaktion stützt sich ganz wesentlich auf diesen zahlenmäßig und regional beschränkten Datensatz, wobei große Anstrengungen unternommen werden, vor allem die regionale Verteilung von Massenbilanzreihen gleichmäßiger auszudehnen. Trotzdem bilden die existierenden, langfristigen Reihen auch weiterhin das Fundament der derzeitigen und zukünftigen Untersuchung der klimabezogenen Gletscherreaktion.

Abb. 2: Konzeptionelles Schema eines Gletschermodells im Erdsystem.



Gletscherforschung aus dem All

Der Vernagtferner im Ötztal dürfte weltweit einer der am besten erforschten Gletscher sein. Um vom Hauslabor Vernagtferner auf allgemeingültigere Aussagen über das Verhalten der Gletscher zu schließen, ist primär der Vergleich



mit Messdaten und Erhebungen aus anderen vergletscherten Gebieten der Erde nötig. Daher beteiligten sich die Wissenschaftler der Kommission seit Anbeginn gezielt an Expeditionen und Messkampagnen zu anderen Gletscher- und Eisregionen. Beispiele sind die systematische und langfristige Erfassung der verbliebenen bayerischen Alpengletscher, die regelmäßige Kartierung einer Auswahl repräsentativer Ostalpengletscher, die Teilnahme an Expeditionen in die Polargebiete und die Arbeiten im Tien Shan, im Himalaya, dem Pamir und im Karakorum. Schon heute werden diese Felddaten zusammen mit Erkenntnissen aus Fernerkundungsmethoden bearbeitet und sollen künftig verstärkt mit modernen Satellitenmessverfahren kombiniert und analysiert werden.

Eines der drei praktizierten Verfahren zur Massenbilanzierung von Gletschern, die geodätische Methode, wurde durch Richard Finsterwalder etabliert. Dabei werden Änderungen der Oberflächengeometrie und damit Volumenänderungen des Gletschers erfasst, die aus unterschiedlichen Verfahren gewonnen werden können (z. B. Photogrammetrie oder Laserscanning). Das Satellitenmessverfahren InSAR, d. h. der interferomet-

rische Einsatz von Synthetic Aperture Radar (SAR), beruht auf dem gleichen Ansatz. Aus der wiederholten Aufnahme von Gletscherflächen lässt sich analog zum terrestrischen Verfahren die Massenbilanz erstellen, allerdings parallel und gleichzeitig für eine nahezu beliebig große Auswahl von Einzelgletschern. Zudem macht es die differentielle Nutzung von InSAR möglich, die Oberflächenfließgeschwindigkeiten der Eismassen zu rekonstruieren. Neben Volumenänderungen und Fließgeschwindigkeiten aus InSAR lassen sich auch andere Parameter wie Oberflächentemperatur, Feuchte, Windgeschwindigkeit, Schneebedeckung oder Schneeschichtung aus Satellitendaten ableiten, also wichtige Eingangsinformationen für die Modellierung der Klima-Gletscher-Beziehung. Einen programmatischen Rahmen für die Erforschung der Kryosphäre aus dem All bietet das erdwissenschaftliche Programm der Europäischen Raumfahrtagentur ESA „The Changing Earth“ (2005).

Ein völlig neues und äußerst erfolgreiches Welt-raummessverfahren ist die Satellitengravimetrie. Die amerikanisch-deutsche Satellitenmission GRACE befindet sich seit 2002 in einer Umlaufbahn und misst die zeitlichen Veränderungen der Erdanziehung. Die Ursachen dieser Veränderungen sind unter anderem das Ungleichgewicht in der Massenbilanz der Eismassen und als

Abb. 3: Einstrom des Nalifkin Gletschers in den Fedtschenko Gletscher bei 4.400 m Meereshöhe. An dieser Stelle führte Richard Finsterwalder 1928 Geschwindigkeitsmessungen auf dem Gletscher durch.

Bisher existieren verschiedene Modelle, die sehr spezifische Prozesse mit unterschiedlicher Umsetzung physikalischer Prinzipien beschreiben. Für die Analyse der Energieflüsse an der Oberfläche des Gletschers werden völlig andere Ansätze benötigt als für die Beschreibung der Deformation des Eises. Basales Gleiten basiert auf anderen physikalischen Grundgleichungen als die Abflussgenerierung durch Eisschmelze. Zudem wirken die einzelnen Mechanismen auf sehr unterschiedlichen Zeitskalen. Während sich die kurzweilige Strahlung im Sekundentakt ändert, sind Änderungen der Eisauflast auf den Untergrund nur über Jahrzehnte und mehr signifikant. Dies alles gilt es zu bedenken, wenn ein Gletscher – und in viel stärkerem Maße ein vergletschertes Gebiet – modellhaft beschrieben werden soll. In einem ersten Ansatz ist es daher sinnvoll, die Wechselwirkung der Oberflächenmassenbilanz (Energie- und Massenhaushalt) mit der Dynamik eines Gletschers zu verknüpfen. Dazu gibt es bereits wichtige Vorarbeiten, die weiterentwickelt und präzisiert werden. Aufbauend auf einem solchen gekoppelten Bilanz-Dynamikmodell können sukzessive weitere Bausteine eingefügt und so ein flexibles, vielseitig einsetzbares Systemmodell entwickelt werden. Die vielfältigen Untersuchungsgebiete der Glaziologie an der Akademie ermöglichen es, solch ein Modell auf unterschiedlichen Skalen zu testen und zu validieren. Diese Arbeiten erfordern allerdings eine Kombination der existierenden Kompetenz in der Glaziologie mit der Kapazität und der Erfahrung in anderen Gruppen und einen intensiven Austausch, um zu einem erfolgreichen Ergebnis zu kommen.

Messen, modellieren und vorhersagen

Im Niederländischen lässt sich schön formulieren „meten is weten“, das heißt „messen ist wissen“. Natürlich ist das möglichst umfassende Messen der Veränderungen von Gletschern eine Grundvoraussetzung für das Verständnis von deren Veränderungsprozessen. Nur aus einer gleichwertigen Behandlung von Messung und Modellierung wird es jedoch möglich werden, zu belastbaren Vorhersagen zu kommen, um so die klassische Kette von Messprozess – Modell – Vorhersage – verbesserte Messansätze – besseres Modell usw. fortzuführen. In Abbildung 4 ist dieser Zusammenhang dargestellt unter dem Thema „Die Erforschung des physikalischen Verhaltens von Eiskörpern in ihrer Beziehung zu den Messverfahren und zu den Komponenten des Erdsystems“.

Ausblick

Die Glaziologie an der Bayerischen Akademie der Wissenschaften hat bemerkenswerte Erkenntnisse zum Verhalten der Gletscher in den Ostalpen hervorgebracht. Fünfzig Jahre Kommissionsarbeit, zahllose Messkampagnen der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vor Ort, aber auch die Arbeiten der frühen Akademiemitglieder Hermann von Schlagintweit, Sebastian Finsterwalder und Albrecht Penck schufen hervorragende Voraussetzungen für die nun folgende Phase der Gletscherforschung an der Akademie. Eine Übersicht über die bisher geleisteten Arbeiten und die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind in einem Sonderheft der „Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie“ zum 50. Jahrestag der Forschung am Vernagtferner zusammengefasst. Es bleiben noch viele Fragen, die bisher nur ansatzweise beantwortet sind.

Beispiele sind:

- Verabschieden sich alpine Gletscher aus den hochalpinen Tälern?
- Beschleunigt sich dieser Prozess?
- Was sind die Ursachen des Rückzugs und der zwischenzeitlichen Vorstöße?
- Wie verändern sich die hydrologischen Regimes der Alpenregion?
- Was sind die Auswirkungen auf Gebirgsbildung, Erosion, Umwelt, Bewuchs?

Was die Methodik anbelangt, ist die Absicht,

- Modellierung und Datenassimilation zu verstärken,
- neuartige Messverfahren, etwa die terrestrische Gravimetrie, am Gletscher zu testen,
- über Satellitenverfahren und Messkampagnen vor Ort vom Hauslabor zu grundsätzlichen Aussagen zu Gebirgsgletschern zu kommen, um damit gleichzeitig
- eine Brücke zu anderen Klimaindikatoren, z. B. dem Meeresspiegel, zu schlagen.

Die Arbeiten der Kommission werden bis zum Jahr 2015 aus dem Akademienprogramm von Bund und Ländern finanziert. In diesem Rahmen wurden die Forschungen in regelmäßigen Abständen von externen Gutachtern evaluiert. Durch die Zusammenlegung von Erdmessung und Glaziologie im Jahr 2010 wurde in der Akademie eine größere Forschungseinheit geschaffen; eine stärkere Anbindung an die beiden Münchner Universitäten erschließt ergänzende Fachkenntnis. Damit sind die Rahmenbedingungen geschaffen für die nun anstehende, neue Phase der Gletscherforschung an der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. ■

DIE AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Reiner Rummel ist Mitglied der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und leitet ihre Kommission für Erdmessung und Glaziologie. Er hatte bis vor kurzem den Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie an der TU München inne.

Dr. Christoph Mayer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Kommission. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der fernerkundlichen und geophysikalischen Beobachtung von Gletschern weltweit.