

Planet Erde

Ein „Weight Watchers“-Programm für Gletscher

Weltweit verzeichnen Forscher einen zunehmenden Rückgang der Gebirgsgletscher. Mit einem neuen methodischen Ansatz versucht die Kommission für Erdmessung und Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften den entsprechenden Gewichtsverlust der Gletscher direkt zu vermessen. Im März 2014 begann hierfür eine Messreihe am Svartisen, einem Gletscher in Nordnorwegen – in einem spektakulären Labor unter einer 200 Meter dicken Eisschicht.

Abb. 1: Vermessungsarbeiten zur Koordinatenübertragung in das Tunnelsystem. Im Hintergrund: der Moränensee Engabrevatnet und der Holandsfjord.



VON CHRISTIAN GERLACH

Abb. 2: Das tragbare Relativgravimeter der KEG, das nach dem Prinzip der Federwaage arbeitet (links).

Abb. 3: Absolutgravimeter FG5 des Projektpartners NMBU. Der freie Fall einer Testmasse in einer Vakuumkammer im oberen Zylinder wird ausgemessen, um die Erdbeschleunigung zu bestimmen (Mitte).

Abb. 4: Lageplan des für die Gravimetermessungen genutzten Abschnitts des Tunnelsystems. Das Gletscherlabor befindet sich unter der Zunge des Engabreen, 1,5 Kilometer vom Eingang entfernt unter einer etwa 200 Meter dicken Eisschicht.

HÖHLEN UND GLETSCHER üben eine hohe Anziehungskraft auf so manchen Abenteuerer aus. Umso spannender müsste es wohl sein, eine Höhle unter einem Gletscher zu erforschen. Nun steht die Höhlenforschung nicht gerade im Fokus der Kommission für Erdmessung und Glaziologie (KEG), doch wurde im März dieses Jahres eine einwöchige Expedition in ein subglaziales, künstliches Tunnelsystem durchgeführt, um sich von dort aus der Anziehungskraft des darüber liegenden Gletschers zu widmen. Dabei ging es weniger um die Anziehungskraft als Attraktivität im ästhetischen Sinn, sondern als Attraktion, also als physikalische Kraft, die nach Newton eine Eigenschaft aller Massen ist.

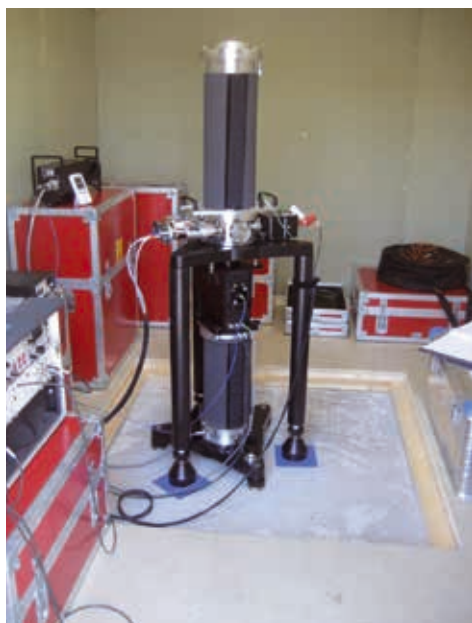
Gletscherforschung und Gravimetrie an der Akademie

Seit den 1960er Jahren ist die Gletscherforschung an der Bayerischen Akademie der Wissenschaften als Kommission etabliert. Um die Auswirkungen von Klimaänderungen

auf Gebirgsgletscher zu untersuchen und zu dokumentieren, werden unter anderem Massenbilanzen ausgewählter Gletscher erstellt. Für den am intensivsten untersuchten Gletscher, den Vernagtferner in den Öztaler Alpen, erstellen die Wissenschaftler diese Bilanz jährlich. Hierbei setzt man klassischerweise geometrische Verfahren ein, bei denen Flächen oder Höhenänderungen gemessen werden.

Seit dem Zusammenschluss der Gletscherforschung mit der Erdmessungskommission im Jahr 2010 wird als komplementäres Verfahren die Gravimetrie, also die Vermessung der Schwerebeschleunigung der Erde, getestet. Als einziges Messverfahren ist sie direkt sensitiv für Massenänderungen. In der terrestrischen Gletscherüberwachung ist die Gravimetrie ein Novum. Bei satellitengestützten Messverfahren ist sie seit dem Start der deutsch-amerikanischen Mission GRACE im Jahre 2002 als wertvolles Instrument zur Quantifizierung von Massenverschiebungen im Erdsystem etabliert und heute aus der globalen geophysikalischen Erdüberwachung kaum mehr wegzudenken. Allerdings ist die Auflösung auf räumliche Bereiche mit einer Ausdehnung von mehreren hundert Kilometern beschränkt. Kleinere Details können nicht erfasst werden. Daher fokussiert sich die Anwendung von GRACE auf die großen polaren Eisschilde in Grönland und der Antarktis sowie auf große vergletscherte Gebiete, etwa in Alaska oder den asiatischen Hochgebirgen. Die Überwachung einzelner Alpengletscher, etwa des Vernagtferners, wäre damit undenkbar. Gerade auf diesen räumlichen Skalen liegt jedoch das Hauptaugenmerk der Gletscherforschung an der Akademie. Daher

KARTEN-QUELLE: WWW.NORGESKARTNO





wurde seit 2010 begonnen, in jährlichen Kampagnen den Massenverlust des Vernagtferners mit terrestrischen Gravimetern zu erfassen und die Ergebnisse den klassischen, geometrischen Verfahren gegenüberzustellen.

Relativ präzises Instrumentarium

Zur Unterstützung dieser Arbeiten konnte 2012 aus Mitteln des Akademienprogramms ein modernes und effizientes Relativgravimeter angeschafft werden. Es arbeitet nach dem Prinzip der Federwaage: Eine kleine Testmasse, die an einer Metallfeder angebracht ist, dehnt diese, wobei die Dehnung umso stärker ist, je größer die Erdbeschleunigung ist. Deren Wert liegt bei etwa $9,8 \text{ m/s}^2$ und variiert global zwischen $9,78$ am Äquator und $9,83$ an den Polen. Mit modernen Gravimetern kann diese Variation zwischen Pol und Äquator etwa mit einer Genauigkeit von eins zu einer Million vermessen werden. Aus den zeitlichen Variationen der Schwere an einem Ort kann man damit auch kleine lokale Massenänderungen ableiten. Die Beschränkung der Relativgravimetrie liegt im Wörtchen „relativ“. Dieses drückt aus, dass nur Variationen gemessen werden können, nicht jedoch der Absolutbetrag der Schwere. Zudem führen mechanische Eigenschaften der Feder dazu, dass sich der Gerätenullpunkt über die Zeit verschiebt. Misst man beispielsweise in zwei aufeinander folgenden Jahren die relative Schwere am Vernagtferner, so können die Werte nicht direkt miteinander in Beziehung gesetzt werden. Daher ist es notwendig, entweder an einen Referenzpunkt mit bekannter

Schwereänderung anzuschließen oder die Relativmessungen mit einem Absolutgravimeter zu komplettieren. Absolutgravimeter der höchsten Genauigkeit sind Laborgeräte, bei denen der freie Fall einer Testmasse in einer Vakuumkammer mittels Laserinterferometrie ausgemessen wird. Dass man solche präzisen Laborgeräte für die Gletscherforschung leider kaum nutzen kann, ist evident, denn selten findet man am Gletscher Laborbedingungen vor.

Schwarzes Eis mit spektakulärer Zunge: Svartisen und Engabreen

Ausnahmen bestätigen natürlich auch hier die Regel, namentlich am Engabreen. Dieser Ausflussgletscher des „schwarzen Eises“, des westlichen Svartisen in Nordnorwegen liegt mit einer geographischen Breite von $66^\circ 41'$ knapp nördlich des Polarkreises. Der Svartisen ist mit einer Fläche von 220 km^2 der zweitgrößte Gletscher des norwegischen Festlands (also ohne etwa die Gletscher auf Spitzbergen). Damit ist er deutlich größer als der in den Berner Alpen gelegene Aletschgletscher, der mit seinen gut 80 km^2 als größter Gletscher der Alpen gilt. Zum Vergleich: Der Vernagtferner hat eine Fläche von nur knapp 8 km^2 . Das Einzugsgebiet des Engabreen erstreckt sich über einen Höhenbereich von etwa 1.500 m , wobei die mit 1.580 m höchste Stelle auf dem Gletscherplateau des Svartisen liegt und das untere Ende der Gletscherzunge fast bis auf Meeresniveau herabführt. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts war die Zunge des Engabreen, die nur per Schiff über den direkt nördlich gelegenen Holandsfjord erreichbar ist, ein beliebtes Ausflugsziel. Unter anderem waren dort der norwegische Polarforscher Fritjof Nansen und der deutsche Kaiser Wilhelm II. zu Besuch.

Abb. 5: Innenansicht des vorderen Tunnelabschnitts zwischen Eingang und Gletscherlabor (links).

Abb. 6: Vermessungsarbeiten im unbeleuchteten wasserführenden Abschnitt des Tunnelsystems zwischen Gletscherlabor und Ausgang. Gelegentliche Kies- und Sandbänke wurden für die Anlage der Gravimeterstationen genutzt. Zur dauerhaften Markierung wurden Messmarken in die Felswand eingeböhrt.

Gletscherforschung und Wasserkraft in Norwegen

Systematische Gletscherbeobachtungen begannen in Norwegen etwa um 1900, wobei damals lediglich Längenänderungen der Gletscher vermessen wurden. Ab 1948 übernahm das gerade gegründete Norwegische Polarinstitut die routinemäßige Überwachung, nicht nur in den Polarregionen, sondern auch auf dem Festland. In dieser Zeit wurden für wenige ausgewählte Gletscher die ersten Massenbilanzen erstellt. Erst als man in den 1960er Jahren begann, das Potential des Schmelzwasserabflusses der Gletscher in großem Stil für die Energiegewinnung nutzbar zu machen – Norwegen bezieht heute ca. 98 % seiner Energie aus Wasserkraft –, wurde das Überwachungsprogramm ausgeweitet und dem Wasserwirtschafts- und Energiedirektorat (NVE) unterstellt. 1994 nahm am östlichen Ufer des Holandsfjord das Svartisenkraftwerk, eines der größten Wasserkraftwerke Norwegens, seinen Betrieb auf. Das Schmelzwasser des Gletschers, das sich an der Gletschersohle in kleinen Bächen und Flüssen sammelt, wird durch ein künstliches Tunnelsystem angezapft und über mehrere Kilometer zum Svartisenkraftwerk geleitet.

Forschen unter dem Eis

Als weltweit einzigartig darf das subglaziale Forschungslabor bezeichnet werden, das sich etwa 1,5 Kilometer innerhalb des Berges unter der Gletschersohle und damit unter einer ca. 200 Meter dicken Eisschicht befindet. Dort haben die Forscher direkten Zugang zum Gletschereis – von unten. Hier werden Studien etwa zum Zusammenhang zwischen Druck, Wasserführung und Gletscherbewegung gemacht. Unter anderem wurden daraus Viskositätsparameter im Bewegungsverlauf von Gletschereis bestimmt. Im Gletschereis findet sich auch Leben – beispielsweise in Form von Bakterien. Das subglaziale Labor ermöglicht hier die Erforschung von Lebensbedingungen unter extremen Umweltbedingungen, wie sie auch an anderen Orten auf der Erde (etwa in Grönland) oder anderswo im Sonnensystem (etwa am Mars oder den Eismonden des Jupiter) herrschen. So diente das Labor auch der Technologieentwicklung für die 2018 geplante Satellitenmission ExoMars der Europäischen Weltraumagentur ESA.



Abb. 7: Zielmarke zur Winkel- und Streckenmessung vor dem Eingang zum Tunnelsystem. Im Hintergrund die Gletscherzunge des Engabreen.

Höchste Präzision im Labor

Der direkte Zugang zur Gletschersohle war für die KEG-Expedition allerdings nicht von Bedeutung. Vielmehr wurde ausgenutzt, dass man quasi mitten am Gletscher (wenn auch unter dem Eis gelegen) Laborbedingungen vorfindet, die es erlauben, ein hochpräzises Absolutgravimeter zu platzieren. Das Gerät vom Typ FG5 stellten die Projektpartner der Norwegischen Universität für Umwelt- und Biowissenschaften (NMBU) bereit. Der Vergleich mit den für die Zukunft geplanten Wiederholungsmessungen soll Aufschluss über zeitliche Massenvariationen geben, die durch das Abschmelzen der Eismassen hervorgerufen werden.

Da Gravimeter immer nur den Gesamteffekt aller in der Umgebung erfolgenden Massenänderungen erfassen, können aus Messungen an einer einzelnen Beobachtungsstation keine eindeutigen Aussagen darüber getroffen werden, wo die Massenänderung stattgefunden hat. Beispielsweise würde das Abschmelzen von einem Kubikmeter Eis auf der relativ zum Messlabor tiefer gelegenen Gletscherzunge den gleichen Effekt ergeben wie der Zuwachs von einem Kubikmeter Eis auf dem relativ zum Messlabor höher gelegenen Gletscherplateau – vorausgesetzt, der Abstand zum Labor ist jeweils gleich. Beides, das Abschmelzen unterhalb des Labors und der Massenzuwachs darüber, würde

den gemessenen Schwerewert verkleinern. Es ist daher ratsam, die Schwere auf mehreren räumlich verteilten Stationen zu beobachten. Neben den FG5-Messungen wurde entlang des Tunnels ein Profil mit 17 weiteren Messstationen eingerichtet, die mit Relativgravimetern im Bezug zum Absolutpunkt eingemessen wurden. Für die Zukunft ist die Anlage zusätzlicher Messpunkte an der Oberfläche geplant.

Der für die gravimetrischen Arbeiten verwendete Bereich des Tunnelsystems hat eine Gesamtlänge von dreieinhalb Kilometern. Er verläuft vom Tunneleingang auf der Nordseite der Engabreen-Gletscherzunge vollständig unter dieser hindurch und endet an einem kleinen Ausstieg auf der gegenüberliegenden Bergseite.



Er ist in zwei Abschnitte gegliedert, den vorderen Teil, der dem Zugang zum Gletscherlabor dient und durch eine massive Staumauer von dem eigentlich wasserführenden Teil des Tunnelsystems abgeriegelt ist, sowie den hinteren Teil, der zu eben diesem wasserführenden Bereich gehört. Dies bedeutet auch, dass der hintere, etwa zwei Kilometer lange Abschnitt nur im Winter

und Frühjahr begangen werden kann. Sobald im Frühsommer die Schmelzsaison beginnt, führt der Tunnel zu viel Wasser. Zum Zeitpunkt der Messungen im März rann in weiten Teilen nur ein kleines Rinnsal von 10 bis 20 Zentimetern Tiefe den Tunnel entlang.

Aktuelle und zukünftige Messarbeiten

Um die räumliche Lage der Stationen und damit den geometrischen Bezug zu den umliegenden Gletschermassen zu bestimmen, wurden neben den gravimetrischen Arbeiten auch GPS-Beobachtungen an den beiden Tunnelportalen durchgeführt und im Tunnel ein klassischer Polygonzug aus Winkel- und Streckenmessungen angelegt. Inklusiv des An- und Abtransports von Instrumenten und Ausrüstung war das fünfköpfige Team von KEG, NMBU und NVE sechs Tage lang beschäftigt, die Messungen durchzuführen. Damit wurde nicht nur der erste subglaziale Absolutschwerewert überhaupt gemessen, sondern insbesondere auch die Grundlage geschaffen, um in den kommenden Jahren die zu erwartenden zeitlichen Schwereänderungen aufzuzeichnen und mit den Massenvariationen des Gletschers in Beziehung zu setzen. Dies ist vor allem deswegen so interessant, weil die Gletscherzunge in starkem Maße von Spalten durchzogen und zerklüftet ist, wodurch sie kaum begehbar und damit den klassischen glaziologischen Messmethoden nur schwer zugänglich ist. Die gravimetrische Methode kann hier einen wertvollen Beitrag zur Massenbilanzierung liefern. Die mit dem Absolutgravimeter erreichte Messgenauigkeit entspricht dabei dem Abschmelzen einer Eisschicht von knapp 10 Zentimetern Dicke. Die nächsten Messungen sind für 2015 geplant.

Abb. 8: Die Gletscherzunge des Engabreen vom Holandsfjord aus gesehen. Der Pfeil deutet die Lage des Forschungslabors an. Der Gletscher ist an dieser Stelle etwa 200 Meter dick. Der Eingang zum Tunnelsystem befindet sich links, außerhalb des Bildausschnitts.

DER AUTOR

Dr. Christian Gerlach ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Kommission für Erdmessung und Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Sein Arbeitsschwerpunkt liegt in der Messung und Modellierung des Erdschwerefeldes für Anwendungen in den Erdwissenschaften.