

# Gletscherwandel in Polar- und Subpolargebieten

## Wie der Klimawandel den Wasserhaushalt vergletschter Regionen beeinflusst

Die Erwärmung der bodennahen Luft weltweit in den letzten Jahrzehnten gilt nach vielen Jahren intensiver Klimaforschung als gesichert. Dies lässt sich an der im vergangenen Jahrhundert um knapp ein Grad gestiegenen globalen Mitteltemperatur klar festmachen. Augenfällig zeigt sich der globale Klimawandel an den kleiner werdenden Gletschern in fast allen Gebirgen der Erde und teilweise auch in den Polargebieten. Tatsächlich ist die Reaktion der Massenbilanz einer Eismasse in komplexer Art und Weise von verschiedenen Klimaelementen wie Temperatur, Niederschlag, Strahlung, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit abhängig. Aus diesem Grunde sind die Reaktionsmuster der Gletscher auf einen Klimawandel in den verschiedenen Klimazonen sehr unterschiedlich. Hinzu kommt, dass veränderte thermische Bedingungen auch das thermische Regime im Inneren der Eismasse beeinflussen können, was zu komplexen Veränderungen des Fließverhaltens von Gletschern führen kann. Bei Gebirgsgräsern, wie in Teilen des Himalaya oder in den südamerikanischen Anden, ist unser Verständnis der Veränderungen im Jahrgang des Schmelzwasserabflusses aufgrund eines Klimawandels wegen des Einflusses dieser Gletscher auf die Wasserversorgung im Vorland von hoher Bedeutung.

In den Polar- und Subpolargebieten dagegen, wo viel größere Wassermassen in Form von Eis gebunden sind, steht die Frage des Beitrags dieser Gebiete zum weltweiten Anstieg des Meeresspiegels im Zentrum des Interesses. Derzeit können ungefähr zwei Drittel des beobachteten Meeresspiegelanstiegs auf die thermische Ausdehnung der sich erwärmenden Ozeane zurückgeführt werden. Während ein Drittel des Anstiegs auf den Beitrag von Schmelzwässern hauptsächlich aus Gebirgsgräsern zurückgehen. Modellrechnungen mit gekoppelten globalen Klima-Ozean-Modellen zeigen, dass sich im Laufe des 21. Jahr-

hunderts der Anteil von Schmelzwasser aus den Polargebieten stetig erhöht und der Anstieg des Meeresspiegels sich insgesamt beschleunigen wird. Während der Bericht 2007 des Intergovernmental Panel on Climate Change, kurz IPCC, eine Erhöhung des Meeresspiegels im 21. Jahrhundert zwischen 20 und 50 cm veranschlagt, gehen neuere Schätzungen, aufgrund des Beitrags von den großen Eismassen der Polargebiete, von deutlich höheren Werten von über einem Meter aus. Um die Abschätzungen zu verbessern, ist letztlich ein besseres Systemverständnis für die Kopplung des Schmelzwasserabflusses an sich wandelnde atmosphärische Randbedingungen für unterschiedliche Gletschertypen und Lokalklimate notwendig. Diesem Fragenkomplex geht das Team am Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geographie und Klimatologie am Geographischen Institut in verschiedenen Forschungsprojekten in Patagonien im Süden Chiles und auf der zum Svalbard-Archipel (Spitzbergen) gehörenden Insel Nordaustlandet in der europäischen Arktis auf 80 Grad nördlicher Breite nach. Die Forschungsprojekte erfolgen in Zusammenarbeit mit der Universität Trier, der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn sowie der Technischen Universität Berlin.

Die rund 190<sup>2</sup> km große Eiskappe Gran Campo Nevado in Südpatagonien bildet einen von zwei regionalen Schwerpunkten der Gletscherforschung am Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geographie und Klimatologie. Im Kammbereich der südchilenischen Anden auf 53 Grad südlicher Breite liegt sie im Einflussbereich eines extrem feuchten, ganzjährig kühlen Klimas. Die Südspitze Südamerikas bildet die einzige kontinentale Barriere für die südhemisphärischen Westwinde und damit eine der extremsten Klimascheiden auf unserer Erde. In den Gipfelregionen sind bedingt durch Stauniederschläge Jahressummen des Niederschlags von über 10.000 mm zu verzeich-

nen. Zum Vergleich: In Aachen fällt lediglich etwas über 800 mm Niederschlag im Jahr. Die hygrische Extremlage macht das Gran Campo Nevado zu einem idealen Ort, um die Auswirkungen des Klimawandels zu untersuchen, weil hier ansteigende Temperaturen und auch deren teilweise Kompensation durch regional ansteigende Niederschläge zusammentreffen.

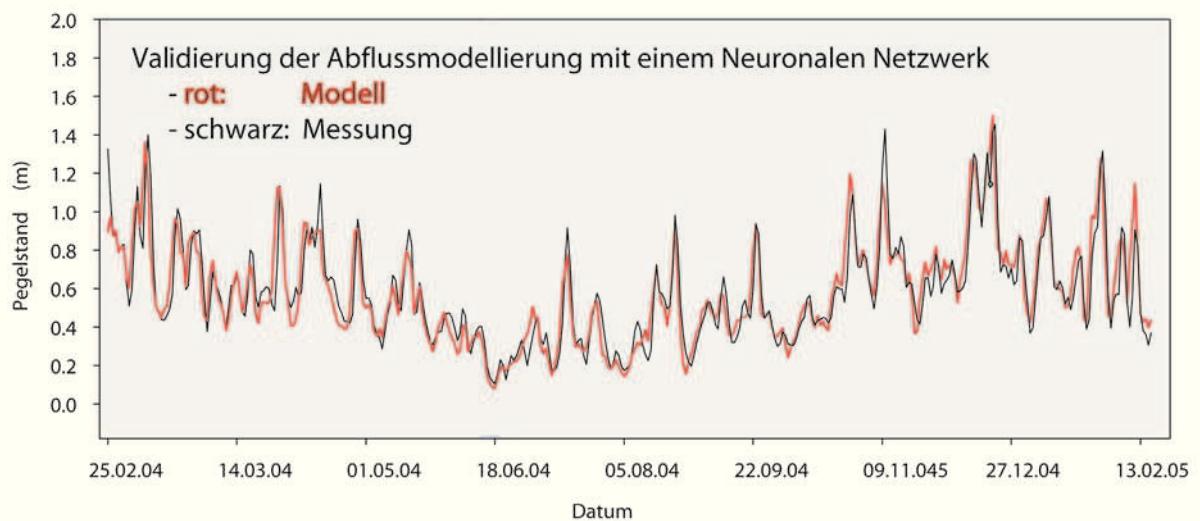
Für die Beschreibung und Interpretation des gesamten Wasserhaushaltes eines vergletscherten Einzugsgebietes ist vor allem ein Verständnis des zu Grunde liegenden komplexen hydrologischen Systems notwendig. Das Zusammenspiel nichtlinearer Prozesse erschwert jedoch eine klare Trennung relevanter Einflussgrößen auf das Gesamtsystem. Die Vereinfachung des Systems anhand von physikalischen, statistischen oder konzeptionellen Modellen bietet hier eine Möglichkeit, Antworten auf diese grundlegenden Fragen zu erhalten. Die Forschungsgruppe der Physischen Geographie und Klimatologie setzt hierzu Künstliche Neuronale Netzwerke, kurz KNN, ein, um die regionalen Wasserhaushaltsskomponenten eines kleinen vergletscherten Einzugsgebietes auf der Ostseite des Gran Campo Nevado näher zu untersuchen, siehe Bild 1. Zur Erfassung des Abflussregimes wurden Druckpeile eingerichtet und über das Salzverdünnungsverfahren und den Einsatz hydrometrischer Methoden geeicht. Anhand dieser Datengrundlage wurde schließlich das Modell entwickelt und angewendet. Im Vergleich zu gängigen statistischen und physikalischen Modellen zeichnet sich das an der RWTH entwickelte KNN-Modell durch seine hohe quantitative Genauigkeit bei der Vorhersage der Abflussganglinie aus. Durch die Analyse der Modellstruktur konnten weiterhin wertvolle Erkenntnisse über die dominanten Steuerungsprozesse des Abflusses gewonnen werden. So zeigt sich trotz des hohen vergletscherten Anteils nur ein untergeordneter Einfluss

der Temperatur auf den Abfluss, der maßgeblich durch die hohen Niederschläge im Untersuchungsgebiet verursacht wird.

Die Eiskappe selbst verliert in ihren äußeren und damit tiefliegenden Randgebieten deutlich und zunehmend an Masse, während die hochgelegenen, inneren Eisflächen einen fortwährenden, wenn auch nachlassenden Massenzuwachs erfahren. Dies geht aus Vergleichsanalysen unterschiedlicher, auf Luftbildern und Satellitendaten basierenden digitalen Geländemodellen verschiedener Zeitpunkte hervor. Diese Dynamik der Massenbilanz spiegelt wieder, dass im Zuge des Klimawandels regional ansteigende Niederschlagssummen nur zeitlich begrenzt im Stande sind, das fortschreitende Abschmelzen der Gletscher und damit das Schwinden wichtiger Süßwasserspeicher teilweise zu kompensieren. Im Zeitraum 1984 bis 2000 hat die Gran Campo Nevado Eiskappe im Mittel rund 0,4 m Wasseräquivalent pro Jahr an Mächtigkeit verloren. Aktuell hat sich diese Ausdünnung für 2000 bis 2007 auf 2,6 m Wasseräquivalent pro Jahr vervielfacht. Gleichzeitig ist der durch Massenzuwachs geprägte zentrale Bereich der Eiskappe flächenmäßig um gut zwei Drittel geschrumpft. Der Zeitpunkt ab dem auch das Gran Campo Nevado, wie jetzt schon große Teile der weltweiten Gebirgsgräser, an keiner Stelle mehr an Mächtigkeit gewinnen wird, ist also absehbar, siehe Bild 2.

Diese Erkenntnis deckt sich mit Modellrechnungen, die für das 21. Jahrhundert einen kontinuierlich negativen Trend der Gletschermassenbilanz vorhersagen. Während in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts noch eine positive Massenbilanz von im Mittel rund 1,0 m Wasseräquivalent Zuwachs pro Jahr modelliert wurde, erfuhr die Eiskappe in den letzten Dekaden des Jahrtausends im Modell bereits eine mittlere jährliche Ausdünnung von rund 1,5 m Wasseräquivalent. Was sich auch mit der

*Bild 1: Die Grafik zeigt in schwarz den am Río Lengua gemessenen Wasserpegel in einem Zeitraum von knapp einem Jahr. Die rote Linie zeigt die Modellierung des Pegelstandes mit dem kalibrierten Neuronalen Netzwerk auf der Basis von Messwerten der Lufttemperatur und des Niederschlages.*



*Bild 2: Die Zunge des Talgletschers Galería, einer der Auslassgletscher des Gran Campo Nevado in Patagonien. Zu erkennen ist ein in den vergangenen Jahrzehnten entstandener und sich stetig vergrößernder See im Vordergrund, der zwischen der zurückweichenden Gletscherzunge und der Endmoräne des jüngsten Höchststandes vom Anfang des 20. Jahrhunderts liegt.*



Analyse von Satellitenbildern deckt. Basierend auf ihrer aktuellen Flächenausdehnung und dem „worst case“-Klimaszenario „Special Report on Emissions Scenarios A2“ des Berichtes des Intergovernmental Panel on Climate Change von 2007 konnte die Massenbilanz des Gran Campo Nevado zum Ende des 21. Jahrhunderts auf ungefähr 4,5 m Wasseräquivalent Ausdünnung pro Jahr abgeschätzt werden. Ein experimentelles Modell für die Abnahme der Gletscherfläche ergibt auf dieser Basis einen Rückzug der

Eiskappe auf Höhenlagen bis oberhalb 560 m über dem Meer, was einem Flächenverlust von über 25 Prozent gleichkäme. Im Moment reichen die vom Zentrum der Eiskappe herabfließenden Talgletscher noch bis auf Meeressniveau hinab. Alleine diese kleine Eiskappe im südlichsten Patagonien würde damit bezogen auf den Zeitraum 1900 bis 2099 mit 0,2 mm zum weltweiten Meeresspiegelanstieg beitragen.

Ganz anders sind die Verhältnisse im nördlichen Sval-

bard-Archipel (Spitzbergen) auf der Insel Nordaustlandet: Hier befinden sich mit Austfonna und Vestfonna, die zwei größten Eiskappen der europäischen Arktis, die zusammenkommen eine Fläche von über 10.000 km<sup>2</sup> bedecken. Bis jetzt ist nur wenig über die Trends ihrer Energie- und Massenbilanz in jüngster Zeit bekannt. Auch im Bezug auf ihre Klimasensitivität, also ihre potenzielle Reaktion auf den Klimawandel, weiß man noch fast nichts. Dabei wird im Bericht des IPCC von 2007 gerade die Nord-



10

**Bild 3: Automatische Wetterstation am Ahlmann Summit (Vestfonna, Nordaustlandet).** Die Station misst alle wichtigen Klimaelemente sowie die Änderung des Abstands zur Schneeoberfläche mit Hilfe eines Ultraschallensors zur Bestimmung der Schneekumulation beziehungsweise Schneeschmelze.

polarregion als Brennpunkt des Temperaturanstiegs im 21. Jahrhundert ausgewiesen. Im Rahmen des Internationalen Polarjahres 2007 bis 2009 wird nun seitens eines internationalen Forschungskonsortiums versucht, diese Wissenslücke zu schließen. Im Projekt „Dynamic Response of Surface Energy and Mass Balance of Vest- and Austfonna (Nordaustlandet, Svalbard) on Climate Change“, Dynamische Reaktion der Oberflächenenergie- und Oberflächenmassenbilanz von Vest- und Austfonna auf den Klimawandel, arbeitet das Team der RWTH zusammen mit Projekt-partnern der Technischen Universität Berlin und der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn an dieser Frage. Während der Frühjahrskampagne 2008 wurden dabei sechs automatische Wetterstationen, siehe Bild 3, und ein Netz aus 24 Ablationsstangen installiert.

Diese Aluminiumrohre sind Messlatten, die zur Bestimmung der Gletscherschmelze in das Eis gebohrt werden. Im Sommer 2008 wurden die Messeinrichtungen erneut aufgesucht und für den harten Winterbetrieb umgerüstet. Der Sommer 2008 auf Nordaustlandet war eine außergewöhnlich schneereiche Periode. Nachdem bereits im vorherigen Winter deutlich mehr Schnee gefallen war, als normalerweise in diesen Regionen zu erwarten ist, haben Aust- und Vestfonna im Massenbilanzjahr 2007/2008 im Gegensatz zum weltweiten Trend sogar an Masse gewonnen. Überhaupt reagieren die Eismassen des nördlichen Svalbard-Archipels bisher nur gering auf den Klimawandel. Herauszufinden inwieweit dies auch für die Zukunft gilt, oder ob sich der im Moment positive Trend nicht sogar ins Gegenteil umkehren könnte, ist unter anderem Ziel

des Projektes. Besonders wichtig für die Massenbilanz der Eiskappen der Arktis sind Veränderungen der thermischen Regime im Inneren der Eiskappen. Durch die Erwärmung des Gletscherges, ausgelöst durch eine höhere Lufttemperatur und im Innern des Gletschers wieder gefrierendes Schmelzwasser, verändern sich dessen Fließeigenschaften. Die arktischen Eismassen könnten im Extremfall an ihren Rändern förmlich auseinander gleiten, vergleichbar mit einem zu flüssig geratenen Wackelpudding. Dieses Szenario könnte den Anstieg des Meeresspiegels erheblich beschleunigen. Auf der Basis der Messungen am Vestfonna und mit Hilfe von gekoppelten numerischen Modellen, welche Simulationen eines zukünftigen Klimas mit Energie- und Massenbilanzmodellen für die Gletscheroberfläche verknüpfen, leistet die RWTH zusammen mit den Projektpart-



nern einen Beitrag zur Beantwortung dieser drängenden Fragen, siehe Bild 4.

[www.klimageo.rwth-aachen.de](http://www.klimageo.rwth-aachen.de)

Autoren:

Marco Möller, M.A., und Tobias Sauter, M.Sc., sind Wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geographie und Klimatologie. Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Christoph Schneider leitet das Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geographie und Klimatologie.

*Bild 4: Professor Christoph Schneider beim Ausstechen eines Schneezylinders zur Bestimmung der Schneedichte am Ahlmann Summit.*