

Vorhergesagter Eisverlust

Die viskoelastische Modellierung erlaubt es vorherzusagen, wie Grönlands Gletscher an Eis verlieren.

Alan Petrillo

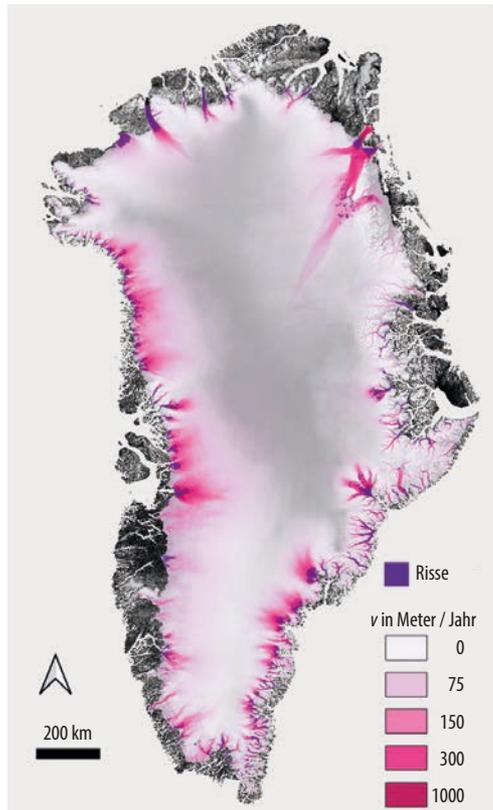


Abb. 1 In der Karte von Grönland zeigt die rote Farbskala die Geschwindigkeit der Gletscherbewegung an. Gebiete mit der größten Bewegung liegen meist in Küstennähe. Durchgezogene violette Zonen markieren die Stellen massiver Risse in der Eisdecke.

Das Gletschersystem des Eisstroms im Norden Grönlands enthält genug Wasser, um den globalen Meeresspiegel um mehr als einen Meter anzuheben. Sein Eis-transport in den Ozean hat sich beschleunigt. Um zu erfassen, wie Gezeiten und subglaziale Topografie zum Gletscherfluss beitragen, haben Forschende des Alfred-Wegener-Instituts ein verbessertes viskoelastisches Modell entwickelt.

Gletscher machen einen überaus beständigen Eindruck. Doch die großen Eisschilde der Erde befinden sich ständig in Bewegung und verändern sich. In den letzten Jahrzehnten hat sich diese unaufhörliche Bewegung beschleunigt. Tatsächlich erweist sich das Eis in Polarregionen nicht nur als mobil, sondern auch als erschreckend sterblich.

Steigende Luft- und Meerestemperaturen beschleunigen den Abfluss von Gletschereis in die Ozeane und lassen den Meeresspiegel ansteigen, und zwar schneller als erwartet. Bestehende Modelle der Gletscherdynamik und des Eisabflusses unterschätzen die tatsächliche Rate des Eisverlusts in den letzten Jahrzehnten. Dies macht die Arbeit der Physikerin Angelika Humbert, die Grönlands Auslassgletscher Nioghalvfjærdsbræ untersucht, wichtig – und dringend.

Als Leiterin der Modellierungsgruppe in der Sektion Glaziologie am Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven zieht Humbert umfassendere Lehren aus dem anhaltenden Niedergang von Nioghalvfjærdsbræ. Ihre Forschung kombiniert Daten aus Feldbeobachtungen mit viskoelastischer Modellierung des Verhaltens von Eisschilden. Durch eine verbesserte Modellierung der elastischen Auswirkungen auf den Gletscherfluss gilt es, den Eisverlust und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den globalen Meeresspiegel besser vorherzusagen.

Die Zeit ist knapp: „Nioghalvfjærdsbræ ist einer der letzten drei ‘schwimmenden Zungen’-Gletscher

in Grönland“, erklärt Humbert. „Fast alle anderen schwimmenden Zungenformationen sind bereits zerfallen.“

Gletscher mit Potenzial

Grönland ist nach der Antarktis mit dem weltweit zweitgrößten Eispanzer bedeckt. (Abb. 1) Die dünn besiedelte Landschaft Grönlands mag unberührt erscheinen, doch tatsächlich nagt der Klimawandel an ihrer eisigen Hülle. Der anhaltende Austritt von Eis in den Ozean ist ein grundlegender Prozess in der Massenbilanz der Eisdecke [1]. Der gesamte Nordostgrönland-Eisstrom enthält genug Eis, um den globalen Meeresspiegel um 1,1 Meter anzuheben. Obwohl vermutlich nicht die gesamte Formation verschwinden wird, ist Grönlands gesamte Eisbedeckung seit 1990 dramatisch zurückgegangen. Dieser Zerfallsprozess verlief nicht linear und gleichmäßig auf der ganzen Insel. Nioghalvfjærdsbræ ist heute Grönlands größter Auslassgletscher. Der nahe gelegene Petermanngletscher war früher größer, schrumpft aber noch schneller [2].

Schnell wirkende Kräfte erfassen

Angelika Humbert hat zahlreiche Reisen nach Grönland und in die Antarktis unternommen, um Proben zu nehmen, aber dieser direkte Ansatz in der Glaziologie hat Grenzen: „Feldoperationen sind sehr kostspielig und zeitaufwändig, und wir erhalten nur einen begrenzten Einblick“, sagt sie. „Was wir lernen wollen, liegt im Inneren eines

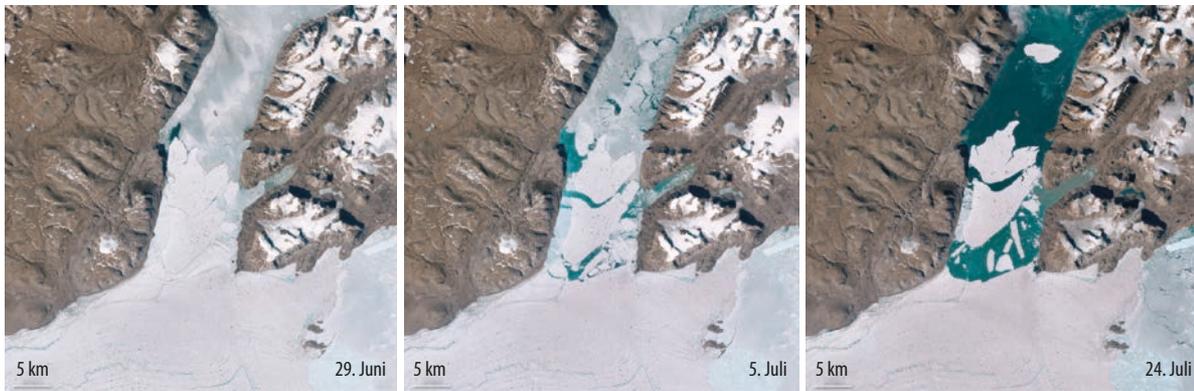


Abb. 2 Ein schwimmender Teil des Gletschers Nioghalvfjærdsbræ zerfällt und bricht in dieser Bildsequenz vom Juni und Juli 2020 ab.

Systems verborgen, und ein Großteil dieses Systems ist unter vielen Tonnen Eis begraben!“ Daher sind Modelle gefragt, die aussagen, welche Faktoren für den Eisverlust verantwortlich sind und wo diese zu finden sind.

Seit den 1980er-Jahren stützen sich die Forschenden auf numerische Modelle, um die Entwicklung der Eisschilde zu beschreiben und vorherzusagen. Modelle auf Basis einer viskosen Potenzgesetzfunktion erlauben es, die Auswirkungen von Temperaturveränderungen zu erfassen. Dies funktioniert aber nur, wenn es darum geht, ein stabiles, langfristiges Verhalten zu modellieren und die viskose Verformung und das Gleiten einzuschätzen. Gilt es jedoch, Lasten zu erfassen, die sich auf kurzer Zeitskala ändern, ist ein anderer Ansatz erforderlich.

Was treibt die kurzfristigen Veränderungen der Lasten an, die das Verhalten des Eisschildes beeinflussen? Zwei Quellen dieser bedeutenden, kaum verstandenen Kräfte sind die ozeanische Gezeitenbewegung unter schwimmenden Eiszungen (**Abb. 2**) und die zerklüftete, unebene Landschaft Grönlands. Um die durch diese Faktoren verursachte elastische Verformung zu untersuchen, haben Humbert und ihr Team ein viskoelastisches Modell von Nioghalvfjærdsbræ in der COMSOL Multiphysics® Software erstellt. Die Geometrie des

Gletschermodells basiert auf Daten aus Radarmessungen. Das Modell löst die zugrundeliegenden Gleichungen für ein viskoelastisches Maxwell-Material über ein 2D-Modellgebiet, das aus einem vertikalen Querschnitt entlang der in **Abb. 3** dargestellten blauen Linie besteht. Die simulierten Ergebnisse wurden mit Feldmessungen des Gletscherflusses von vier GPS-Stationen (**Abb. 3**) verglichen.

Der Einfluss zyklischer Gezeiten

Die Gezeiten um Grönland heben und senken die Wasserlinie an der Küste zwischen einem und vier Metern pro Zyklus. Dieser Vorgang übt eine enorme Kraft auf die schwimmenden Zungen der Auslassgletscher aus. Zudem übertragen sich diese Kräfte auf die landgestützten Teile des Gletschers. Das viskoelas-

tische Modell des AWI untersucht, wie sich diese zyklischen Veränderungen in der Spannungsverteilung auf den Strom des Gletschers in Richtung Meer auswirken (**Abb. 4**).

„Die schwimmende Zunge bewegt sich auf und ab und bewirkt elastische Reaktionen im landgestützten Teil des Gletschers“, erklärt Julia Christmann, Mathematikerin im AWI-Team. Sie hat die Erstellung der Simulationsmodelle vorangetrieben. „Zudem gibt es ein subglaziales hydrologisches System aus flüssigem Wasser zwischen Inlandeis und Boden.“ Dieses ist kaum verstanden, hat aber Auswirkungen. So zeigt sich etwa ein Spannungsanstieg unterhalb eines Sees, der auf dem Gletscher liegt (**Abb. 4a**). Das Wasser des Sees fließt durch das Eis nach unten, wo es die subglaziale Wasserschicht ergänzt und deren Gleitwirkung verstärkt.

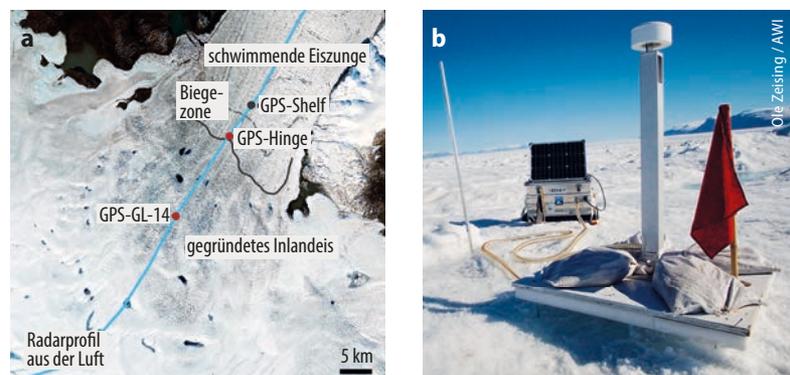


Abb. 3 Positionen der GPS-Messstationen auf dem Gletscher Nioghalvfjærdsbræ (a) und Foto einer einzelnen Station (b)

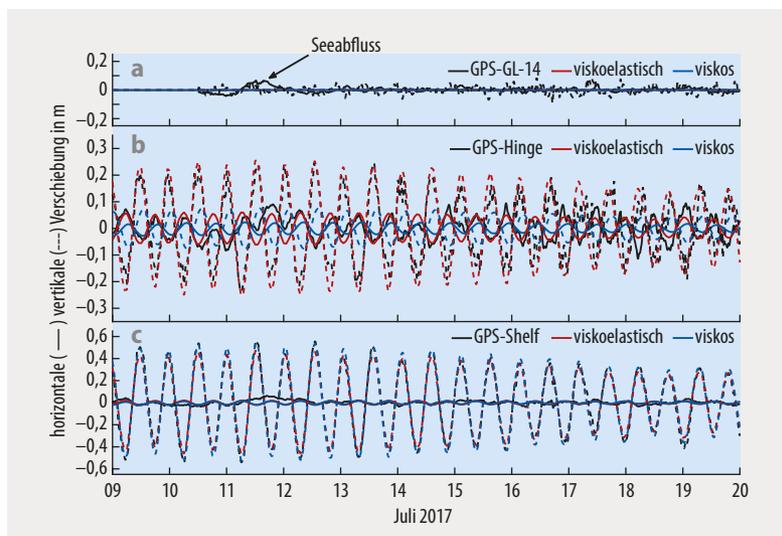


Abb. 4 Für drei Stellen auf dem Nioghalvfjordsbræ ist die Verschiebung ohne Bewegungstrend des Gletschereises über die Zeit gezeigt. Schwarze Linien markieren die gemessene Verschiebung, rote Linien die simulierte Verschiebung gemäß dem viskoelastischen Modell COMice-ve. Blaue Linien zeigen die simulierte Verschiebung in einem viskosen Modell. Die Verschiebungen nehmen 14 km landeinwärts von der Aufsatzlinie weiter ab (a). Die zyklischen Gezeitenverschiebungen am GPS-Hingemesspunkt nahe der Aufsatzlinie zwischen Land und Meer nehmen ebenfalls ab (b). Die Wellenform der zyklischen Gezeitenverschiebungen, die auf das Eis wirken, sind am GPS-Shelf, der auf dem im Ozean schwimmenden Eis montiert ist, am ausgeprägtesten (c).

Die aufgezeichneten Trendlinien verdeutlichen die höhere Genauigkeit der neuen viskoelastischen Simulationen verglichen mit rein viskosen Modellen. So erfasst das viskose Modell nicht das volle Ausmaß der Spannungsänderungen und zeigt auch nicht die richtige Amplitude (**Abb. 4c**). In der Biegezone ist eine Phasenverschiebung dieser Kräfte aufgrund der elastischen Reaktion zu erkennen. Ein genaues Modell erfordert es, die viskoelastische „Feder“-Wirkung zu berücksichtigen.

Elastisch gedehnt

Die Spalten in den grönländischen Gletschern offenbaren die Unebenheiten der darunter liegenden Landschaft (**Abb. 5**). Gletscherspalten sind ein weiterer Beweis dafür, dass Gletschereis kein rein zähflüssiges Material ist. Zwar kriecht ein Gletscher im Laufe der Zeit, wie ein

zähflüssiges Material es tun würde. Doch ein rein zähflüssiges Material würde keine anhaltenden Risse bilden, wie es bei Eisschilden der Fall ist. Das viskoelastische Modell des AWI bietet nun die Möglichkeit zu erforschen, wie das Land unter Ni-

oghalvfjordsbræ die Entstehung von Gletscherspalten begünstigt und das Gletschergleiten beeinflusst. „Als wir unsere Simulationen durchführten, waren wir überrascht, wie viel elastische Dehnung durch die Topografie auftritt“, erklärt Christmann. Diese Effekte traten weit im Landesinneren auf, wo die Gezeiten keine Rolle spielen.

Die vertikale Deformation des Gletschers korrespondiert mit der darunter liegenden Landschaft und hilft zu verstehen, wie die lokale elastische vertikale Bewegung die horizontale Bewegung der gesamten Platte beeinflusst (**Abb. 6**). Bewegen sich Bereiche vertikal langsamer als Abschnitte, die sich direkt über dem Boden befinden, wird dort das Eis komprimiert. In Zonen, die sich schneller bewegen als das Eis an der Basis, wird das Eis vertikal gestreckt. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass das verbesserte Modell genauere Vorhersagen über Gletscherbewegungen liefern könnte.

Im großen Maßstab

Das verbesserte viskoelastische Modell des Gletschers Nioghalvfjordsbræ ist nur das jüngste Beispiel für Humberts jahrzehntelangen Einsatz



Abb. 5 Die Luftaufnahme von Nioghalvfjordsbræ zeigt die ausgedehnten Muster der Gletscherspalten.

Julia Christmann / AWI

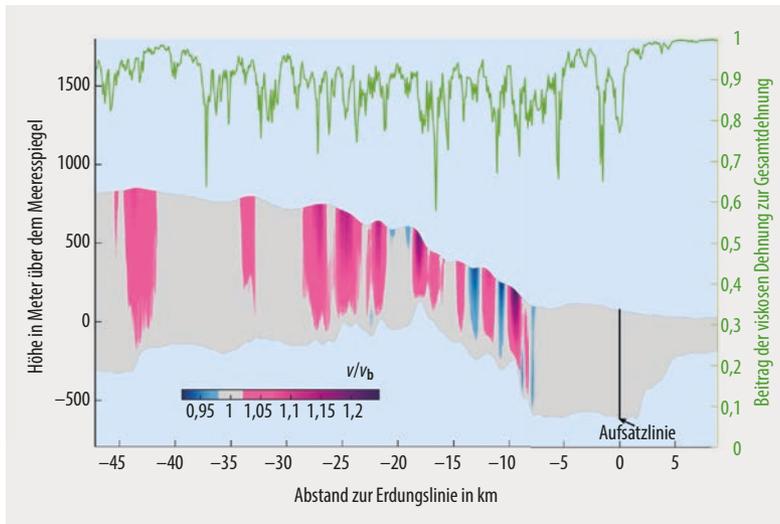


Abb. 6 Ein Querschnitt des Nioghalvfjærdsbræ (linke Skala) zeigt die vertikalen Geschwindigkeiten der Eisbewegung im Inneren des Gletschers im Vergleich zur Bewegung an der Basis des Gletschers. Die blauen Bereiche bewegen sich langsamer als das Eis an der Basis, die rosa und violetten Bereiche dagegen schneller. Die grüne Linie (rechte Skala) zeigt das Verhältnis der viskosen Dehnung zur Gesamtdehnung entlang der Querschnittslinie.

numerischer Simulationswerkzeuge für die glaziologische Forschung. „COMSOL® eignet sich für unsere Arbeit sehr gut“, sagt sie. „Es ist ein fantastisches Werkzeug, um neue Ideen auszuprobieren.“ Mit der Software lassen sich einfach Einstellungen anpassen und neue Simulationsexperimente durchführen, ohne einen eigenen Code schreiben zu müssen.

Trotz dieser Fortschritte sind viele Informationen über die Eisdicke noch unbekannt. „Wir könnten

Jahre an Rechenzeit verbrauchen und dennoch nicht alles abdecken“, räumt Humbert ein. „Aber vielleicht können wir die lokalisierten elastischen Effekte unseres Modells parametrisieren und es in einem größeren Maßstab implementieren.“

Dieser Maßstab bestimmt die Herausforderungen der Glaziologie im 21. Jahrhundert. Die Größe ihrer Forschungsobjekte ist atemberaubend, ebenso die globale Bedeutung ihrer Arbeit. Entscheidend ist es, mehr Informationen zu ge-

winnen, und zwar immer schneller. Hier könnten auch Fachleute aus anderen Bereichen, die sich mit viskoelastischen Materialien befassen, einen Beitrag leisten. „Wenn sich andere COMSOL-Nutzer mit Rissen in Maxwell-Materialien befassen, stehen sie wahrscheinlich vor ähnlichen Schwierigkeiten wie wir, auch wenn ihre Modelle nichts mit Eis zu tun haben“, sagt Angelika Humbert. „Vielleicht können wir uns austauschen und diese Probleme gemeinsam angehen.“ Auf diese Weise könnte es gelingen, einige der großen Herausforderungen gemeinsam zu meistern.

- [1] J. Christmann et al., Commun. Earth Environ. 2, 232 (2021)
- [2] European Space Agency, „Spalte Breaks Up“, September 2020
- [3] Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, „Model comparison: Experts calculate future ice loss and the extent to which Greenland and the Antarctic will contribute to sea-level rise“ (2020)

Der Autor

Alan Petrillo, Content Writer, Comsol Multiphysics GmbH, Robert-Gernhardt-Platz 1, 37073 Göttingen, www.comsol.de

ORIGINPRO®

Datenanalyse- und Grafiksoftware

- automatisierbare Datenanalyse und Grafiksoftware
- mehr als 170 verschiedene 2D- und 3D-Diagrammtypen
- flexibler Datenimport, Datenbankzugriff
- Datenfilter und Signalverarbeitung
- lineare und nichtlineare Kurvenanpassung
- Signal- und Peakanalyse
- komplexe Statistiken, Regression, Pivot-Tabellen
- publikationsreife Grafiken und benutzerdefinierte Reports
- Python- und R-Konnektivität

