



Foto: Ingo Sasgen

Foto 1: Eisberge vor Grönland. Sie entstehen, wenn riesige Eisbrocken vom Rand eines Gletschers abbrechen und ins Meer stürzen

Ingo Sasgen, Olaf Eisen, Jonathan Simon, Maria Hörhold, Wolfgang Buermann

Eis am Kipppunkt

Instabilitäten und Entwicklungsverläufe der Eisschilde

Die Gestalt der Küstenlinien wird in den kommenden Jahrhunderten entscheidend vom Meeresspiegelanstieg durch die Eisschilde aufgrund der Klimaerwärmung bestimmt sein. Schon heute verursachen Eisverluste in Grönland und der Antarktis nahezu ein Drittel des globalen mittleren Meeresspiegelanstiegs von 3,5 cm pro Jahrzehnt, und dieser Anstieg nimmt weiter zu. Dabei stellen sich die Fragen: Welche Instabilitäten der Eisschilde sind bekannt? Existieren kritische Schwellenwerte im Klimaantrieb, bei deren Überschreitung eine Rückentwicklung auf menschlicher Zeitskala unmöglich ist? Ist es möglich, dass wir mit der gegenwärtigen Erwärmung bereits einige dieser Schwellenwerte überschritten haben?

Der Anstieg des Meeresspiegels zählt zu den für Menschen bedrohlichsten Auswirkungen des Klimawandels. Küstengebiete sind weltweit am dichtesten besiedelt und intensivsten bewirtschaftet und daher besonders anfällig für infrastrukturelle Schäden und soziale Auswirkungen. Gleichzeitig verläuft der Anstieg des Meeresspiegels schleichend, wodurch er

oft weniger Aufmerksamkeit erhält als Extremwetterereignisse wie Hitzewellen, Dürren oder Starkregen.

Satellitenmessungen belegen heute einen globalen Anstieg des Meeresspiegels um mehr als 3 cm pro Dekade. Dabei hat das Schmelzen der Gletscher und Eisschilde mittlerweile einen größeren Anteil am Anstieg eingenommen

als die thermische Ausdehnung der Weltmeere durch die globale Erwärmung (Cazenave et al. 2018, vgl. Foto 2). Auch in Zukunft werden die Eisschilde entscheidend für die Entwicklung des Meeresspiegels sein. Deren Veränderungen wiederum hängen maßgeblich und auf komplexe Weise von der fortschreitenden Erwärmung der Atmosphäre und des Ozeans ab. Eisverluste in den Polargebieten werden über Jahrhunderte die Gestalt der Küstenlinien mitbestimmen, wengleich Schwellenwerte für deren Entwicklungspfade innerhalb des aktuellen, politisch-gesellschaftlichen Entscheidungshorizonts zum Klimaschutz liegen (Lenton et al. 2008).

Beobachtungen, Analysen aus der Systemtheorie und Modellierungen belegen, dass Schwellenwerte im Klimaantrieb existieren, nach deren Überschreitung die Eisschilde letztendlich in andere Konfigurationen der Eisbedeckung wechseln, z. B. mit deutlich weniger oder fast keinem Eis (Levermann et al. 2012). Abhängig vom Klimaantrieb (z. B. Ozeanerwärmung) und den Rückkopplungen (z. B. Absorption von mehr Strahlung durch mehr Schmelzen), ist der ausgelöste Eisrückgang oft nicht aufzuhalten, kaum zu verlangsamen und unumkehrbar auf menschlicher Zeitskala. Häufig werden solche Schwellenwerte für die Eisschilde mit denen anderer Subsysteme der Erde wie dem Ozean, dem Permafrost oder dem Meereis zusammen unter dem Begriff Kippunkte (engl. Tipping Points) zusammengefasst. Zunächst oft als eine rhetorische Metapher eingesetzt um abrupte, für Menschen gefährliche Klimaänderungen zu verdeutlichen, steht der Begriff Kippunkte heute für ein vielseitiges Konzept in der Klimawissenschaft und ist Gegenstand aktueller Forschung (Lenton et al. 2008).

Eigenschaften von Kippunkten der Eisschilde

Für das Klimasystem werden Kippelemente als regionale Systemkomponenten bezeichnet, deren Entwicklungspfade Schwellenwerte hinsichtlich des Klimaantriebs aufweisen (Levermann et al. 2012). Damit führt beispielsweise eine kleine Erwärmung der Atmosphäre und des Ozeans zu großskaligen, sich selbstverstärkenden und manchmal schnellen Übergängen der Eisschilde in einen neuen Systemzustand, z. B. der kontinentalen Eisbedeckung. „Schnell“ bezieht sich dabei auf die typische Zeitskala der Entwicklung der Erdsystemkomponente, nicht notwendigerweise auf jene menschlicher Planungshorizonte. Der Übergang in den neuen Systemzustand kann unumkehrbar sein, was aber keine notwendige Bedingung für einen Kippunkt ist. Für die Eisschilde sind viele Entwicklungen reversibel, wie die Erdgeschichte mit ihren wiederholten Eiszeitzyklen zeigt. Die Rückentwicklung muss aber nicht entlang desselben Pfades der Systemzustän-

de stattfinden wie der Zerfall (Hysterese). Daher können mehrere Systemzustände für bestimmte Klimabedingungen existieren. Welcher Zustand erreicht wird hängt damit von der Entwicklungsgeschichte des Systems ab.

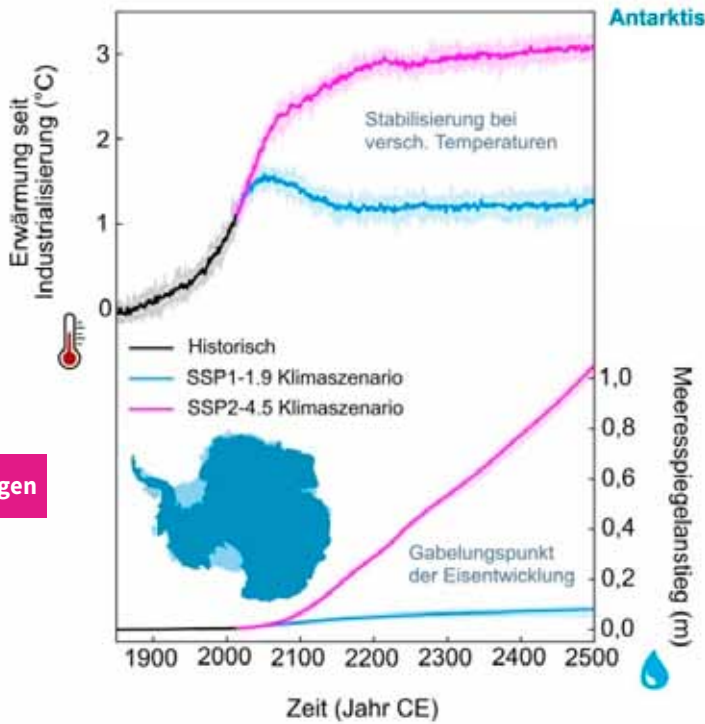
Für die Eisschilde ist dieses Hysterese-Verhalten gut nachgewiesen, genauso wie Gabelungspunkte von Entwicklungspfaden (Bifurkationen). Voraussetzung für Kippunktverhalten sind starke Rückkopplungen zwischen den Systemkomponenten, wie die Absorption von mehr Sonnenstrahlen durch dunklere, von Schmelzen geprägte Eisoberflächen. Diese Rückkopplungen sind aber nicht gleichzusetzen sind mit den Kippunkten selbst (Levermann et al. 2012). Der folgende Beitrag präsentiert einige bekannte Kippunkte der Eisschilde. Im Folgenden sollen aber statt Kippunkte vorzugsweise die spezifischeren Begriffe Schwellenwerte, Instabilitäten und Gabelungspunkte für die Systemeigenschaften der Eisschilde verwendet werden.

Feindaten folgen



Foto 2: Schmelzwassertümpel auf dem grönländischen Eisschild

Foto: Michael S. Nolan/Alamy-Stock-Foto



Feindaten folgen

Abb.1: Gabelungspunkte der Entwicklung des antarktischen Eisschildes. Projektion der Temperatur- (oben) und Eismassenentwicklung (unten) in der Antarktis für Klimaszenarien mit starkem (blau) und moderatem (rosa) Klimaschutz, im Anschluss an beobachtete Entwicklungen (schwarz). Die Erwärmung ist bezogen auf vorindustrielle Zeit, Eisverluste sind ausgedrückt als äquivalenter, globaler Meeresspiegelanstieg

Grafik: Theresa Schreglmann, nach Park et al., 2023

Instabilität des marinen Eisschildes der Westantarktis

Für die eisdynamische Entwicklung der Antarktis spielt eine entscheidende Rolle, dass weite Teile in der Westantarktis heute unterhalb des Meeresspiegels liegen. Darüber hinaus weisen viele Gebiete eine Bathymetrie auf, die sich zum Landesinneren hin vertieft, also retrograd ist.

Feindaten folgen

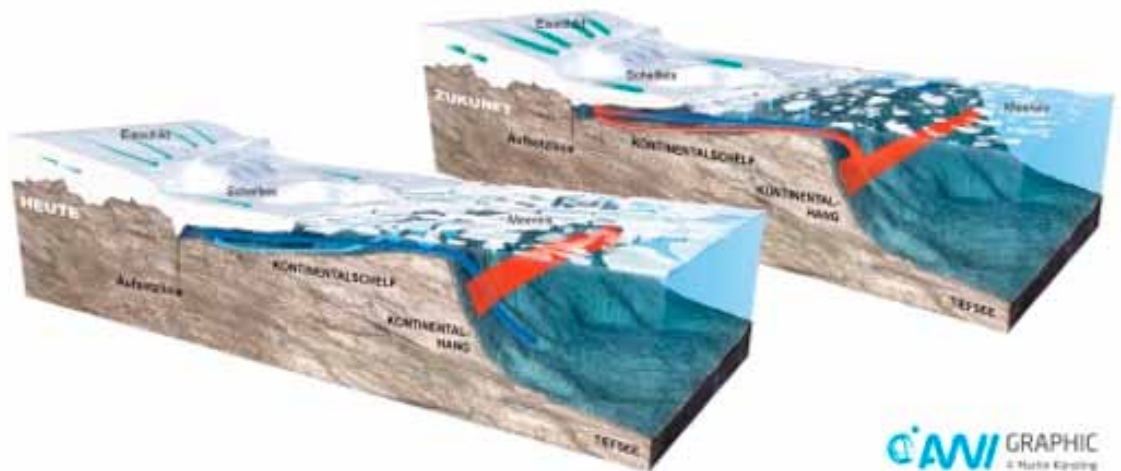


Abb. 2: Heute schafft das Ausfrieren von Salzlauge im Zuge der Meereisbildung eine hydrographische Barriere, die verhindert, dass vergleichsweise warme Wassermassen zum Kontinentalschelf vordringen (vorne). In einem zukünftig wärmeren Klima wird diese Barriere schwächer, was einen ozeanischen Wärmetransport hin zum Schelfeis und zur Aufsetzlinien begünstigt und eine positive Rückkopplung auslöst (hinten)

Quelle: AWI, Martin Künsting

Die Menge an Eis, die ein Eisstrom ins Meer transportiert, wird an einem hypothetischen Querschnitt entlang der Aufsetzlinie erfasst. Die Aufsetzlinie ist jene Grenze, an der das auf dem geologischen Untergrund aufliegende Inlandeis der Eisströme in aufschwimmendes Schelfeis übergeht. Zieht sich die Aufsetzlinie weiter in Gebiete tieferer Topographie zurück, vergrößert sich dieser Querschnitt, wodurch mehr Eis abtransportiert wird. Dies wiederum führt zu einem weiteren Rückzug der Aufsetzlinie und bewirkt somit eine sich selbst verstärkende Rückkopplung. Gleichzeitig nimmt die Kontaktfläche mit dem Ozean zu, was wiederum zu verstärktem Schmelzen, Destabilisierung und Rückzug führt.

Die Mechanismen für diese Instabilität sind seit den 1970er-Jahren hinreichend bekannt, unumstritten und durch Modellierungen sehr gut abgebildet (Weertman 1974). Allerdings bleiben der aktuelle Zustand des Systems, sowie die genauen klimatischen Schwellenwerte für einen Zerfall des Westantarktischen Eisschild vergleichsweise unsicher. Es häufen sich aber Anzeichen dafür, dass die Erwärmungsraten im Amundsensee-Gebiet der Westantarktis bereits frühe Stadien des Zusammenbruchs ausgelöst haben (Naughten et al. 2023).

Schlüsselrolle der Schelfeisgebiete in der Antarktis

Neben den topographischen Gegebenheiten spielen die Schelfeisgebiete eine entscheidende Rolle für die Stabilität des antarktischen Eisschildes (vgl. Foto 2). Die Küstenlinie der Antarktis ist größtenteils von Schelfeisflächen gesäumt, die am Ende von Eisströmen aus dem Inneren des antarktischen Kontinents entstehen und gleichzeitig deren Eistransport verlangsamen. Die



Feindaten folgen

Foto 3: Schelfeis im Weddellmeer, nahe der Spitze der Antarktischen Halbinsel

Stabilität des Schelfeises und somit die Wirksamkeit der Rückhaltekkräfte hängen stark vom Wärmeeintrag des Ozeans in die Kavernen unter den Schelfeisen ab. Eine Verringerung der Rückhaltekkräfte des Schelfeises beschleunigt den Abfluss des geründeten Eises in den Ozean und steigert damit die Eisverluste und den Beitrag zum Anstieg des Meeresspiegels.

Satellitendaten zeigen, dass die Mächtigkeit des Schelfeises in den meisten Gebieten der Antarktis abnimmt. Gleichzeitig zeigen Klimaprojektionen mit einem hochauflösendem Ozeanmodell, dass sich die Amundsensee in Zukunft weiter erwärmen und das Schmelzen des Schelfeises weiter voranschreiten wird (Naughten et al. 2023). Bereits eine globale Erwärmung von 1,5 °C führt zu Ozeantemperaturen, die hoch genug sind, die Rückhaltekkräfte der Schelfeisgebiete soweit zu reduzieren, dass ein Entwicklungspfad mit kollabiertem westantarktischen Eisschild wahrscheinlich ist (Naughten et al. 2023, vgl. Abb. 1).

Meereis–Ozean Wechselwirkungen in der Antarktis

Ein weiterer Gabelungspunkt ist durch die Wechselwirkungen zwischen Meereis und Ozeanströmungen im Weddellmeer und dem benachbarten Filchner-Ronne-Schelfeis der Westantarktis gegeben (vgl. Abb. 2). Im südlichen Weddellmeer bildet sich während der Herbst- und Wintermonate der Südhemisphäre eine große Meereisfläche aus. Dabei rinnt Salzlauge in die darunterliegenden, etwa -1,9 °C kalten Wassermassen. Dies führt zur Bildung einer

besonders dichten Wassermasse, bekannt als hochsalines Schelfwasser, die als Barriere für die aus der Tiefsee anströmenden, wärmeren Wassermassen fungiert. Heute dominiert ein hydrographischer Zustand, in dem das Schelfeis vor dem Einstrom der bis zu 0,8 °C warmen Wassermassen geschützt ist, die entlang des Kontinentalsockels als sogenanntes zirkumpolares Tiefenwasser vorherrschen.

Steigt nun im Zuge des Klimawandels die Lufttemperatur über dem Weddellmeer, ist über eine Abnahme des Meereises die Integrität dieser hydrographischen Barriere gefährdet. Fällt diese Barriere, strömen vergleichsweise warme Wassermassen auf den Kontinentalschelf und durch tiefe Gräben bis weit unter das Schelfeis, wo sie die Schmelzrate erhöhen. Das dabei entstehende Schmelzwasser wiederum verstärkt eine Umwälzbewegung, die weiteres warmes Wasser aus dem Weddellmeer unter das Schelfeis führt – ein weiterer positiver Rückkopplungsmechanismus.

Erste Anzeichen, dass diese Entwicklung heute schon eingesetzt hat, sind im Rückgang des Meereises in dieser Region zu beobachten. Zusätzlich belegen ozeanographische Verankerungsmessungen am Rand des Kontinentalsockels, dass warme Wassermassen bereits jetzt periodisch in Richtung des Schelfeises vordrin-

” Eine Reduktion der globalen Erwärmung führt immer zu einer Verlangsamung des Eisrückzugs und verleiht zukünftigen Generationen mehr Zeit, sich auf den unvermeidbaren Meeresspiegelanstieg vorzubereiten.

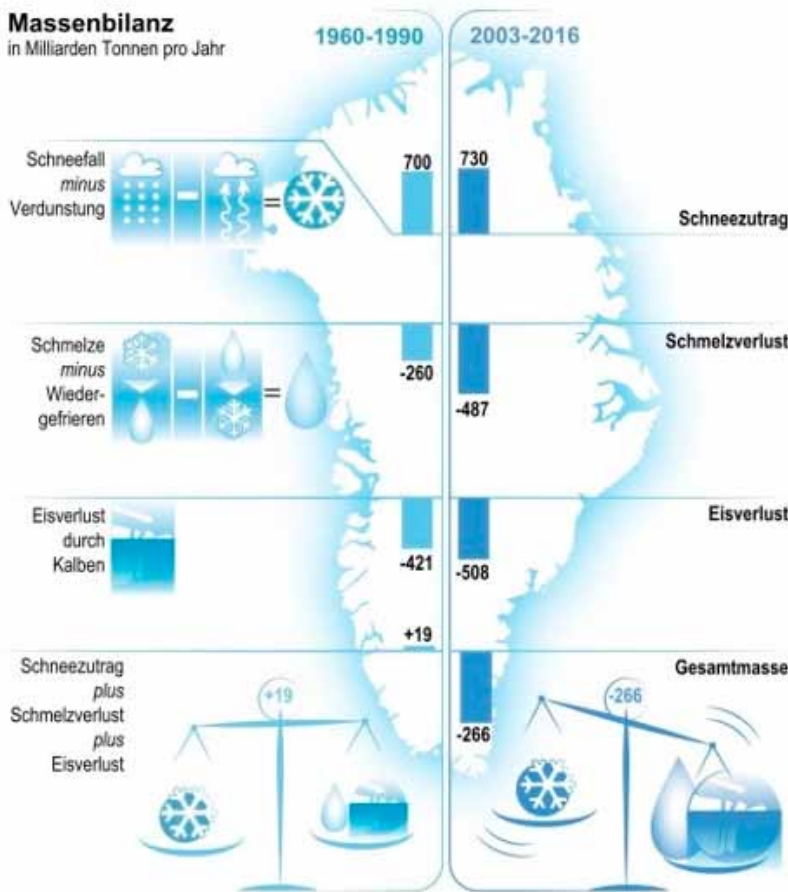


Abb. 3: Komponenten der Massenbilanz des grönländischen Eisschildes. Änderung der Massenbilanzkomponenten des grönländischen Eisschild heute (2003–2016) im Vergleich zu 1960–1990. Bezogen auf den Zutrag durch Schneefall, verliert der Eisschild heute 36 % zu viel Masse

Grafik: AWI, Martin Künsting

gen. Für Emissions-Szenarien mit moderater Klimaerwärmung projizieren Schelfeis-Ozean-Modelle den Durchbruch von warmem Wasser aus dem Weddellwirbel unter das Schelfeis um das Jahr 2070. Dieser Prozess ist nicht aufzuhalten, selbst wenn sich die Erwärmung der Lufttemperatur stabilisieren sollte (Hellmer et al. 2012).

Grönlands unabwendbarer Eisverlust durch den Klimawandel

Die Arktis ist ein Hotspot der Klimaerwärmung: Im Zeitraum von 1979 bis 2021 stiegen die Temperaturen hier um etwa das Vierfache schneller an als im weltweiten Durchschnitt (Rantanen et al. 2022). Satellitenbeobachtungen zeigen, dass heute der grönländische Eisschild fast 36 % mehr Masse verliert als durch Schneezuwachs hinzukommt (vgl. Abb. 3). Im Jahr 2019 schmolz wahrscheinlich zum ersten Mal seit eintausend Jahren die gesamte Menge an Winterschnee in den Sommermonaten vollständig ab (Hörhold et al. 2023, Sasgen et al. 2020). Mithilfe eines geometrischen Ansatzes lässt sich abschätzen, wie stark das Volumen des Eisschildes unter den aktuellen klimatischen Bedingungen zurückge-

hen müsste, um wieder einen Gleichgewichtszustand zu erreichen – ein Verfahren was für Gebirgsgletscher gängig Anwendung findet (Box et al. 2022).

Legt man die letzten Massenverluste der letzten 20 Jahre zugrunde, müsste der Eisschild demnach um etwa $3,3 \pm 0,8 \%$ schrumpfen, um wieder einen Gleichgewichtszustand zu erreichen, was einem prognostizierten Meeresspiegelanstieg von 27 ± 7 cm entspräche. Wären in Zukunft klimatische Bedingungen wie in den Schmelzrekordjahren 2012 und 2019 die Regel, würde der unvermeidliche Meeresspiegelanstieg bei 78 ± 14 cm liegen. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass aus diesem Verfahren nicht abgeleitet werden kann, wieviel Zeit die Anpassung benötigt (Box et al., 2022).

Grönlands Eisbedeckung in einem wärmeren Klima

Für den grönländischen Eisschild bringen zahlreiche starke positive Rückkopplungseffekte, beispielsweise zwischen Schmelzen und der Verringerung der Eishöhe oder der Rückstrahlung, Instabilitäten mit sich (vgl. Foto 3). Aktuelle Studien zeigen, dass Gabelungspunkte bei globalen Temperaturanomalien von $+0,6$ °C und $+1,6$ °C im Vergleich zur vorindustriellen Ära existieren (Höning et al. 2023). Das Überschreiten dieser kritischen Werte würde langfristig – gemeint sind über Jahrtausende hinweg – zu einem Anstieg des Meeresspiegels um 1,8 m bzw. 6,9 m führen, wenn der Eisschild auf rund ein Viertel schrumpft bzw. Grönland nahezu eisfrei wird. Eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf $+1,5$ °C entsprechend dem Ziel des Pariser Klimaabkommens und könnte damit ein Überschreiten des zweiten Schwellenwerts möglicherweise verhindern. Um aus dem neuen, unvergletscherten Zustand wieder Eis aufzubauen, gelten entsprechend dem Hysterese-Verhalten eigene Schwellenwerte, deren Temperaturen deutlich unterhalb denen des Zerfalls liegen (vgl. Abb. 4).

Modellstudien deuten darauf hin, dass ein vorübergehendes Überschreiten der klimatischen Schwellenwerte (engl. overshoot) möglich ist, ohne den grönländischen Eisschild in einen neuen Systemzustand zu bringen (Bochow et al. 2023). Dieses Verhalten ist auf die träge Anpassung des Eisschildes an neue klimatische Bedingungen zurückzuführen. Diese Schlussfolgerung basiert allerdings auf der Annahme, dass die verwendeten Modellsysteme für die Temperaturen der Überschreitungsphase Gültigkeit besitzen. Angesichts der komplexen Wechselwirkungen und deren Darstellung in Modellen, der dramatischen Erwärmung der Arktis und Beobachtung fundamentaler Veränderungen der Eisoberfläche vor Ort, bleibt Raum für Zweifel an dieser Annahme.

Feindaten folgen

Fazit

Dieser Beitrag hat gezeigt, dass eine Vielzahl von Instabilitäten hinsichtlich der Eisschildentwicklung existiert. Gerade weil die Auswirkungen so groß sind und die kritischen Schwellenwerte für stabile Eisschilde sehr nah an heutigen Klimabedingungen liegen, ist es unerlässlich, die Erwärmung auf ein niedriges Niveau zu begrenzen. Unabhängig davon, ob ein Kippunkt der Eisschilde bereits überschritten ist, bleibt der Emissionspfad, den die globale Gesellschaft die nächsten Jahrzehnte einschlagen wird, höchst relevant. Denn eine Reduktion der Erwärmung führt immer zu einer Verlangsamung des Eisrückzugs und verleiht zukünftigen Generationen mehr Zeit, sich auf den unvermeidbaren Meeresspiegelanstieg vorzubereiten. ■

LITERATUR

- Bochow, N. et al. (2023): Overshooting the critical threshold for the Greenland ice sheet. *Nature*, 622 (7983), S. 528–536 (doi.org/10.1038/s41586-023-06503-9)
- Box, J. E. et al. (2022): Greenland ice sheet climate disequilibrium and committed sea-level rise. *Nature Climate Change*, 12 (9), S. 808–813 (doi.org/10.1038/s41558-022-01441-2)
- Cazenave, A. et al. (2018): Global sea level budget 1993-present. *Earth System Science Data*, 10 (3), S. 1551–1590 (doi.org/10.5194/essd-10-1551-2018)
- Hellmer, H.H. et al. (2012): Twenty-first-century warming of a large Antarctic ice-shelf cavity by a redirected coastal current. *Nature*, 485 (7397), S. 225–228. <https://doi.org/10.1038/nature11064>
- Höning, D. et al. (2023): Multistability and Transient Response of the Greenland Ice Sheet to Anthropogenic CO₂ Emissions. *Geophysical Research Letters*, 50 (6), e2022GL101827 (doi.org/10.1029/2022GL101827)
- Hörhold, M. et al. (2023): Modern temperatures in central-north Greenland warmest in past millennium. *Nature*, 613 (7944), S. 503–507 (doi.org/10.1038/s41586-022-05517-z)
- Joughin, I. et al. (2014): Marine ice sheet collapse potentially under way for the Thwaites Glacier in West Antarctica. *Science*, 344 (6185), S. 735–738 (doi.org/10.1126/science.1249055)
- Lenton, T. M. et al. (2008): Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (6), S. 1786–1793 (doi.org/10.1073/pnas.0705414105)
- Levermann, A. et al. (2012): Potential climatic transitions with profound impact on Europe: Review of the current state of six 'tipping elements of the climate system'. *Climatic Change*, 110 (3–4), S. 845–878 (doi.org/10.1007/s10584-011-0126-5)
- Naughten, K. A. et al. (2023): Unavoidable future increase in West Antarctic ice-shelf melting over the twenty-first century. *Nature Climate Change*, 13 (11), S. 1222–1228. (doi.org/10.1038/s41558-023-01818-x)
- Park, J.-Y. et al. (2023): Future sea-level projections with a coupled atmosphere-ocean-ice-sheet model. *Nature Communications*, 14 (1), S. 636 (doi.org/10.1038/s41467-023-36051-9)
- Rantanen, M. et al. (2022): The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, 3 (1), S. 168 (doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3)
- Sasgen, I. et al. (2020): Return to rapid ice loss in Greenland and record loss in 2019 detected by the GRACE-FO satellites, *Communications Earth & Environment*, 1 (8) (doi.org/10.1038/s43247-020-0010-1)

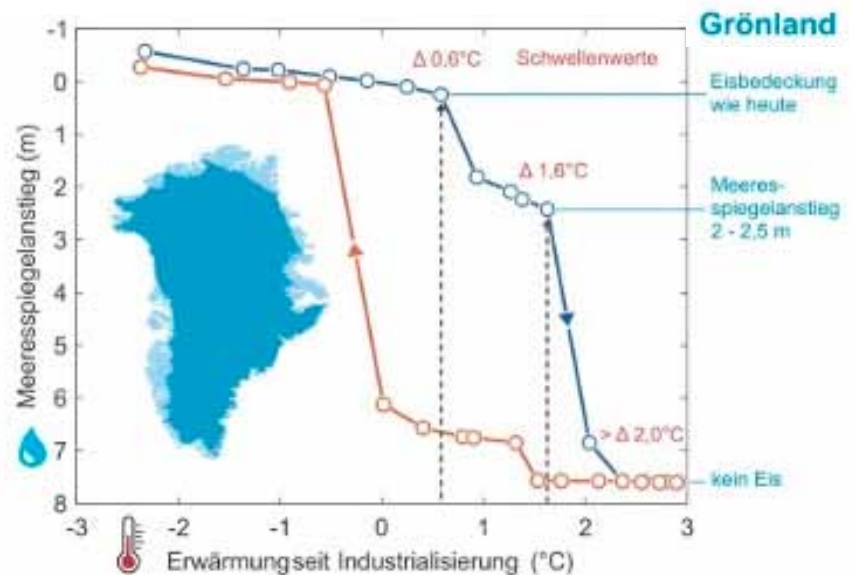


Abb.4: Eisbedeckung Grönlands für verschiedene Klimabedingungen. Systemzustände (Eisbedeckung) des grönländischen Eisschildes abhängig von der Erwärmung seit der Industrialisierung. Das Systemdiagramm zeigt den heutigen Entwicklungspfad des Eisrückgangs (blau) und den möglichen Pfad der Wiederherstellung von einem eisfreien Zustand (orange). Für einen Wiederaufbau des Eises muss der Klimaantrieb weit unter den ursprünglichen Temperaturschwellenwert (1,5 °C) verringert werden (Hysterese)

Quelle: Theresa Schreglmann, nach Höning et al. 2023

- Weertman, J. (1974): Stability of the Junction of an Ice Sheet and an Ice Shelf. *Journal of Glaciology*, 13 (67), S. 3–11. 13(67), S.3–11. (doi.org/10.3189/S0022143000023327)

Feindaten folgen

AUTOREN UND KONTAKT

- Ingo Sasgen, geb. XXXX
Sektion für Glaziologie, Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven, Institut für Geographie an der Universität Augsburg
ingo.sasgen@awi.de
Schwerpunkte: bitte zwei oder drei Schwerpunkte ergänzen
- Olaf Eisen, geb. XXXX
Sektion für Glaziologie, Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven, Fakultät für Geowissenschaften an der Universität Bremen
olaf.eisen@awi.de
Schwerpunkte: bitte zwei oder drei Schwerpunkte ergänzen
- Jonathan Simon, geb. XXXX
Institut für Geographie an der Universität Augsburg
Mail-Adresse ergänzen
Schwerpunkte: bitte zwei oder drei Schwerpunkte ergänzen
- Maria Hörhold, geb. XXXX
Sektion für Glaziologie, Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven
XXX@awi.de
Schwerpunkte: bitte zwei oder drei Schwerpunkte ergänzen
- Wolfgang Buermann, geb. XXXX
Institut für Geographie an der Universität Augsburg
Mail-Adresse ergänzen
Schwerpunkte: bitte zwei oder drei Schwerpunkte ergänzen