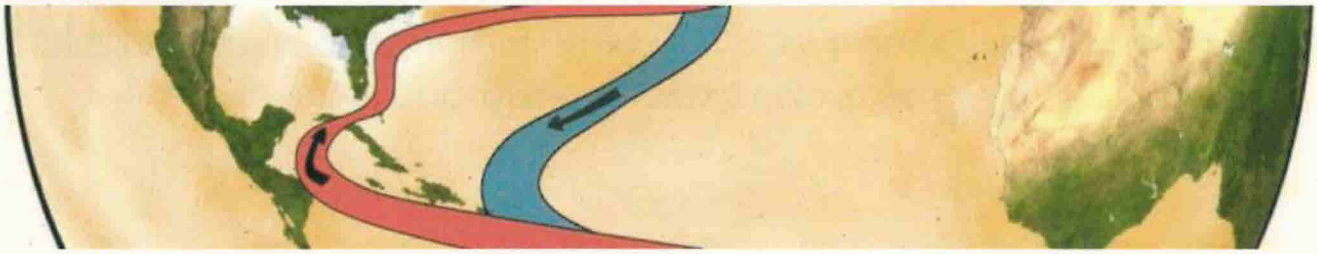
10. Feb 2024 | Von Stefan Rahmstorf | Lesedauer ca. 6 Minuten | Kommentare deaktiviert

Neue Studie legt nahe, dass die atlantische Umwälzzirkulation AMOC „auf Kippkurs ist"



Heute wurde in Science Advances eine neue Studie veröffentlicht. Der Titel sagt schon, worum es geht: „Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course." Die Studie folgt einer Studie dänischer Kollegen, die im vergangenen Juli für Schlagzeilen sorgte und ebenfalls nach Frühwarnsignalen für die Annäherung an einen AMOC-Kipppunkt suchte (ich haben sie hier besprochen), allerdings mit ganz anderen Daten und Methoden.

Die neue Studie von van Westen et al. ist ein wichtiger Fortschritt in der AMOC-Stabilitätsforschung und kommt von dem meiner Meinung nach weltweit führenden Forschungszentrum für AMOC-Stabilitätsstudien in Utrecht/Holland. (Einige ihrer Beiträge aus den letzten 20 Jahren sind in der Literaturliste der Studie aufgeführt, darunter die Autoren Henk Dijkstra, René van Westen, Nanne Weber, Sybren Drijfhout und mehr.)

Das Papier ist das Ergebnis eines großen Rechenaufwands: es basiert auf einer Klimasimulation mit einem state-of-the-art Klimamodell (dem CESM-Modell mit einer horizontalen Auflösung von 1° für die Ozean-/Meereis-Komponente und 2° für die Atmosphäre-/Landkomponente) für 4.400 Modelljahre. Die Rechnung dauerte sechs Monate auf 1.024 Rechnerkernen in der niederländischen nationalen Supercomputing-Einrichtung, dem größten System der Niederlande für Hochleistungsrechnen.

Es ist der erste systematische Versuch, den AMOC-Kipppunkt in einem gekoppelten globalen Ozean-Atmosphäre-Klimamodell mit guter räumlicher Auflösung zu bestimmen, wobei der Quasi-Gleichgewichtsansatz verwendet wird, den ich 1995 mit einem reinen Ozeanmodell mit relativ geringer Auflösung entwickelt habe, da vor 30 Jahren die Computerleistung noch arg begrenzt war.

Für alle, die mit der Problematik des Risikos abrupter Änderungen der Ozeanzirkulation nicht vertraut sind, habe ich letztes Jahr in diesem Blogbeitrag zehn wichtige Fakten dazu kurz zusammengefasst.

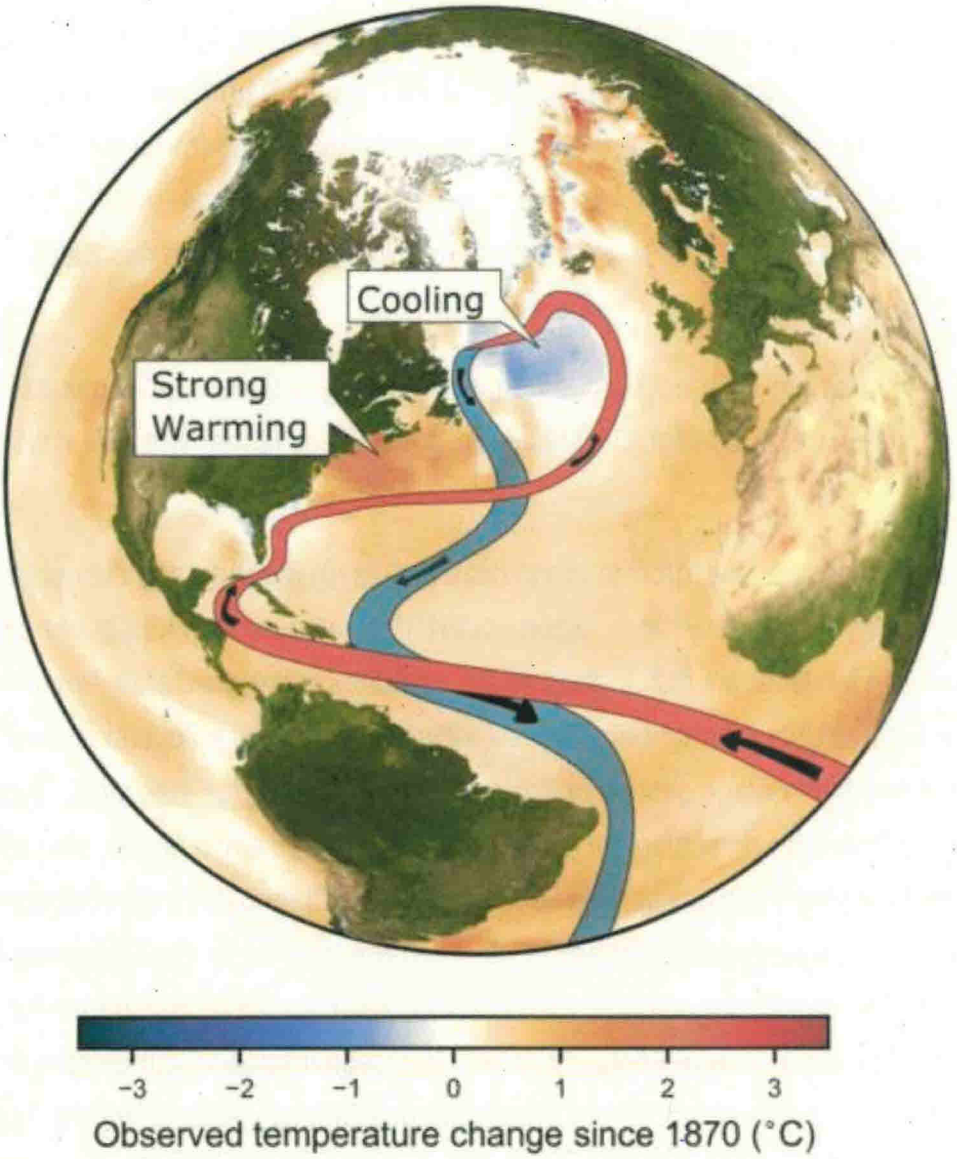


***Abb. 1** . Schematische Darstellung der AMOC, wobei warmes Wasser nach Norden fließt, in nördlichen Breiten absinkt und dann als kalte Tiefenströmung nach Süden zurückkehrt. Die Hintergrundkarte zeigt die Veränderung der Meeresoberflächentemperatur seit 1870 basierend auf Meeresbeobachtungen, einschließlich des Fingerabdrucks einer AMOC-Abschwächung: der „Kälteblase" im subpolaren Nordatlantik und der übermäßigen Erwärmung nördlich des Golfstroms.*

Abbildung nach Caesar et al., Nature 2018.

Kommen wir gleich zu den wichtigsten Erkenntnissen der neuen Studie:

1. Sie bestätigt, dass die AMOC einen Kipppunkt hat, ab dem sie versiegt, wenn der Nordatlantik mit Süßwasser verdünnt wird (durch zunehmende Niederschläge, Flussabfluss und Schmelzwasser), wodurch sich sein Salzgehalt und seine Dichte verringern. Dies wurde durch einfache konzeptionelle Modelle seit Stommel 1961 nahegelegt , für ein 3D-Ozeanzirkulationsmodell in meinem Nature-Artikel von 1995 bestätigt und später unter anderem in einem ersten Modellvergleichsprojekt im Jahr 2005. Jetzt wurde dieser Kipppunkt zum ersten Mal in einem modernen global gekoppelten Klimamodell nachgewiesen, was die Hoffnung zunichte macht, dass mit mehr Modelldetails und Auflösung irgendeine in einfachen Modellen nicht erfasste Rückkopplung einen AMOC-Kollaps verhindern könnten. (Diese Hoffnung war nie sehr überzeugend, da Paläoklimadaten eindeutig abrupte AMOC-Veränderungen in der Erdgeschichte zeigen, einschließlich AMOC-Zusammenbrüche, die durch Schmelzwassereintrag ausgelöst wurden (Heinrich-Ereignisse). Der letzte AMOC-Zusammenbruch ereignete sich vor etwa 12.000 Jahren und löste in der Nordatlantikregion das Kälteereignis der jüngeren Dryas aus.)

2. Sie bestätigt anhand von Beobachtungsdaten, dass sich der Atlantik „auf Kippkurs" befindet, sich also auf diesen Kipppunkt zubewegt. Die Milliarden-Dollar-Frage lautet: Wie weit ist dieser Kipppunkt entfernt?

3. Drei aktuelle Studien (weitere Informationen dazu in diesem Blogbeitrag), die unterschiedliche Daten und Methoden verwenden, haben argumentiert, dass wir uns dem Kipppunkt nähern und dass er möglicherweise viel näher als früher gedacht ist, und dass sogar die Gefahr besteht, dass wir ihn im Laufe der nächsten Jahrzehnte überschreiten. Allerdings wurde die Zuverlässigkeit der verwendeten Methoden in Frage gestellt (wie hier bei der KlimaLounge diskutiert). Basierend auf ihrer epischen Computersimulation schlug die niederländische Gruppe einen neuen, physikbasierten und beobachtbaren Typ eines Frühwarnsignals vor. Es nutzt eine Diagnostik – den Süßwassertransport durch die AMOC am Eingang des Südatlantiks über den Breitengrad an der Südspitze Afrikas – die ich 1996 in einer Studie vorgeschlagen habe. Sie benennen keine konkrete Zeitspanne für das Erreichen des Kipppunkts, da hierfür weitere Beobachtungen der Ozeanzirkulation auf diesem Breitengrad erforderlich sind. Sie verweisen jedoch auf die letztjährige Ditlevsen-Studie mit der Aussage, dass „ihre Schätzung des Kipppunkts (2025 bis 2095, 95% Konfidenzintervall) akkurat sein könnte."

4. Die neue Studie bestätigt frühere Bedenken, dass Klimamodelle die Stabilität der AMOC systematisch überschätzen. Bezüglich des entscheidenden AMOC-Süßwassertransports in Modellen weisen sie darauf hin, dass die meisten Modelle ihn nicht korrekt wiedergeben: „Dies stimmt nicht mit den Beobachtungsdaten überein, was ein bekannter Fehler in den Modellen der CMIP-Phase 3, Phase 5 und Phase 6 ist." Die meisten Modelle haben sogar das falsche Vorzeichen dieser wichtigen Diagnostik, die bestimmt, ob die Strömung den atlantischen Salzgehalt stabilisiert oder destabilisiert, und dieser Modellfehler ist meiner Ansicht nach ein Hauptgrund dafür, dass der IPCC das Risiko eines AMOC-Kollapses bisher unterschätzt hat.

5. Die Studie liefert auch detailliertere und höher aufgelöste Simulationen der Auswirkungen eines AMOC-Kollapses auf das Klima, allerdings isoliert betrachtet und nicht mit den Auswirkungen der CO2-induzierten globalen Erwärmung kombiniert (Abb. 2). Sie zeigt, wie insbesondere Nordeuropa von Großbritannien bis Skandinavien verheerende Auswirkungen erleiden würde, wie beispielsweise eine Abkühlung der Wintertemperaturen um 10 °C bis 30 °C innerhalb eines Jahrhunderts, die innerhalb von ein oder zwei Jahrzehnten zu einem völlig anderen Klima führen würde. Dies ist im Einklang mit paläoklimatischen Daten für abrupte Änderungen der Ozeanzirkulation. Darüber hinaus zeigen sie erhebliche Verschiebungen der tropischen Niederschlagsgürtel. Diese (und viele weitere) Auswirkungen eines AMOC-Kollapses sind seit langem bekannt, wurden jedoch bisher nicht in einem Klimamodell von so hoher Qualität aufgezeigt.

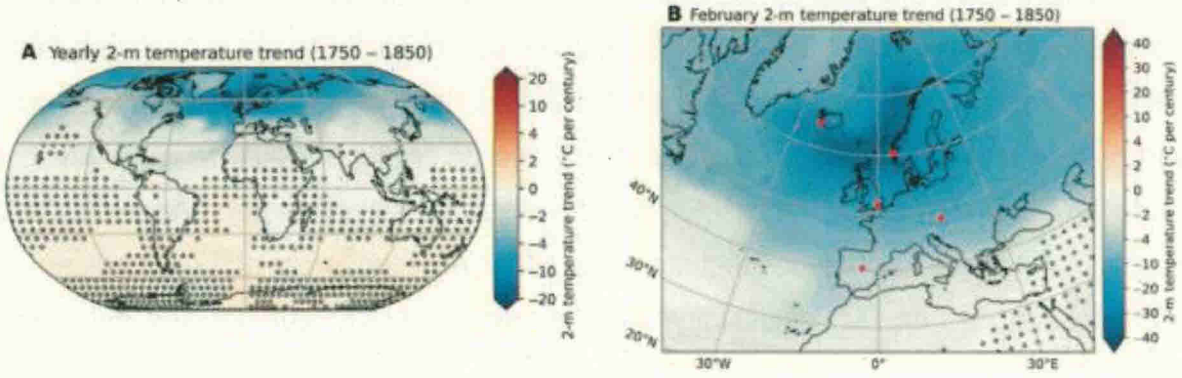


Abb. 2 Temperaturänderung infolge des AMOC-Kollapses (während der Modelljahre – nicht Kalenderjahre! – 1750–1850) in der neuen Modellsimulation von van Westen et al. 2024. Das sind besonders schlechte Nachrichten für Großbritannien und Skandinavien .

Angesichts der Auswirkungen muss das Risiko eines AMOC-Zusammenbruchs unbedingt vermieden werden. Wie ich schon früher sagte: Die Frage ist nicht, ob wir sicher sind, dass dies passieren wird. Es geht darum, dass wir dies mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,9 % ausschließen müssen. Sobald wir ein eindeutiges Warnsignal haben, wird es angesichts der Trägheit des Systems zu spät sein, etwas dagegen zu unternehmen.

Insgesamt trägt die neue Studie erheblich zur wachsenden Besorgnis über einen AMOC-Zusammenbruch in nicht allzu ferner Zukunft bei. Damit verleiht es den jüngsten Berichten noch mehr Gewicht, die starke Warnungen formuliert haben, wie der OECD Climate Tipping Points Report vom Dezember 2022 und der im Dezember 2023 veröffentlichte Global Tipping Points Report. Dieses Risiko weiterhin zu ignorieren kann uns sehr teuer zu stehen kommen.

Update 10. Februar: In den Reaktionen auf die Studie sehe ich, dass einige sie als ein unrealistisches Modellszenario für die Zukunft missverstehen. Das ist sie aber nicht. Bei dieser Art von Experiment handelt es sich keineswegs um eine Zukunftsprojektion, sondern vielmehr um die Bestimmung der Gleichgewichts-Stabilitätskurve des Klimamodells (das ist der oben erwähnte Quasi-Gleichgewichtsansatz). Um nahe am Gleichgewicht zu bleiben, muss der Süßwassereintrag extrem langsam gesteigert werden, weshalb dieses Experiment so viel Computerzeit in Anspruch nimmt. Nachdem der Kipppunkt des Modells auf diese Weise gefunden worden war, wurde er zur Suche von Vorwarnzeichen verwendet, die uns schon vor dem Erreichen des Kipppunkts warnen könnten, so genannte "Frühwarnsignale". Dann schauten sich die Wissenschaftler Reanalysedaten an (das sind auf Beobachtungsdaten basierende Produkte, siehe Abb. 6 der Studie), um dort nach einem Frühwarnsignal zu suchen. Die Schlussfolgerung, dass sich die AMOC "auf Kippkurs" befindet, basiert auf diesen Daten.

Mit anderen Worten: Es sind Beobachtungsdaten aus dem Südatlantik, die darauf hindeuten, dass die AMOC auf Kippkurs ist. Nicht die Modellsimulation, die nur dazu diente, ein besseres Verständnis dafür zu bekommen, welche Frühwarnsignale funktionieren und warum.

Veröffentlicht in:

Veröffentlicht von Stefan Rahmstorf

www.pik-potsdam.de/~stefan/

Stefan Rahmstorf ist Klimatologe und Abteilungsleiter am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und Professor für Physik der Ozeane an der Universität Potsdam. Seine Forschungsschwerpunkte liegen auf Klimaänderungen in der Erdgeschichte und der Rolle der Ozeane im Klimageschehen.

Spektrum.de Newsletter

Bleiben Sie auf dem Laufenden mit dem kostenlosen Spektrum.de Newsletter - fünf Mal die Woche von Dienstag bis Samstag!

IHRE E-MAIL-ADRESSE ANMELDEN

☐ **Ja, ich möchte zusätzlich regelmäßig über Produktangebote aus dem Verlag Spektrum der Wissenschaft informiert werden.**

(Der Versand des Newsletters »Spektrum informiert« erfolgt ein- bis zweimal im Monat)

Umwelt Bundesamt

Für Mensch und Umwelt

Stand: 20. November 2023

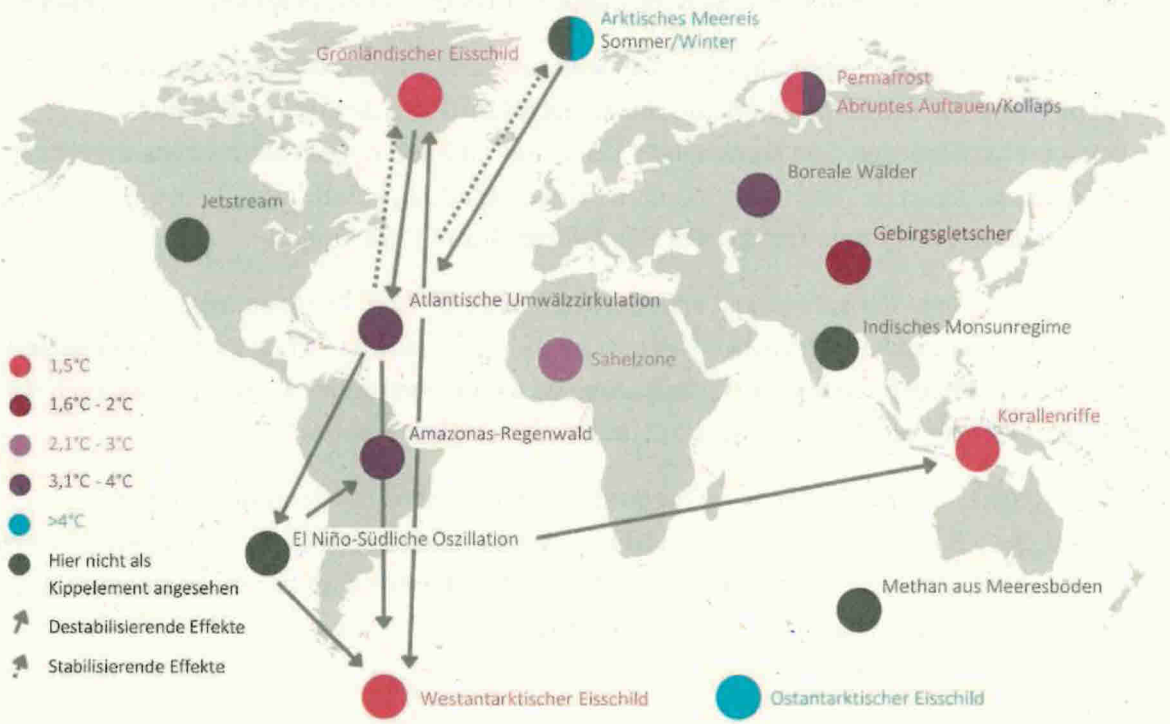
Kipppunkte und kaskadische Kippdynamiken im Klimasystem

Einzelne Komponenten des Erdsystems, beispielsweise Ökosysteme, Ozeanzirkulationen und Eisschilde sind durch den fortschreitenden Klimawandel stark veränderten Bedingungen ausgesetzt. Dabei besteht das Risiko, dass sich-selbst-verstärkende Dynamiken zwischen verschiedenen Erdsystemelementen ausgelöst werden, die in einem neuen Systemzustand münden könnten (wie zum Beispiel dem Abschmelzen eines Eisschildes). Diese Kippdynamiken wären auch bei einer Stabilisierung oder Verringerung der globalen Temperatur nicht direkt umkehrbar.

Komponenten des Erdsystems, bei denen kritische Schwellenwerte bezüglich ihrer Stabilität, sogenannte Kipppunkte, identifiziert wurden, werden als Kippelemente bezeichnet (Abbildung 1).

So kann beispielsweise der Amazonas-Regenwald, ein weltweit einzigartiges Ökosystem, in einen waldlosen Zustand übergehen, wenn Entwaldung und Klimaveränderungen bestimmte Kipppunkte überschreiten. Große Strömungsmuster in den Ozeanen können ihre Kraft verlieren, mit globalen Konsequenzen für Wettermuster und Klimabedingungen. {Hintergrundpapier: Kapitel 1}

Abbildung 1 Kippelemente des Klimasystems



Wichtige Kippelemente und ihre Kipppunkte bei einer bestimmten globalen Erwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Niveau (1850 1900). Korallenriffe, Permafrostböden sowie Grönländischer und Westantarktischer Eisschild (rot) drohen bereits bei einer anhaltenden globalen Erwärmung von 1,5 °C ihre Kipppunkte zu erreichen. Die Pfeile symbolisieren die mögliche gegenseitige Beeinflussung verschiedener Kippelemente auf globaler Ebene und illustrieren das Risiko sogenannter Kippkaskaden.

Quelle: Eigene Darstellung, Climate Analytics, nach Armstrong McKay et al., 2022 und Wunderling et al. 2023

Das Kippen einzelner Elemente des Erdsystems würde weltweit mit erheblichen Folgen für Gesellschaften und Ökosysteme einhergehen. Für folgende Kippelemente wurden besondere Risiken entweder aufgrund des unmittelbaren Risikos eines Überschreitens des Kipppunktes durch veränderte Klimabedingungen oder hinsichtlich besonders schwerwiegender Folgen identifiziert: der Grönländische Eisschild, der Westantarktische Eisschild, der Amazonas-Regenwald, die Ozeanische Zirkulation im Nordatlantik und die Korallenriffe {Hintergrundpapier: Kapitel 2.1}.

Das Risiko von kaskadischen Kippdynamiken

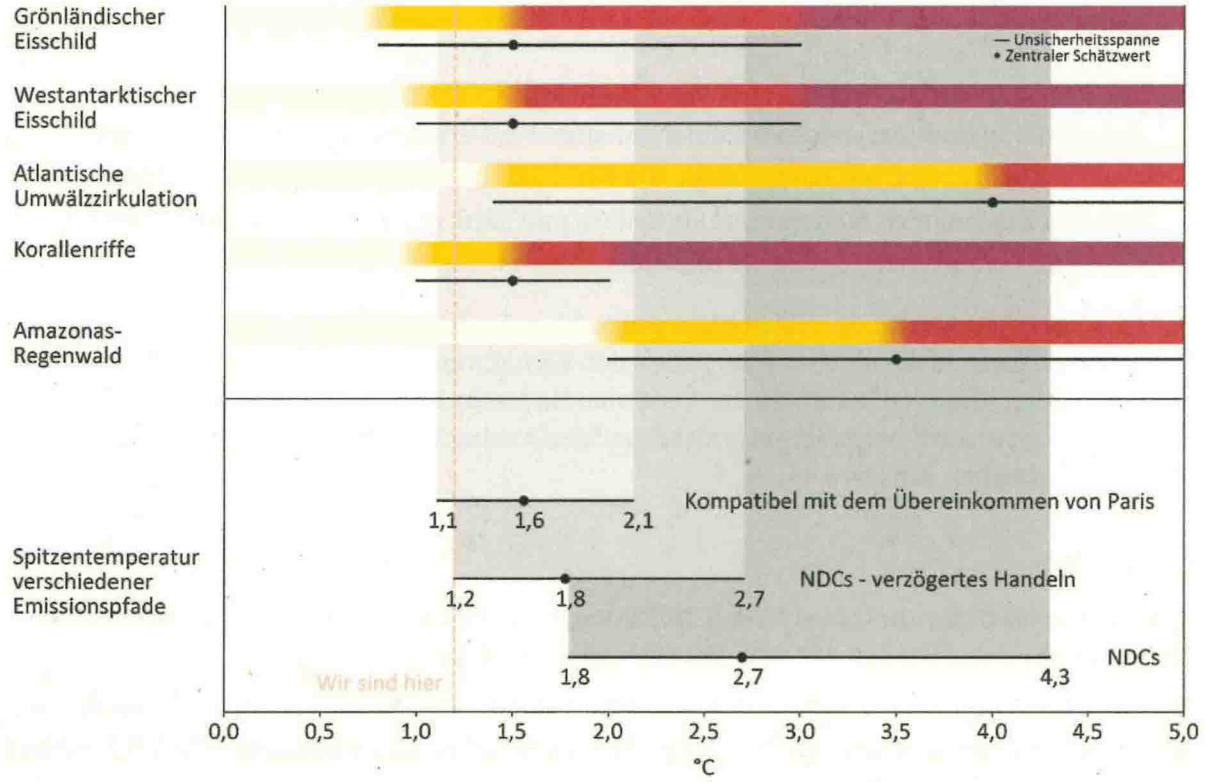
Die Komponenten des Erdsystems sind durch Wechselwirkungen wie beispielsweise Wärme- und Stoffaustausch verbunden. So kann das Kippen eines Elements, die Kippdynamiken anderer Elemente befördern. Das Konzept der Kippkaskaden illustriert die starke Vernetzung des Erdsystems und das Potential oft unvorhergesehener klimatischer und ökologischer Konsequenzen. Ein Netz verbundener Kippelemente sind in Abbildung 1 dargestellt. Unter der Annahme starker Wechselwirkungen zwischen den Kippelementen könnten Kippdynamiken für einzelne Elemente bereits bei deutlich niedrigeren Erwärmungsniveaus ausgelöst werden. {Hintergrundpapier: Kapitel 2.2}

Klima- und sicherheitspolitische Implikationen

Die Erkenntnisse um die Risiken von Kippelementen und kaskadischen Kippdynamiken erhöhen die Dringlichkeit des politischen Handelns. {Hintergrundpapier: Kapitel 3.1, 3.2}

- Die zentrale Bedeutung des in Paris vereinbarten Ziels, die Erderwärmung auf 1,5°C zu begrenzen, wird dabei durch neue Kenntnisse zu Risiken von Kippelementen untermauert.
- Derzeitige Klimaschutzbemühungen sind unzureichend, um das Überschreiten von Kipppunkten zu vermeiden, und müssen dringend in dieser „kritischen Dekade" nachgeschärft werden. Das kombinierte Risiko aus einer starken Erwärmungsantwort des Erd-Klimasystems im Allgemeinen und der Überschreitung von Kipppunkten verschiedener Kippelemente steigt bei verzögertem Handeln stark an (Abbildung 2)
- Eine Vielzahl von Maßnahmen ist erforderlich, um die globale Erwärmung auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen und Kipprisiken zu minimieren. Der Einsatz von atmosphärischer CO2-Entnahme ist dabei unvermeidbar, geht jedoch auch mit Bedenken bezüglich ihrer Machbarkeit und Nachhaltigkeit einher.
- Ein mögliches Überschreiten von Kipppunkten birgt Risiken für die Anpassung an Klimafolgen. Bereits beim derzeitigen Niveau der globalen Erwärmung sind manche Grenzen der Anpassungsfähigkeit für Mensch und Ökosysteme bereits erreicht, diese würden beim Auslösen von Kippdynamiken weiter strapaziert.

Abbildung 2 Gemeinsame Unsicherheiten von Kipppunkten und der globalen Erwärmung als Resultat von verschiedenen Emissionspfaden



Kipppunkte der fünf dringlichsten Kippelemente sowie mögliche Bereiche der Spitzentemperaturen im 21. Jahrhundert im Vergleich zum vorindustriellen Niveau (1850-1900) für ausgewählte Emissionspfade aus dem 6. Sachstandsbericht des IPCC. Quelle: Eigene Darstellung, Climate Analytics, nach Kloenne, et al., 2023

Die mitunter drastischen Folgen von Kippdynamiken können regionale Konflikte und Krisen fördern {Hintergrundpapier: Kapitel 3.3}:

- Das Überschreiten von Kipppunkten kann bereits existierende Ressourcenkonflikte eskalieren, beispielsweise könnten der Verlust von Gletschern und Veränderungen des indischen Monsunregimes die Wasserkonflikte auf dem indischen Subkontinent verschärfen.
- Ein weitgehender Verlust des Amazons-Regenwaldes, bei 3-4°C Erwärmung und auf einer Zeitskala von mehreren Jahrzehnten bis 100 Jahren, hätte schwerwiegende Konsequenzen für den globalen Kohlenstoffkreislauf, aber insbesondere auch für das Klima Südamerikas. Das Risiko von Dürren und wasserbezogenen Konflikten würde deutlich zunehmen.
- Der Verlust von Ökosystemen mit einzigartigem Artenreichtum wie der Amazonas-Regenwald oder tropische Korallenriffe, welche bereits bei einer Erwärmung von 1,5°C und auf einer Zeitskala von wenigen Jahren bis Jahrzehnte vom Aussterben bedroht wären, würde eine Biodiversitätskatastrophe erdgeschichtlichen Ausmaßes bedeuten. Der damit einhergehende Verlust der Ökosystemdienstleistungen würde hunderte Millionen Menschen weltweit betreffen.
- Ein Kollaps der Atlantischen Umwälzzirkulation, zunehmend wahrscheinlich bei 4°C Erwärmung und über mehrere Jahrzehnte, hätte schwerwiegende Auswirkungen auf das

nordamerikanische, europäische und vorderasiatische Klima und mit drastischen Folgen für die weltweite Ernährungssicherheit, da mehrere bedeutende landwirtschaftlichen Regionen betroffen wären.

- Ein Meeresspiegelanstieg von mehreren Metern als Folge eines Überschreitens von Eisschildkipppunkten, welche bei einer anhaltendend Erwärmung über 1,5°C erreicht werden könnten und ein Abschmelzen über Jahrtausende zur Folge hätte, würde die globalen Küstenlinien fundamental verändern und hätte gravierende Konsequenzen für Küstengebiete weltweit sowie die Bewohnbarkeit ganzer Staaten.

Das Überschreiten von Kipppunkten hätte weitreichende sicherheitspolitische Konsequenzen. Daher gilt es, diese Risiken neben internationalen Klimaforen wie der Klimarahmenkonvention auch in anderen Gremien innerhalb der Vereinten Nationen, anderen multilateralen Foren wie den G7, G20, aber auch beispielsweise sicherheitspolitischer Bündnisse zu adressieren. {Hintergrundpapier: Kapitel 3.4}

Quellen

Armstrong McKay DI, Staal A, Abrams JF, et al. (2022): Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. Science 9: 377. DOI: 10.1126/science.abn7950

Kloenne U, Nauels A, Pearson P, DeConto RM, et al. (2023): Only halving emissions by 2030 can minimize risks of crossing cryosphere thresholds. Nat Clim Change 13 (1): 9–11. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01566-4

Wunderling N, Von Der Heydt A, Aksenov Y, et al. (2023): Climate tipping point interactions and cascades: A review. EGUsphere [preprint]. https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1576

Impressum

Herausgeber
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Autorenschaft, Institution
Kai Kornhuber, Uta Klönne, Dalia Kellou, Carl-Friedrich Schleußner
Climate Analytics gGmbH, Berlin

Redaktion
Fachgebiet V 1.1 - Klimaschutz

Der Inhalt dieses Factsheets fasst die Ergebnisse und den Inhalt des Hintergrundpapiers zum Vorhaben „Kippunkte und kaskadische Kippdynamiken im Klimasystem – Erkenntnisse, Risiken sowie klima- und sicherheitspolitische Relevanz" (FKZ 37A23 01 001 0) zusammen.