

CLIMATE CHANGE

08/2024

**Abschlussbericht**

# Kipppunkte und kaskadische Kippdynamiken im Klimasystem

**Erkenntnisse, Risiken sowie klima- und  
sicherheitspolitische Relevanz**

**von:**

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

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt



CLIMATE CHANGE 08/2024

AA-Forschungsplan des Auswärtigen Amtes

Forschungskennzahl 37A23 01 001 0

FB001411

Abschlussbericht

# **Kipppunkte und kaskadische Kippdynamiken im Klimasystem**

Erkenntnisse, Risiken sowie klima- und  
sicherheitspolitische Relevanz

von

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

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

### Durchführung der Studie:

Climate Analytics gGmbH  
Ritterstraße 3  
10969 Berlin

Die Autorinnen\*Autoren danken Zachary Zeller, Zeinab Nabelssi, Holly Simpkin und Alexander Nauels für wertvolle Diskussionen und wichtige Beiträge für die Erstellung dieses Berichts.

### Abschlussdatum:

Dezember 2023

### Redaktion:

Fachgebiet V 1.1 - Klimaschutz  
Mathias Ulrich, Juliane Berger, Niklas Roming

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Januar 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen\*Autoren.

**Kurzbeschreibung: Kipppunkte und kaskadische Kipodynamiken im Klimasystem**

Kippelemente sind überregionale bis globale Komponenten des Erd-Klimasystems, die potenziell nichtlinear auf den anthropogenen Klimawandel reagieren könnten. Bei Überschreiten wichtiger Schwellenwerte (Kipppunkte) gehen sie in wesentlich andere langfristige Zustände über, die in menschlichen Zeiträumen häufig unumkehrbar sind und positive Rückkopplungen (also sich selbst verstärkende Effekte im Erd-Klimasystem) nach sich ziehen können. Damit können potenziell die Grenzen der Anpassungsfähigkeit von Menschen und Umwelt erreicht oder überschritten werden. Neuere Forschungen zeigen, dass die aktuelle globale Erwärmung von  $\sim 1,2$  °C gegenüber vorindustrieller Zeit bereits im Möglichkeitsbereich wichtiger Kipppunkte liegt und dass weitere Kipppunkte im Bereich von 1,5 bis 2 °C Erwärmung „möglich“ oder sogar „wahrscheinlich“ werden. Diese Überschreitungen könnten zu kaskadischen Kipodynamiken auf globaler Ebene führen, welche eine Kettenreaktion weiterer Kipppunktüberschreitungen impliziert. Angesichts der dynamischen Wechselwirkung zwischen potenziellen Klimagefahren und sozioökonomischen Systemen ist es besonders wichtig, Kipodynamiken und ihre wahrscheinlichen Auswirkungen besser zu verstehen. Vor diesem Hintergrund werden in diesem Bericht, die wichtigsten Erkenntnisse zu klimatischen Kipppunkten sowie deren klima- und sicherheitspolitischen Implikationen auf Basis der wissenschaftlichen Literatur aufbereitet. Diese Erkenntnisse sollen zur Entwicklung von Klimastrategien beitragen, die die Risiken und Herausforderungen von Kipppunkten direkt integrieren. Die Ergebnisse richten sich neben politischen Entscheidungsträger\*innen auch an Akteur\*innen der wissenschaftlichen Politikberatung sowie an die interessierte Öffentlichkeit. Das vorliegende Hintergrundpapier thematisiert relevante Aspekte von Kippelementen, -punkten und möglicher Kaskadeneffekte, die von diesen Zielgruppen bei der Diskussion und Ausgestaltung nationaler, europäischer und internationaler Klimapolitik berücksichtigt werden müssen.

**Abstract: Tipping points and cascading tipping dynamics in the climate system**

Tipping elements are supra-regional to global components of the Earth's climate system that could potentially react non-linearly to anthropogenic climate change. When important thresholds (tipping points) are exceeded, they transition to significantly different long-term states, which are often irreversible in human timescales and can result in positive feedbacks (i.e. self-reinforcing effects in the Earth's climate system). As a result, the limits of the adaptive capacity of human and natural systems can potentially be reached or exceeded. Recent research shows that the current global warming of  $\sim 1.2$  °C compared to pre-industrial levels is already within the uncertainty range of important tipping points and that further tipping points in the range of 1.5 to 2 °C warming are "possible" or even "probable". These exceedances could lead to cascading global dynamics, including the triggering of further tipping points, with dramatic impacts on human and natural systems. Given the dynamic interaction between potential climate hazards and socio-economic systems, it is particularly important to better understand tipping dynamics and their likely impacts. Against this background, this report presents the most important findings on climate tipping points and their implications for climate and security policy based on the scientific literature. These findings are intended to contribute to the development of climate strategies that directly integrate the risks and challenges of tipping points. In addition to political decision-makers, the results are also aimed at stakeholders in scientific policy advice and the interested public. This background paper addresses relevant aspects of tipping elements, tipping points and possible cascading effects that must be taken into account by these target groups when discussing and shaping national, European and international climate policy.

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	7
Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
Zusammenfassung .....	11
Summary .....	13
1 Einführung.....	15
2 Kippelemente und kaskadische Kippdynamiken .....	18
2.1 Kippelemente im Klimasystem .....	18
2.1.1 Kryosphäre.....	22
2.1.1.1 Arktisches Meereis .....	22
2.1.1.2 Grönländischer Eisschild.....	23
2.1.1.3 Westantarktischer Eisschild.....	24
2.1.1.4 Ostantarktischer Eisschild .....	25
2.1.1.5 Gebirgsgletscher (außerhalb Grönlands und der Antarktis) .....	25
2.1.1.6 Permafrost .....	25
2.1.2 Atmosphäre und Ozeane .....	26
2.1.2.1 Atlantische Umwälzirkulation .....	26
2.1.2.2 Korallenriffe .....	27
2.1.2.3 El-Niño-Phänomen .....	28
2.1.2.4 Indisches Monsunregime .....	28
2.1.2.5 Jetstream .....	29
2.1.2.6 Methan aus dem Meeresboden.....	29
2.1.3 Biosphäre .....	29
2.1.3.1 Sahelzone.....	29
2.1.3.2 Boreale Wälder.....	30
2.1.3.3 Tropische Regenwälder .....	30
2.2 Kaskadische Kippdynamiken.....	33
3 Klima- und sicherheitspolitische Implikationen.....	35
3.1 Zeitlicher Horizont von Kippdynamiken und Risiken in <i>Overshoot</i> -Szenarien .....	35
3.2 Implikationen für klimapolitische Zielsetzungen.....	36
3.2.1 Kipprisiken im Kontext der Paris-Ziele.....	36
3.2.2 Atmosphärische CO <sub>2</sub> -Entnahme und langfristige Kipprisiken .....	38

3.2.3	Das Schließen der Emissionslücke .....	39
3.2.4	Grenzen der Anpassung.....	39
3.2.5	Kipprisiken und Klimaschäden und Verluste .....	40
3.2.6	Kontrovers diskutierte Ansätze: <i>Solar Radiation Modification</i> .....	41
3.3	Kipprisiken, Migration und Konflikte .....	42
3.4	Politische Handlungsforen und -strategien .....	45
4	Quellenverzeichnis .....	47

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Globale Gründe zur Besorgnis ( <i>Reasons for Concern</i> , RFCs)...	16
Abbildung 2:	Identifizierung von Hochrisiko-Kippelementen durch Abwägung der Auswirkungen, Kippunkt und dynamischen Zeitrahmen.	19
Abbildung 3:	Übersichtskarte Kippelemente des Klimasystems und ihre (de)stabilisierenden Effekte untereinander, die Einfluss auf kaskadische Kipodynamiken haben können .....	33
Abbildung 4:	Gemeinsame Unsicherheiten von möglichen Kippunkten und der globalen Erwärmung als Resultat von verschiedenen Emissionspfaden .....	38

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überblick über die hier behandelten Elemente des Klimasystems, deren Kipppunkte, Zeitskala, und wichtigste Auswirkungsbereiche. ....	20
------------	--	----

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AMOC	<i>Atlantic Meridional Overturning Circulation</i> Atlantische Umwälzzirkulation
AR5/AR6	<i>Fifth/Sixth Assessment Report</i> Fünfter/Sechster Sachstandsbericht
ENSO	<i>El Niño–Southern Oscillation</i> El Niño-Südliche Oszillation
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen, „Weltklimarat“
ISM	<i>Indian Summer Monsoon</i> Indischer Sommermonsun
NDCs	<i>Nationally determined contributions</i> Nationale Klimabeiträge
RFCs	<i>Reasons for Concern</i> Globale Gründe zur Besorgnis
SRM	<i>Solar Radiation Modification</i> Beeinflussung der Sonneneinstrahlung

## Zusammenfassung

Einzelne Komponenten des Erdsystems, wie beispielsweise Ökosysteme, groß-skalige 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, welche eine irreversible und rasche Änderung des Systemzustands zur Folge haben können. Diese Kippdynamiken wären auch bei einer Stabilisierung oder Verringerung der globalen Temperatur nicht direkt umkehrbar.

### Kippelemente im Klimasystem

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

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 ihren Antrieb verlieren, mit Konsequenzen für Wettermuster und Klimabedingungen weltweit.

Das Kippen einzelner Elemente des Erdsystems würde global mit erheblichen Folgen für Gesellschaften und Ökosysteme einhergehen. Unter Berücksichtigung eines unmittelbaren Risikos eines Überschreitens von Kipppunkten durch schon relativ geringe weitere globale Erwärmung zum einen und besonders schwerwiegender Folgen zum anderen, lassen sich **Hochrisiko-Kippelemente** identifizieren. Diese ergeben sich als der Grönländische Eisschild, der Westantarktische Eisschild, der Amazonas-Regenwald, die Ozeanische Zirkulation im Nordatlantik und die Korallenriffe.

Das Risiko von kaskadischen Kippdynamiken

Die Komponenten des Erdsystems sind durch konstante Wechselwirkungen und Prozesse wie beispielsweise Wärme- und Stoffaustausch eng verbunden und voneinander abhängig. So kann das Kippen eines Elements die Kippdynamiken anderer Elemente befördern oder auslösen. Das Konzept der **Kippkaskaden** illustriert die starke Vernetzung des Erdsystems und das Potential oft unvorhergesehener klimatischer und ökologischer Konsequenzen.

Unter der Annahme starker Wechselwirkungen zwischen den Kippelementen könnten Kippdynamiken für einzelne Elemente bereits bei deutlich niedrigeren Erwärmungsniveaus ausgelöst werden.

### Klima- und sicherheitspolitische Implikationen

Angesichts der Risiken, die durch Kippelemente und kaskadische Kippdynamiken im Klimasystem entstehen, ist politisches Handeln dringend erforderlich. Insbesondere die Notwendigkeit, die globale Erwärmung auf 1,5°C zu begrenzen, wie im Übereinkommen von Paris als Ziel formuliert, wird durch neue Erkenntnisse über die Risiken von Kippelementen zusätzlich untermauert.

Aktuelle Bemühungen zum Klimaschutz sind für das Vermeiden eines Überschreitens von Kipppunkten unzureichend. Verzögertes Handeln erhöht das Risiko einer starken Erwärmungsantwort des Erd-Klimasystems und das Überschreiten verschiedener Kipppunkte erheblich.

Um die globale Erwärmung auf 1,5°C zu begrenzen und Kipprisiken zu minimieren, sind vielfältige Maßnahmen erforderlich. Diese schließen den unvermeidlichen Einsatz

atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Entnahme ein, welche allerdings mit Bedenken hinsichtlich ihrer Machbarkeit und Nachhaltigkeit einhergeht.

Das mögliche Überschreiten von Kipppunkten birgt Risiken für die Anpassung an Klimafolgen. Schon bei der aktuellen globalen Erwärmung sind manche Grenzen der Anpassungsfähigkeit für Mensch und Ökosysteme bereits erreicht, die durch das Auslösen von Kippparametern weiter belastet würden.

Die mitunter drastischen Folgen von Kippparametern könnten regionale Konflikte und Krisen fördern, wie die Eskalation von Ressourcenkonflikten durch den Verlust von Gletschern und Veränderungen des indischen Monsunregimes.

Als weiteres Beispiel würde ein erheblicher Verlust von Ökosystemen wie dem Amazonas-Regenwald und tropischen Korallenriffen eine erhebliche Biodiversitätskatastrophe darstellen und hunderte Millionen Menschen weltweit durch den Verlust von Ökosystemdienstleistungen betreffen. Der Kollaps der Atlantischen Umwälzzirkulation bei 4°C Erwärmung hätte schwerwiegende Auswirkungen auf das Klima in Nordamerika, Europa und Westasien sowie drastische Folgen für die weltweite Ernährungssicherheit. Ein Meeresspiegelanstieg von mehreren Metern als Folge des Überschreitens von Eisschildkipppunkten würde globale Küstenlinien grundlegend verändern und gravierende Konsequenzen für Küstengebiete und die Bewohnbarkeit haben.

Das Überschreiten von Kipppunkten könnte auch sicherheitspolitische Konsequenzen haben. 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.

## Summary

Individual components of the Earth system, such as ecosystems, ocean circulation and ice sheets, are exposed to strongly changing conditions as climate change progresses. There is a risk that self-reinforcing dynamics will be triggered between different Earth system elements, which could lead to new and stable states of the system (such as the melting of an ice sheet). These tipping dynamics can be irreversible, meaning that even if the global temperature were to stabilize or decrease the original state will not be recovered.

### Tipping elements of the climate system

Components of the Earth system that exhibit such nonlinear behaviour and feature critical thresholds, known as **tipping points**, are referred to as **tipping elements**.

For example, the Amazon rainforest, a globally unique ecosystem, could transition into a forest free savanna state if deforestation and global temperatures exceed certain levels. Large scale currents in the oceans may lose their power, with global effects on weather patterns and climate conditions.

The tipping of individual elements of the Earth system would have significant consequences for societies and ecosystems worldwide. Particular risks have been identified for the following **high risk tipping elements**, due to the immediate risk of exceeding the tipping point due to changing climate conditions and with regard to particularly serious consequences: the Greenland ice sheet, the West Antarctic ice sheet, the Amazon rainforest, the Atlantic meridional overturning circulation, and coral reefs.

### The risk of cascading tipping dynamics

The components of the earth system do not exist in isolation, but are interconnected by constant exchanges of heat and mass. This means that the tipping of one component can trigger or promote tipping dynamics of other elements, which can lead to a tipping cascade. The concept of **tipping cascades** illustrates how the strong interconnectedness of the Earth system can result in often unforeseen climatic and ecological consequences.

Under the assumption of stronger interactions between the tipping elements, tipping dynamics for individual elements could already be triggered at significantly lower warming levels.

### Climate and security policy implications

The risks of tipping elements and cascading tipping dynamics increase the urgency of political action to mitigate further warming. The central importance of the goal agreed in Paris of limiting global warming to 1.5°C is underpinned by new knowledge on the risks of tipping elements.

Current climate protection efforts are insufficient to prevent tipping points from being exceeded. Delayed action increases the risk of a strong warming response of the Earth's climate system and the crossing of different tipping points.

A variety of measures are required to limit global warming to 1.5°C and minimise tipping risks. This includes the unavoidable use of atmospheric CO<sub>2</sub> removal, which is however accompanied by concerns about its feasibility and sustainability.

A possible crossing of tipping points harbours risks for adaptation to climate impacts. Even at the current level of global warming, some limits to adaptation for humans and ecosystems have already been reached, and these would be further strained if tipping dynamics were triggered.

The consequences of tipping dynamics can promote regional conflicts and crises, such as the escalation of resource conflicts due to the loss of glaciers and changes in the Indian monsoon regime.

Further examples include: a widespread loss of ecosystems such as the Amazon rainforest and tropical coral reefs would mean a biodiversity catastrophe affecting hundreds of millions of people worldwide through the loss of ecosystem services. A collapse of the Atlantic meridional overturning circulation, increasingly likely at 4°C warming, would have severe impacts on the North American, European and middle Eastern climate and would have drastic consequences for global food security. A sea level rise of several meters over the next millennia as a result of exceeding ice sheet tipping points would fundamentally change the global coastlines and have serious consequences for coastal areas worldwide and the habitability of entire countries.

Crossing tipping points could also have security policy implications. It is therefore important to address these risks not only in international climate forums such as the Framework Convention on Climate Change, but also in other bodies within the United Nations, other multilateral forums such as the G7 and G20, as well as security policy alliances.

# 1 Einführung

Steigende Treibhausgaskonzentrationen durch menschliche Aktivitäten, vor allem das Verbrennen von fossilen Brennstoffen, haben seit Beginn der Industrialisierung zu grundlegenden Veränderungen in vielen Komponenten des Erdsystems geführt. So war die globale Oberflächentemperatur im Vergleich zu der Referenzperiode 1850-1900 im Jahr 2022 um 1,26 °C höher und die Ozeane haben große Teile der überschüssigen Energie aufgenommen, geschätzte 0,89 Watt pro Quadratmeter zwischen den Jahren 2010 und 2022. Damit haben die Ozeane 90 % der durch globale Treibhausgasemissionen erzeugten Wärme aufgenommen (Forster *et al.*, 2023). Diese Entwicklungen bergen das Risiko, dass einige Komponenten des Erdsystems, wie beispielsweise der Grönländische Eisschild oder der Amazonas-Regenwald an Stabilität verlieren und möglicherweise in einen anderen Zustand überführt werden.

Wenn der Zustand eines Systems aus dem Gleichgewicht gebracht wird, sodass sich dieses neu organisiert, können abrupte Veränderungen ausgelöst werden. Dabei ist die Geschwindigkeit der Neuorganisation unabhängig von weiteren äußeren Einflüssen. Ein System kann aus dem Gleichgewicht gebracht werden, indem dieses aus dem stabilen Zustand herausgehoben wird und anschließend in einen neuen Zustand übergeht, wenn kritische Grenzwerte überschritten werden (z.B. Lenton *et al.*, 2008).

Elemente des Erdsystems, welche sich durch das Überschreiten solch kritischer Schwellen (so genannter Kipppunkte) abrupt und/oder unumkehrbar umorganisieren, werden als Kippelemente bezeichnet (IPCC, 2021a). Oft sind diese Prozesse selbstverstärkend und haben Auswirkungen auf weitere Erdsystemkomponenten. So würde ein Kippen des Grönländischen Eisschildes zum Beispiel das Ausmaß des globalen Meeresspiegelanstiegs beeinflussen. Ein weiteres Beispiel, das Austrocknen des Amazonas-Regenwaldes, würde zu einem Verlust von Biodiversität führen und die Nahrungsmittelsicherheit der Region beeinflussen. Aufgrund dieser Zusammenhänge von gesellschaftlichen Risiken und Kippelementen sind Kipppunkte von größter Bedeutung für die Festlegung von globalen Erwärmungsgrenzen.

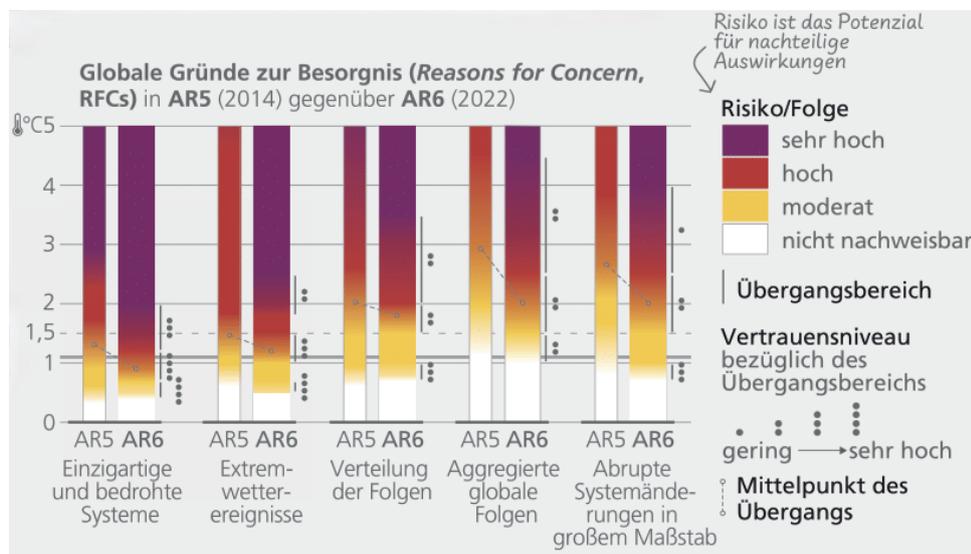
Als vor rund 20 Jahren der Weltklimarat (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) solche Dynamiken erstmalig betrachtete, wurde noch davon ausgegangen, dass diese erst ab einer globalen Erwärmung von rund 5 °C eintreten würden (Lenton *et al.*, 2019). Seit den ersten einschlägigen wissenschaftlichen Studien (z.B. Lenton *et al.*, 2008) wurde eine Vielzahl von wissenschaftlichen Erkenntnissen zum Thema hinzugewonnen, angetrieben durch neue Methodiken in der Erkennung von kritischen Signalen in großen Klimadatensätzen, verbesserter Datenverfügbarkeit, Fortschritten im Verständnis physikalischer Zusammenhänge im Klimasystem und Fortschritten in der Klimamodellierung (OECD, 2022). Zu erwähnen ist hier insbesondere eine zunehmend differenzierte Risikoabschätzung von Kippdynamiken bezüglich bestimmter globaler Mitteltemperaturen seit der Veröffentlichung von Lenton *et al.* (2008).

Neue Erkenntnisse zu Kipppunkten und zur Unumkehrbarkeit verschiedener Klimatrends haben maßgeblich zur Entscheidung im Übereinkommen von Paris („*Paris Agreement*“) im Jahr 2015 beigetragen, die globale Erwärmung auf 1,5 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau (1850-1900) zu begrenzen (Schellnhuber *et al.*, 2016). In seinem neuesten Bericht hat der IPCC seine Schätzungen zu kritischen Temperaturgrenzen weiter nach unten korrigiert; demnach wird das Risiko für „abrupte Systemänderungen in großem Maßstab“ bei 1 °C globaler Erwärmung als moderat angesehen und bereits ab 1,5 °C könnte ein hohes Risiko für ein Eintreffen dieser Ereignisse und ab 2,5 °C ein sehr hohes Risiko bestehen (IPCC, 2023) (Abbildung 1). Neben ersten Hinweisen, dass einige Kippelemente, wie beispielsweise der Grönländische Eisschild (Boers & Rypdal, 2021) oder der Amazonas-Regenwald (Boulton *et al.*, 2022) sich ihren Schwellenwerten nähern, wurden neue Überblicksartikel mit neuen Risikoabschätzungen

veröffentlicht (z. B., Lenton *et al.*, 2019; Armstrong McKay *et al.*, 2022). Zudem wird in neuer Literatur verstärkt auf die Zusammenhänge und Verbindungen zwischen einzelnen Kippelementen (Liu *et al.*, 2023) sowie auf das zunehmende Risiko von möglichen Kippkaskaden hingewiesen (Wunderling, Von Der Heydt, *et al.*, 2023).

Bei Einschätzungen von Kippunkten ist auch zu beachten, dass sich diese in der Regel auf ein über Jahrhunderte konstantes Erwärmungsniveau beziehen. Das bedeutet, dass aus einem temporären Erreichen, bzw. Überschreiten dieses Niveaus auf kürzeren Zeitskalen nicht unmittelbar gefolgert werden kann, dass Kippdynamiken ausgelöst werden. Bei einem Überschreiten eines Grenzwertes sind die Auswirkungen der Höhe und Dauer eines solchen Überschreitens auf ein mögliches Auslösen von Kippdynamiken zu berücksichtigen (Ritchie *et al.*, 2021).

**Abbildung 1: Globale Gründe zur Besorgnis (Reasons for Concern, RFCs)**



Globale Gründe zur Besorgnis (*Reasons for Concern*, RFCs), Vergleich der wissenschaftlichen Bewertungen im Sechsten IPCC-Sachstandsbericht (AR6) (breite Säulen) mit denjenigen im Fünften IPCC-Sachstandsbericht (AR5) (schmale Säulen). Mit aktuellerem wissenschaftlichem Verständnis haben sich die Risikoübergänge im Allgemeinen zu niedrigeren Temperaturen verschoben. Es sind für jeden RFC Diagramme dargestellt, wobei von einer geringen bis gar keiner Anpassung ausgegangen wird. Die Linien verbinden die Mittelpunkte der Übergänge von moderatem zu hohem Risiko zwischen AR5 und AR6. Kipprisiken entsprechen dem fünften Grund zur Besorgnis, Abrupte Systemänderungen in großem Maßstab (*Large scale singular events*) (rechts).

Quelle: Nach Abbildung SPM.4 (Teilgrafik der Tafel a) aus IPCC, 2023: Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung. In: Klimawandel 2023: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen [Kernschreibteam, H. Lee und J. Romero (Hrsg.)]. IPCC, Genf, Schweiz, S. 1-34. Deutsche Übersetzung auf Basis der Version vom Juli 2022. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn; Die Luxemburger Regierung, Luxemburg; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien; Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT, ProClim, Bern; 2023.

Durch das fortwährende Eintreten dramatischer Klimafolgen und die fortschreitende Erwärmung als Folge ungebremsster Emissionen von Treibhausgasen sowie die stetige Erweiterung des wissenschaftlichen Kenntnisstandes haben Kippelemente und Kippunkte im politischen, gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Diskurs eine zunehmend zentrale Rolle eingenommen. So gibt es etwa Forderungen einzelner Staaten nach einem Sonderbericht des Weltklimarates zu Kippunkten in Rahmen seines siebten Berichtszyklus (Geneva Environment Network, 2022). Auch das Entscheidungsdokument („*cover decision*“) der 27.

Weltklimakonferenz im Jahr 2022 nahm erstmals Bezug auf Kippunkte (UNFCCC, 2022).

Vor dem Hintergrund führt der vorliegende Bericht eine Einordnung und Beurteilung von Kippelementen und -punkten durch. Zudem werden mögliche Verbindungen zwischen Kippelementen, sogenannte Kippkaskaden erläutert und diskutiert. Abschließend werden klima- und sicherheitspolitische Implikationen und die mögliche Bedeutung von Kipprisiken für Migration sowie Konflikte besprochen.

Dazu bereitet der Bericht die existierende wissenschaftliche Literatur auf, um verschiedene Zielgruppen, v.a. politische Entscheidungsträger\*innen, Akteur\*innen der wissenschaftlichen Politikberatung sowie die interessierte Öffentlichkeit über den thematischen Stand der Wissenschaft zu informieren.

## 2 Kippelemente und kaskadische Kippdynamiken

In diesem Kapitel werden verschiedene Elemente des Klimasystems betrachtet und beurteilt, die in der wissenschaftlichen Literatur im Laufe der Zeit als Kippelemente besprochen wurden. Für eine bessere Einordnung dieser Elemente werden diese zuerst überblickshaft mit einer Abbildung und Tabelle eingeführt und im Folgenden einem von drei Bereichen des Klimasystems, der Kryosphäre, der Atmosphäre und den Ozeanen, oder der Biosphäre zugeschrieben.

### 2.1 Kippelemente im Klimasystem

Zahlreiche Elemente des Klimasystems werden auf der Grundlage des derzeitigen wissenschaftlichen Verständnisses als Kippelemente eingeordnet: Arktisches Winter-Meereis, Grönländischer Eisschild, Westantarktischer Eisschild, Ostantarktischer Eisschild, Gebirgsgletscher, Permafrost, Atlantische Umwälzzirkulation, Korallenriffe, Sahelzone, boreale Wälder, Amazonas-Regenwald. Andere Elemente des Klimasystems haben sich jedoch mit einem besseren Prozessverständnis nicht als Kippelemente herausgestellt: Arktisches Sommer-Meereis, El Niño-Südliche Oszillation, Indisches Monsunregime, Jetstream, Methan aus Meeresböden, Kongo-Regenwald. Im Folgenden werden sowohl bestätigte Kippelemente als auch Elemente, die sich nicht als Kippelemente herausgestellt haben, beleuchtet, auch um zu einer Begriffsklärung der Kippterminologie beizutragen.

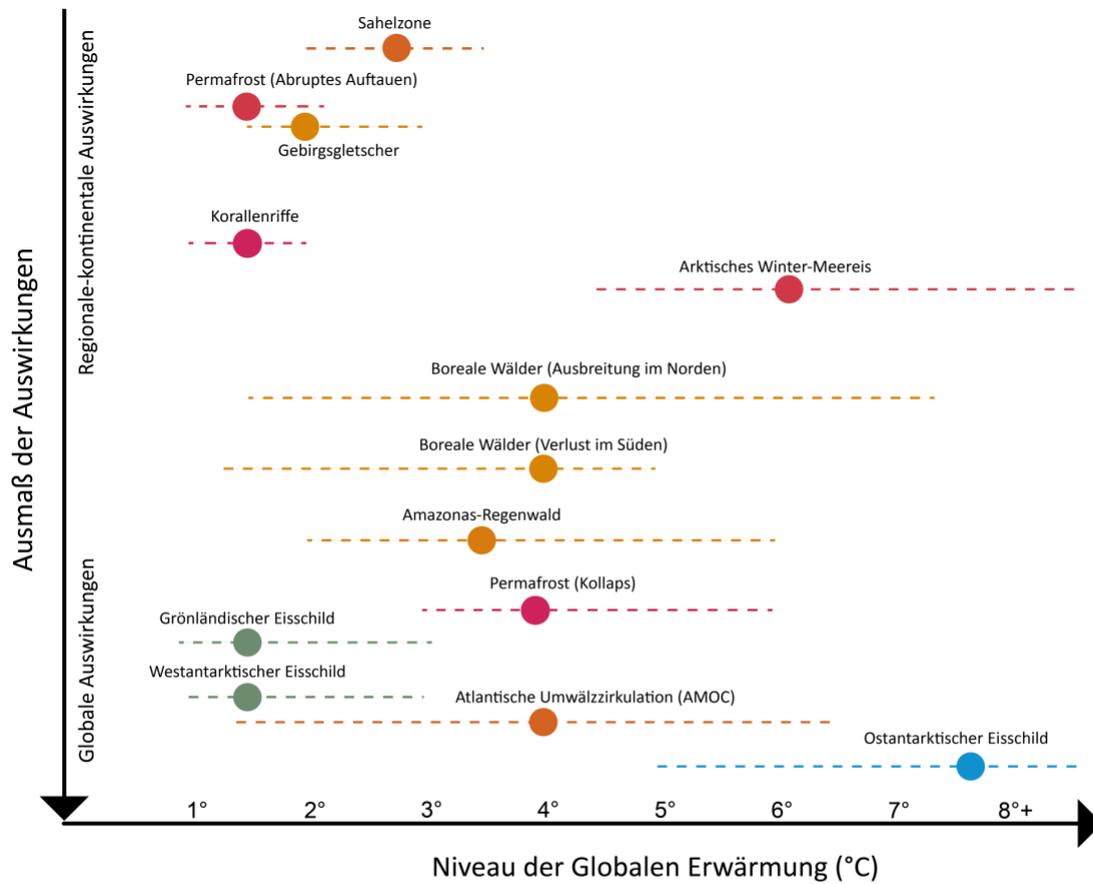
#### Beschreibung von Kippdynamiken im Text

Die Beschreibungen der einzelnen Kippelemente beinhalten Angaben zum jeweiligen Kippunkt sowie dem Zeitraum, in welchem das Kippelement in einen neuen Systemzustand übergeht. Dazu wird im Text zunächst der jeweils zentral ermittelte Wert genannt, gefolgt von Angaben in Klammern, die die Unsicherheitsspanne widerspiegeln. Dies bedeutet, dass der Kippunkt auch bereits bei einem niedrigeren oder aber auch erst bei einem höheren Grad der Erwärmung eintreffen könnte, bzw. gibt an, um wie viel kürzer oder länger der Übergang in den neuen stabilen Zustand ausfallen könnte.

*Beispiel:* Grönländischer Eisschild  
 Kippunkt: 1,5 °C (1–3°C)  
 Zeitskala: 10.000 (1.000–15.000) Jahre

Abbildung 2 bietet einen Überblick über alle Kippelemente, die in diesem Hintergrundpapier behandelt werden. Tabelle 1 liefert die zentralen Eckdaten zu den Kippdynamiken der besprochenen Kippelemente.

**Abbildung 2: Identifizierung von Hochrisiko-Kippelementen durch Abwägung der Auswirkungen, Kippunkt und dynamischen Zeiträumen.**



Kippunkte zentraler Kippelemente bei verschiedenen Erwärmungsniveaus (° C), Zeiträumen (Jahrzehnte, Jahrhunderte, Jahrtausende) und dem Ausmaß der Auswirkungen nach Überschreiten des Kippunktes: global oder regional - kontinental.

Quelle: Eigene Darstellung, Climate Analytics

**Tabelle 1: Überblick über die hier behandelten Elemente des Klimasystems, deren Kipppunkte, Zeitskala, und wichtigste Auswirkungsbereiche.**

Kippelement	Kippunkt	Zeitskala	Auswirkungsbereich
<b>Kryosphäre</b>			
Arktisches Meereis			
<i>Sommer</i>	Hier nicht als Kippelement angesehen		Regionale und globale Temperaturen; lokale Ökosysteme; Kippkaskaden; Ressourcen, Schifffahrt
<i>Winter</i>	6,3 °C (4,5–8,7 °C)	20 (10–100) Jahre	
Grönländischer Eisschild	1,5 °C (0,8–3 °C)	10.000 (1.000–15.000) Jahre	Regionale und globale Temperaturen; Kippkaskaden; Meeresspiegel
Westantarktischer Eisschild	1,5 °C (1–3 °C)	2.000 (500–13.000) Jahre	Regionale und globale Temperaturen; Kippkaskaden; Meeresspiegel
Ostantarktischer Eisschild	7,5 °C (5–10 °C)	Jahrtausende	Regionale und globale Temperaturen; Meeresspiegel
Gebirgsgletscher (außerhalb Grönlands, Antarktis)	2 °C (1,5–3 °C)	200 (50–1000) Jahre	Wasserressourcen; Meeresspiegel
Permafrost			
<i>Abruptes Auftauen</i>	1,5 °C (1–2,3 °C)	Tage–Jahre	Kohlenstoffzyklus und globale Temperaturen
<i>Kollaps</i>	4 °C (3–6 °C)	50 (10–300) Jahre	Kohlenstoffzyklus und globale Temperaturen
<b>Atmosphäre und Ozeane</b>			
Atlantische Umwälzzirkulation (AMOC)	4 °C (1,4–8 °C)	50 (15–300) Jahre	Klimasystem; Extremwetter; Meeresspiegel; Niederschlag
Korallenriffe	1,5 °C (1–2 °C)	10 Jahre	Lokale Auswirkungen – Biodiversität; Nährstoff- und Kohlenstoffzyklus
El Niño-Südliche Oszillation (ENSO)	Hier nicht als Kippelement angesehen		*

Kippelement	Kipppunkt	Zeitskala	Auswirkungsbereich
Indisches Monsunregime	Hier nicht als Kippelement angesehen		*
Jetstream	Hier nicht als Kippelement angesehen		*
Methan aus Meeresböden	Hier nicht als Kippelement angesehen		*

### Biosphäre

Sahelzone	2,8 °C (2–3,5 °C)	50 (10–500) Jahre	Regionale Auswirkungen – Niederschlag, Vegetation
Boreale Wälder			
<i>Ausbreitung im Norden</i>	4 °C (1,5–7,2 °C)	100 Jahre	Globale Temperaturen; Biodiversität; Kohlenstoffzyklus und globale Temperaturen; Biodiversität, Kohlenstoffspeicher
<i>Verlust im Süden</i>	4 °C (1,4–5 °C)	100 Jahre	
Tropische Regenwälder			
<i>Amazonas-Regenwald</i>	3–4 °C (2–6 °C)	100 (50–200) Jahre	Biodiversität; Kohlenstoffzyklus; Kippkaskaden
Kongo-Regenwald	Fehlende Daten		

Überblick über die behandelten Elemente der Kryosphäre, Atmosphäre und Ozeane, und Biosphäre. Nicht alle Elemente werden hier als Kippelemente berücksichtigt; die Einschätzung wird in den folgenden Abschnitten begründet. Für Kipppunkte und Zeitskala wird der zentrale Schätzwert sowie die Unsicherheitsspanne angegeben. \*Bei Elementen, die hier nicht als Kippelemente angesehen werden, werden dementsprechend die Auswirkungen eines Kippens nicht angegeben; die allgemeinen Auswirkungen des Klimawandels auf diese Elemente werden in den jeweiligen Unterkapiteln beschrieben.

Im folgenden Abschnitt werden die Eigenschaften und das aktuelle Prozessverständnis der einzelnen Kippelemente detailliert zusammengefasst. Zudem sind fünf Hochrisiko-Kippelemente ausgewählt worden, die hinsichtlich ihres geschätzten Kipppunktes und der Auswirkungen eines Kollapses sowie des Zeitrahmens für das Eintreten der Auswirkungen (Abbildung 3) als besonders relevant erachtet werden. Diese sind, **der Grönländische Eisschild, der westantarktische Eisschild, die Atlantische Umwälzzirkulation (AMOC), die Korallenriffe sowie der Amazonas Regenwald**. Diese fünf Kippelemente werden ausführlicher begutachtet und sind in ihrer Überschrift durch drei Sternchen gekennzeichnet, um ihre Sonderstellung zu verdeutlichen.

### 2.1.1 Kryosphäre

Die Kryosphäre umfasst das globale Vorkommen von Wasser im festen, eisförmigen Zustand und umschließt damit Meereis und Eisschilde in den Polarregionen, sowie Gebirgsgletscher, Schneedecken, Eisberge, Fluss- und Seeis, Permafrost und saisonal gefrorene Böden (IPCC, 2021a).

In den Polargebieten, besonders der Arktis, treten Klimafolgen im Vergleich zu anderen Regionen der Welt in besonders starkem Ausmaß und hoher Geschwindigkeit auf (Constable *et al.*, 2022). Die Arktis erwärmt sich ungefähr doppelt so schnell (Ranasinghe *et al.*, 2021) oder in einigen Regionen sogar viermal so schnell (Rantanen *et al.*, 2022) wie der Rest der Welt, was als „arktische Verstärkung“ („*Arctic amplification*“) bekannt ist. Grund dafür ist einer der wichtigsten Rückkopplungs-Mechanismen des Klimasystems, die Eis-Albedo-Rückkopplung. Das Schmelzen des Meereises gibt zunehmend dunkle Meeresoberfläche frei. Diese nimmt mehr Energie von auftreffenden Sonnenstrahlen auf, anstatt sie so wie die hellen Eisflächen vornehmlich zu reflektieren. Die zusätzlich aufgenommene Energie treibt die Erwärmung weiter an und führt somit zu einer Beschleunigung des Abschmelzens (Forster *et al.*, 2021).

Eine polare Verstärkung wird ebenfalls in der Antarktis beobachtet und wird demzufolge als antarktische Verstärkung („*Antarctic amplification*“) bezeichnet. Die Polarregion der Südhemisphäre erwärmt sich fast doppelt so schnell wie der Rest der Welt, und schneller als zunächst durch Klimamodelle angenommen (Casado *et al.*, 2023).

#### 2.1.1.1 Arktisches Meereis

Die Meereisfläche ging in den letzten Jahrzehnten in allen Monaten und Regionen der Arktis deutlich zurück. Dies geschah linear zum globalen Temperaturanstieg. Es wird erwartet, dass sich dies fortsetzt und der arktische Ozean noch vor dem Jahr 2050 im Sommer zum ersten Mal praktisch eisfrei<sup>1</sup> sein wird — selbst wenn es gelingen sollte, die globale Erwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen (Fox-Kemper *et al.*, 2021; Diebold *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2023). Das Sommer-Meereis hat allerdings keine Temperaturgrenze, ab der sein Verlust selbstverstärkend und unumkehrbar wird; das Sommer-Meereis und die globale Durchschnittstemperatur sind mit geringer zeitlicher Verzögerung miteinander verbunden, sodass mit sinkenden Temperaturen vermutlich die Ausdehnung des Sommer-Meereises wieder zunehmen wird (Fox-Kemper *et al.*, 2021). Anders als zunächst angenommen (Lenton *et al.*, 2008), ist es daher nicht als Kippelement einzuordnen (Fox-Kemper *et al.*, 2021; Armstrong McKay *et al.*, 2022). Es muss jedoch vom Verlust des Meereises im Winter unterschieden werden, der abrupt erfolgen könnte, verstärkt durch mögliche Veränderungen der Ozeanschichtung, die die Bildung des Meereises im Winter verhindern würde (Bathiany *et al.*, 2016; Hankel & Tziperman, 2021; Wang *et al.*, 2023). Das arktische Winter-Meereis ist demnach ein globales Kippelement mit einem Kippunkt von rund 6,3 °C (4,5–8,7 °C). Der Verlust würde über einen Zeitraum von 20 Jahren (10 bis 100 Jahren) eintreten und zu einer zusätzlichen Erhöhung der globalen Temperatur von rund 0,6 °C führen (Armstrong McKay *et al.*, 2022). Der Verlust sowohl des Sommer- als auch des Winter-Meereises zeigt weitreichende Folgen etwa für lokale Ökosysteme und Lebensgrundlagen sowie die Schifffahrt, und führt aufgrund der arktischen Verstärkung zu weiteren Temperaturanstiegen und zusätzlichen Auswirkungen auf andere arktische und globale Kippelemente (Constable *et al.*, 2022; International Cryosphere Climate Initiative, 2022; Fox-Kemper *et al.*, 2021; OECD, 2022; Wang *et al.*, 2023; Wunderling *et al.*, 2020).

---

<sup>1</sup> Meereisfläche von unter einer Million Quadratkilometern

### 2.1.1.2 Grönländischer Eisschild\*\*\*<sup>2</sup>

Der Grönländische Eisschild hat in den letzten 30 Jahren stark an Masse verloren und damit mit rund 1,35 Zentimetern zum globalen Meeresspiegelanstieg beigetragen. Dieser betrug zwischen 1901–2018 insgesamt 20 (15–25) Zentimeter. Dabei spielt vor allem das oberflächige Abschmelzen des Eisschildes eine zunehmende Rolle (Fox-Kemper *et al.*, 2021).

Das Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes wird durch sich selbst verstärkende Rückkopplungsmechanismen befördert, wodurch ein Kipppunkt erreicht werden kann (Armstrong McKay *et al.*, 2022), ab dem ein weiteres Abschmelzen unumkehrbar ist. Diese sich selbst verstärkenden Rückkopplungsmechanismen treten ein, wenn die Schneeschmelze auf dem Eisschild relativ dunkles blankes Eis freigibt, welches weniger Sonnenstrahlen reflektiert und so zur weiteren Erwärmung führt (Fox-Kemper *et al.*, 2021; Box *et al.*, 2022), aber auch wenn der Eisschild durch Abschmelzen an Höhe verliert, in wärmere Luftschichten gelangt und so noch schneller schmilzt (Armstrong McKay *et al.*, 2022).

Die Existenz von Kippdynamiken des Grönländischen Eisschildes ist relativ sicher, weniger jedoch der genaue Kipppunkt (Fox-Kemper *et al.*, 2021). Dieser könnte um 1,5 °C (1–3 °C) liegen, wonach der nahezu vollständige Verlust des Eisschildes über mehrere Jahrtausende unumkehrbar sein wird (Robinson *et al.*, 2012; Armstrong McKay *et al.*, 2022; Höning *et al.*, 2023). Aufgrund von bereits beobachteten Frühwarnsignalen, wie erhöhten Schmelz- und Abflussraten, könnte der zentral-westliche Bereich des Grönländischen Eisschildes bereits nah an einer kritischen Grenze sein (Boers & Rypdal, 2021). Bei mehr als 3 °C wird der nahezu vollständige Verlust des Eisschildes über mehrere Jahrtausende unumkehrbar sein (Fox-Kemper *et al.*, 2021).

Ein solcher kompletter Kollaps des Grönländischen Eisschildes würde sich mit zusätzlich etwa +0,13 °C auf die globale Erwärmung auswirken (Boers & Rypdal, 2021; Armstrong McKay *et al.*, 2022). Insbesondere wenn durch das Abschmelzen dunklerer Untergrund freigelegt wird, werden weniger Sonnenstrahlen reflektiert und mehr Energie, bzw. Wärme absorbiert (Wunderling *et al.*, 2020).

Weiterhin hätte ein Kollaps des Eisschildes auch Auswirkungen auf andere Kippelemente, besonders die Atlantische Umwälzzirkulation (Armstrong McKay *et al.*, 2022). Der zusätzliche Schmelzwasserabfluss und der damit erhöhte Süßwassereintrag könnte die Tiefenwasserbildung im Nordatlantik stören und so die Umwälzzirkulation weiter schwächen (Boers & Rypdal, 2021).

Das Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes hat weitere weitreichende Folgen, vor allem für den Meeresspiegelanstieg. Selbst in einem Szenario, in dem die globale Erwärmung auf 1,5 °C begrenzt werden kann, könnte der Grönländische Eisschild bis zum Ende des Jahrhunderts im Vergleich zum Zeitraum 1995–2014 rund 5 Zentimeter zum globalen Meeresspiegelanstieg beitragen — bei einer Erwärmung um 2,7°C sogar rund 8 Zentimeter. In einem extremen Szenario mit sehr hohen Emissionen kann aufgrund von Unsicherheiten bezüglich verschiedener Eisschildprozesse ein Beitrag zum Meeresspiegelanstieg von bis zu 60 Zentimetern bis zum Ende des Jahrhunderts nicht ausgeschlossen werden. Ein kompletter Verlust des Grönländischen Eises würde über einen Zeitraum von mindestens einem Jahrtausend etwa 7 Meter zum Meeresspiegelanstieg beitragen (Fox-Kemper *et al.*, 2021).

---

<sup>2</sup> Die Sternchen markieren die fünf als besonders relevant angesehenen Kippelemente, die hier ausführlicher begutachtet werden.

### 2.1.1.3 Westantarktischer Eisschild\*\*\*

Der Westantarktische Eisschild ist hauptverantwortlich für den beobachteten und zunehmend beschleunigten Masseverlust des gesamten Antarktischen Eisschildes in den letzten Jahrzehnten. So haben die Gletscher der Westantarktis mehr an Masse verloren, als der Eisschild durch vermehrten Schneefall hinzugewann. Der Masseverlust dieser Gletscher wurde vor allem durch das Schmelzen des Schelfeises (als Folge der globalen Erwärmung der Ozeane) sowie den Zerfall des Schelfeis (aufgrund von starkem Schmelzen auf der Oberfläche) verursacht. Der gesamte Eisschild hat in den letzten Jahrzehnten mit etwa 0,74 Zentimetern zum globalen Meeresspiegelanstieg beigetragen, hauptsächlich durch den Masseverlust der westantarktischen Gletscher, und wird in diesem Jahrhundert und darüber hinaus weiterhin an Masse verlieren (Fox-Kemper *et al.*, 2021).

Eine beschleunigte Erwärmung der Ozeane ist in diesem Jahrhundert wahrscheinlich, mit einer unvermeidlichen Zunahme der Schelfeisschmelze – einschließlich in Regionen, die für die Stabilität des Westantarktischen Eisschildes entscheidend sind (Naughten *et al.*, 2023).

Es besteht allerdings große Unsicherheit bezüglich möglicher abrupter und/oder unumkehrbarer Verluste durch die Instabilität mariner Teile des Antarktischen Eisschildes, und ob diese Prozesse zu einem Kollaps des Westantarktischen Eisschildes führen werden. Beobachtete Masseverluste einiger Gletscher könnten bereits erste Anzeichen dieser marinen Instabilität des Westantarktischen Eisschildes sein. Diese Prozesse einer möglichen Instabilität des marinen Eisschildes und der marinen Eisklippe sind aus wissenschaftlicher Sicht unzureichend gut verstanden, und könnten bei hohen Treibhausgas-Emissionen den Verlust des Eises erheblich steigern (Fox-Kemper *et al.*, 2021).

Aufgrund seiner vermuteten Instabilität wird der Westantarktische Eisschild als Kippelement angesehen, mit einem potenziellen Kipppunkt von 1,5 °C (1–3 °C) (Fox-Kemper *et al.*, 2021; Armstrong McKay *et al.*, 2022; Garbe *et al.*, 2020). Bei mehr als 3 °C globaler Erwärmung wird der Westantarktische Eisschild im Laufe mehrerer Jahrtausende vollständig verschwinden. Bereits jetzt wäre vermutlich nicht einmal eine Rückkehr zum vorindustriellen Niveau der globalen Temperatur ausreichend, um weitere erhebliche Masseverluste zu verhindern oder umzukehren (DeConto *et al.*, 2021; Fox-Kemper *et al.*, 2021).

Das Abschmelzen des Eises ist vor allem für den globalen Meeresspiegel relevant. Selbst bei einer Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C könnte die Schmelze des gesamten antarktischen Eises bis zum Ende dieses Jahrhunderts rund 10 Zentimeter (3–25 Zentimeter) zum Meeresspiegelanstieg beitragen. Die möglichen Prozesse der Eisschild-Instabilität werden dabei gesondert betrachtet. Im Falle von sehr hohen Emissionen und einer Erwärmung um rund 5 °C könnte der Meeresspiegelanstieg bis Ende des Jahrhunderts rund 12 Zentimeter (3–34 Zentimeter) betragen; würden die mit Unsicherheit behafteten Prozesse ebenfalls einbezogen, könnte dies auf bis zu 56 Zentimeter steigen. Dies zeigt die großen Unsicherheiten bezüglich des gesamten Antarktischen Eisschildes bei höheren Emissionen auf. (Fox-Kemper *et al.*, 2021; DeConto *et al.*, 2021). Der Westantarktische Eisschild spielt hierbei eine zentrale Rolle.

Aufgrund des langsamen Abschmelzens des Eises über Jahrtausende nach dem Erreichen eines Kipppunkts sind langfristige Projektionen für den Meeresspiegelanstieg besonders relevant. Ein kompletter oder fast-kompletter Verlust des Westantarktischen Eisschildes würde einen globalen Meeresspiegelanstieg von 2 bis 5 Metern verursachen (Fox-Kemper *et al.*, 2021).

Zudem würde sich ein Überschreiten des Kipppunkts des Westantarktischen Eisschildes zusätzlich mit etwa +0,05°C auf die globale und mit etwa +1 °C auf die regionale Erwärmung auswirken (Armstrong McKay *et al.*, 2022)

#### 2.1.1.4 Ostantarktischer Eisschild

Der Ostantarktische Eisschild ist der größte Eisschild der Welt. Er hat in den letzten Jahrzehnten zeitweise an Masse verloren, jedoch auch in Zeiten erhöhter Niederschläge (in Form von Schnee) wieder an Masse gewonnen (Fox-Kemper *et al.*, 2021, Wang *et al.*, 2023). Zumindest Teile dieses Eisschildes sind instabil und werden bei anhaltender globaler Erwärmung von rund 3 °C (2–6 °C) unumkehrbar abschmelzen (Fox-Kemper *et al.*, 2021, Armstrong McKay *et al.*, 2022). Ein vollständiger Verlust des gesamten Eisschildes, über einen Zeitraum von mehreren Jahrtausenden hinweg, könnte bei einem Kipppunkt von rund 7,5 °C (5–10 °C) eintreten (Armstrong McKay *et al.*, 2022). Ab diesem Grad der globalen Erwärmung würden vor allem die steigenden Temperaturen in zunehmend niedrigeren Höhenlagen des Eisschildes den Verlust des Eises weiter antreiben, was einen wichtigen Rückkopplungs-Effekt darstellt. Ein vollständiger Verlust des Ostantarktischen Eisschildes würde zu einem Anstieg des Meeresspiegels um rund 50 Meter führen und mit rund +0,6 °C zur globalen Erwärmung beitragen (Garbe *et al.*, 2020, Armstrong McKay *et al.*, 2022).

#### 2.1.1.5 Gebirgsgletscher (außerhalb Grönlands und der Antarktis)

Gebirgsgletscher kommen in allen Regionen der Welt vor, von den Tropen bis in die Polarregionen und weisen dementsprechend unterschiedliche Prozesse und mögliche Kipppunkte auf (International Cryosphere Climate Initiative, 2022). Dennoch haben nahezu alle Gletscher weltweit in den letzten Jahrzehnten mit zunehmender Geschwindigkeit an Masse verloren und dadurch allein in diesem Zeitraum mit 1,71 Zentimetern zum globalen Meeresspiegelanstieg beigetragen. Künftig werden die Gletscher weiter erheblich an Masse verlieren — selbst bei einer Stabilisierung der globalen Temperatur für mehrere Jahrzehnte. Bei anhaltender Erwärmung bis zu 1,5 °C oder sogar 2 °C über dem vorindustriellen Niveau würden nur 50–60 % der weltweiten Gletscher überdauern und dies vor allem nur in den Polarregionen. Zwischen 3 und 5 °C Erwärmung würden etwa 60–75 % der Gletscher außerhalb der Antarktis verschwinden — ein Erwärmungsniveau, bei dem die Gletscher in niedrigen Breiten, wie etwa in Europa, beinahe vollständig verschwinden würden (Fox-Kemper *et al.*, 2021). Für Gebirgsgletscher außerhalb Grönlands und der Antarktis wird ein Kipppunkt von rund 2 °C (1,5–3 °C) vermutet, um diese Gletscher vollständig zum Schmelzen zu bringen. Die Zeiträume für das Abschmelzen sind je nach Gletscher sehr unterschiedlich und werden im Mittel auf rund 200 Jahre (50–1000 Jahre) geschätzt (Armstrong McKay *et al.*, 2022). Der Verlust von Gletschern hat gravierende Auswirkungen auf Menschen und Ökosysteme, die von Gletschern und Schneeschmelze abhängig sind, um Wasser etwa für die Landwirtschaft, Wasserkraft, und Versorgung des Wasserbedarfs der lokalen Bevölkerung zur Verfügung zu stellen. Bereits bei einer Erwärmung von mehr als 1,5 °C stellen begrenzte Wasserressourcen für diese Regionen eine Grenze dar, ab der keine Maßnahmen zur Anpassung mehr möglich sind (IPCC, 2022a).

#### 2.1.1.6 Permafrost

Der gegenwärtige Klimawandel führt zu Raten des Permafrost-Auftauens, die die Geschwindigkeiten der letzten Jahrtausende übertreffen und bereits heute lokal Permafrost auftauen lässt, der seit 400,000 Jahren gefroren war (Jones *et al.*, 2023). Permafrost, oder auch Dauerfrostböden, speichern zwischen 2,5 und 3 Billionen Tonnen organischer Kohlenstoffverbindungen. Damit repräsentieren die Permafrostregionen rund ein Drittel aller globaler Kohlenstoffspeicher und sind die mit Abstand größten Kohlenstoffspeicher der Welt. Durch das Auftauen der Permafrostböden werden die gespeicherten Kohlenstoffverbindungen natürlichen Zersetzungsprozessen ausgesetzt. Dies führt zu einer Freisetzung von Kohlenstoff in Form von Kohlenstoffdioxid und Methan (Abbott *et al.*, 2022). Als Kippelemente werden sowohl das abrupte Auftauen, sowie der vollständige Kollaps der Dauerfrostböden diskutiert. Beim

abrupten Auftauen handelt es sich um lokale Prozesse, während ein vollständiger Kollaps der Dauerfrostböden durch anhaltende hohe Erderwärmung die komplette Permafrostregion betreffen würde (Armstrong McKay *et al.*, 2022, Abbott *et al.*, 2022). Abrupte Tauprozesse und rasch schmelzendes Grundeis führt zu sich-selbstverstärkenden Prozessen wie Hangrutschungen und Oberflächenabsenkungen (sogenannter Thermokarst) und können im Vergleich zum langsamen Auftauen bis zu doppelt so viele Treibhausgasemissionen in Form von Kohlenstoffdioxid und Methan freisetzen. Modellierungen zufolge könnte demnach durch abruptes Tauen mindestens so viel Kohlenstoff als Kohlenstoffdioxid- und Methan-Emissionen pro °C Erwärmung freigesetzt werden, wie derzeit global jährlich emittiert wird (Turetsky *et al.*, 2020). Abruptes Auftauen könnte bereits bei einer Erderwärmung von 1,5 °C (1–2,3 °C) ausgelöst werden und würde weitere lokale Kippdynamiken, wie fortlaufendes Tauen und die weitere Freisetzung von Treibhausgasen, auf subkontinentaler Ebene auslösen. Abruptes Auftauen könnte innerhalb weniger Tage bis Jahre vonstattengehen, allerdings auf lokaler Ebene (Wang *et al.*, 2023). Der vollständige Kollaps des Permafrostes hingegen könnte bei einer Erwärmung von 4 °C (3–6 °C) ausgelöst werden und würde beträchtliche Auswirkungen auf das globale Klima haben. Bei einem Permafrost-Kollaps würden auf einer Zeitskala von 50 Jahren (10–300 Jahren) bis zu 250 Gigatonnen Kohlenstoff freigesetzt werden, was eine zusätzliche Erwärmung von 0,2–0,4 °C zur Folge haben könnte (Armstrong McKay *et al.*, 2022).

## 2.1.2 Atmosphäre und Ozeane

Großflächige Phänomene der Atmosphäre und Ozeane steuern unser Klimasystem. Atmosphäre und Ozeane sind durch Wärmeunterschiede und Drehmoment der Erde durchgehend in Bewegung und im ständigen Austausch miteinander. Als dynamische Zirkulationssysteme sollen hier beide in einem Abschnitt besprochen werden. Dabei ist die Bewegung von Wassermassen sehr viel langsamer als die der Atmosphäre (IPCC, 2021a).

### 2.1.2.1 Atlantische Umwälzzirkulation\*\*\*

Die Atlantische Umwälzzirkulation (*Atlantic Meridional Overturning Circulation*, AMOC) ist eine zentrale Komponente des globalen Meereszirkulationssystems. Sie transportiert warmes, salziges Wasser an der Meeresoberfläche vom Südatlantik bis in den Nordatlantik. Dort kühlt das Wasser ab und sinkt um Grönland herum ab. Das Nordatlantische Tiefenwasser fließt wiederum nach Süden. So werden Wassermassen, Nährstoffe, und Energie in Form von Wärme transportiert. Der Transport von Wärme ist dabei besonders bedeutend für regionale Wettermuster (OECD, 2022) und die AMOC spielt eine wichtige Rolle für die Bewahrung eines relativ milden Klimas in West- und Nordeuropa. Eine Unterbrechung der Zirkulation würde dazu führen, dass der Warmwassertransport unterbrochen wird und sich der Nordatlantik dadurch abkühlen würde. Die AMOC wird somit als ein zentrales Kippelement angesehen.

Es wird davon ausgegangen, dass die AMOC während der letzten achttausend Jahren weitestgehend stabil war. Es ist wahrscheinlich, dass sie sich dann bereits seit dem späten 19. Jahrhundert leicht abgeschwächt hat, allerdings gibt es zu wenige Messdaten und Beobachtungen, um dies mit Gewissheit zu sagen. Beobachtungen zeigen eine Abschwächung der AMOC seit den Zweitausender Jahren. Dies kann allerdings noch nicht als Langzeittrend angesehen werden, da die AMOC natürlichen Schwankungen unterliegt, welche Jahrzehnte andauern können (Gulev *et al.*, 2021; Caesar *et al.*, 2021).

Eine zunehmende Süßwasserzufuhr durch schmelzende Gletscher und eine reduzierte Abkühlung des Oberflächenwassers durch die Erderwärmung, machen die oberen Schichten des Nordatlantiks leichter und verlangsamen die Formation von Tiefenwasser. Dies kann wiederum zu einer Abschwächung der gesamten Zirkulation führen, da diese durch das Absinken im

Norden angetrieben wird. Wie viel Süßwasserzufuhr dazu führen würde, dass die Zirkulation zum Stillstand kommt ist allerdings ungewiss (Wunderling, Von Der Heydt, *et al.*, 2023). Aktuell wird davon ausgegangen, dass die AMOC bei einer globalen Temperatur von etwa 4 °C (1,4–8°C) (Armstrong McKay *et al.*, 2022) aus dem Gleichgewicht gebracht werden kann und ihren Kipppunkt erreicht. Veränderungen würden sich nach einem Überschreiten über einen Zeitraum von rund 50 Jahren (15 bis 300 Jahren) einstellen.

Studien und Modelle zeigen, dass ein vollständiges Erlahmen der AMOC zu erheblichen klimatischen Veränderungen führen könnte, einschließlich einer Abkühlung des Nordatlantiks um 3 bis 8 °C und einer Verschiebung des tropischen Regengürtels nach Süden (Jackson *et al.*, 2015; Lynch-Stieglitz, 2017). Schon eine leichtere Abschwächung der AMOC hätte zum Beispiel eine Abkühlung des Nordatlantiks um etwa 2°C zur Folge (Haarsma *et al.*, 2015). Die Veränderungen der ozeanischen Zirkulation könnten auch Sturmverläufe und ihre Intensitäten im Nordatlantik beeinflussen (Gastineau *et al.*, 2016) sowie den Meeresspiegel des Nordatlantiks ansteigen lassen (Levermann *et al.*, 2005; Schleussner *et al.*, 2011; Yin and Goddard, 2013). Außerdem würde die innertropische Konvergenzzone, an der die Passatwinde der Nord- und Südhemisphäre aufeinandertreffen, durch eine Abminderung der AMOC in den Süden verschoben und somit die Niederschlagsmengen im tropischen Atlantik nördlich des siebten Breitengrades der Nordhemisphäre erhöhen und südlich des 7. Breitengrades verringern. Dies kann sowohl zu Überflutungen, als auch zu Dürren führen (Liu *et al.*, 2020). Besonders die Borealen Wälder in Europa und Asien sind von den abnehmenden Niederschlägen betroffen und könnten in weitem Ausmaß vertrocknen. Des Weiteren können der Afrikanische sowie der Indische Monsun unterbrochen werden. Dies würde zu einer Reduktion der Niederschläge und somit zu Dürren führen. Entsprechenden Problemen mit der Lebensmittelversorgung, wie mögliche negative Auswirkungen auf die Reisernte in Indien, werden prognostiziert (OECD, 2022).

### 2.1.2.2 Korallenriffe\*\*\*

Korallenriffe beherbergen ein Viertel der marinen Biodiversität und spielen eine wichtige Rolle in der marinen Nahrungskette, sowie für den marinen Nährstoff- und Kohlenstoffzyklus. Korallenriffe liefern wichtige Ökosystemdienste und bieten die Lebensgrundlage für Millionen von Menschen weltweit (Armstrong McKay *et al.*, 2022). Sie sind eine Nahrungs- und Einkommensquelle und dienen als Erholungsorte (Cooley *et al.*, 2022). Zusätzlich haben Korallenriffe eine wichtige Küstenschutzfunktion, da sie die Intensität von Wellen reduzieren, bevor diese auf die Küste treffen. Korallenriffe bieten somit Schutz vor Überflutung.

Die Fläche mit lebend bedeckten Korallen ist durch die Einwirkung von Hitzestress und massiver Korallenbleiche deutlich zurückgegangen. Des Weiteren wurden der Verlust von sensiblen Korallenspezies und die zunehmende Empfänglichkeit für Krankheiten der Korallen dokumentiert (Cooley *et al.*, 2022). Zwischen 1957 und 2007 ging die globale Korallenfläche um 50% zurück (Eddy *et al.*, 2021). Die El-Nino Jahre 2014–2015 lösten die größte dokumentierte globale Korallenbleiche aus, welche bis 2017 anhielt. In Kiribati starben bereits 2015 mindestens 80% der Korallen und 95% des nördlichen Great Barrier Reefs, welches bis zu dem Zeitpunkt als der gesündere Teil galt, war stark durch Korallenbleichen betroffen (Eakin *et al.*, 2019).

Korallenbleichen durch extremen Hitzestress sind ein Phänomen, bei dem sich die Symbiose zwischen den Korallen und ihren symbiontischen Mikroalgen auflöst und die Algen ausgestoßen werden. Diese Mikroalgen betreiben Photosynthese und decken durch die Symbiose eigentlich bis zu 90% des Energiebedarfs der Korallen. Der Verlust der Symbionten für längere Zeiträume kann zum Verhungern, zu Einschränkungen in der Reproduktion und zu erhöhter Anfälligkeit für Krankheiten der Koralle führen (Wang *et al.*, 2023). Marine Hitzewellen mit

Temperaturabweichungen von 1°C führen bereits zum Auflösen der Symbiose. Diese Ereignisse treten mit zunehmender Wahrscheinlichkeit ein und die Abstände zwischen Hitzewellen werden immer kürzer, wodurch die Korallen keine Zeit mehr haben, sich zu erholen und neue Symbiosen aufzubauen (Hughes *et al.*, 2018; Baum *et al.*, 2023). Der Kipppunkt, ab dem eine großflächige Zerstörung von Korallenriffen (70–90% der globalen Korallenriffe) zu erwarten ist, liegt bei 1,5 °C (1–2 °C), würde in einem Zeitrahmen von ungefähr zehn Jahren ablaufen und zum unaufhaltsamen Absterben der Korallen führen. Bei ungefähr 2°C Erwärmung ist mit einem vollständigen Aussterben der globalen Korallenriffe zu rechnen.

Korallenriffe sind zudem von weiteren anthropogenen Einflüssen betroffen, welche die Resistenz gegen Hitzewellen verringern. Die Meeresversauerung durch die Absorption von CO<sub>2</sub> der Atmosphäre in den Ozeanen greift die Skelette von Kalziumkarbonat basierten Korallenarten an. Sie führt zu einer Reduzierung der Skelettbildung, einer Abnahme der Ansiedlung von Korallen, sowie zu Bioerosion und Auslösung von Riffsubstraten (Cooley *et al.*, 2022). Des Weiteren führen Überfischung und erhöhter Nährstoffzufluss, z.B. durch direkten Abwasserablass in die Meere, zu Bedingungen welche die Resistenz der Korallen gegenüber und die Erholungschancen nach marinen Hitzewellen verringern und somit zu erhöhter Mortalität führen (Donovan *et al.*, 2021). Mit einem Verlust von intakten Korallenriffen geht auch ihre wichtige Küstenschutzfunktion verloren. Eine Zunahme der Wellenenergie, die die Küste erreicht kann bereits innerhalb einiger Jahre nach einem Korallensterben festgestellt werden (Sheppard *et al.*, 2005). Dadurch wird die Vulnerabilität von Korallenriffen gesäumten Küstenzügen in Bezug auf den Meeresspiegelanstieg weiter verstärkt (Cooley *et al.*, 2022).

### 2.1.2.3 El-Niño-Phänomen

Die El Niño-Südliche Oszillation (ENSO) oder auch schlicht El Niño genannt, ist ein wichtiges Muster jährlicher Klimavariabilität, welches sich über Schwankungen in Oberflächenmeerestemperaturen im tropischen Pazifik definiert. Es lassen sich zwei ENSO-Phasen unterscheiden, welche als El Niño und La Niña bezeichnet werden. Beide Phasen wirken sich weltweit auf regionale bis lokale Niederschlags- und Temperaturmuster aus. Ein Übergang in einen dauerhaften El Niño-Zustand könnte durch den Klimawandel ausgelöst werden, allerdings wird dieses nicht als klimatisches Kippelement betrachtet (Armstrong McKay *et al.*, 2022). Dennoch sind signifikante Veränderungen im tropischen Klima durch die globale Erwärmung möglich (Cai *et al.*, 2021). Dauerhafte El-Niño-Bedingungen könnten beispielsweise zu trockeneren Tropen und grüneren Gebieten in Eurasien und Nordamerika führen (Duque-Villegas *et al.*, 2019).

### 2.1.2.4 Indisches Monsunregime

Der indische Sommermonsun (ISM) ist ein jährlich wiederkehrendes Wettersystem des indischen Subkontinents, das jährlich etwa 80 % des regionalen Niederschlags bringt und somit von existentieller Bedeutung für die Bevölkerung und Ökosysteme ist. Das Kippen des ISM beschreibt eine abrupte Veränderung, mit der es zur Neuordnung eines derzeit feuchten klimatischen Zustands zu einem trocken-klimatischen Zustand in Südasien kommen kann. Auch wenn einige Studien den ISM als Kippelement charakterisieren (Lenton *et al.*, 2008) und frühe Modellstudien ein Kippverhalten nahelegen (Zickfeld *et al.*, 2005; Levermann *et al.*, 2009; Schewe & Levermann, 2012), gilt der ISM in neueren Studien eher nicht als Kippelement, da neueste Modellstudien zeigen, dass unter fortlaufender Erwärmung eher von einer Verstärkung des ISM ausgegangen werden kann (Armstrong McKay *et al.*, 2022). Jedoch wird der ISM von anderen Kippelementen im Erdsystem beeinflusst und könnte als Resultat einer Kippkaskade, ausgelöst durch die Schwächung der AMOC, gestört werden (Mohtadi *et al.*, 2014).

### 2.1.2.5 Jetstream

Als Jetstream wird das Starkwindssystem in der oberen Troposphäre der mittleren Breiten der Nord- und Südhemisphäre bezeichnet, welches maßgeblich für den Transport von Wettersystemen sowie für die Bildung von Extremwetterbedingungen in den gemäßigten Klimazonen verantwortlich ist. Die globale atmosphärische Zirkulation und damit auch der Jetstream als Subkomponente stehen im Austausch mit anderen Teilen des Erdsystems, wie beispielsweise den Ozeanen, der Vegetation und der Kryosphäre.

Eine Veränderung des klimatologischen Zustandes, welcher durch ein verstärktes Mäandern des Jetstreams (d.h. ein kurvenreiches und verschlungenes Windmuster mit stationären Hoch- und Tiefdruckgebieten) und zunehmend persistente Wettersituationen geprägt wäre, hätte direkte Auswirkungen auf die Häufigkeit und Schwere von Extremwetter in den mittleren Breiten. Theoretische Studien zeigen, dass der Jetstream tatsächlich Kippunktcharakter besitzen kann (Drijfhout *et al.*, 2013) und sich die großskalige Zirkulation auch in der Vergangenheit abrupt auf veränderte globale Klimabedingungen eingestellt hat (Fohlmeister *et al.*, 2023). Für ein Kippverhalten des Jetstreams gibt es jedoch keine Hinweise. Naheliegender ist eine reaktive und vermittelnde Rolle des Jetstreams, der durch positive Rückkopplungen, mit beispielsweise der Biosphäre und der Kryosphäre, Kipppunkte auslösen oder durch das Auslösen von Kippdynamiken anderer Erdsystemkomponenten, wie beispielsweise dem Meereis oder Wäldern, beeinflusst wird.

### 2.1.2.6 Methan aus dem Meeresboden

Der Meeresboden hält große Mengen an Methan in Form von Einschlussverbindungen (Klathrat), beispielsweise mit Wasser als Hydrat. Diese Methanverbindungen bilden sich unter hohem Druck und niedriger Temperatur in arktischen Gewässern ab 300 Metern Meerestiefe und in wärmeren Gewässern ab 500 Metern. Weltweit stellen Methan-Klathrate in Meeresböden eines der größten Kohlenstoffreservoirs dar. Für die Freisetzung von Methan aus Meeresböden müssten sich die Meeresböden erwärmen. Die Erwärmung der Meeresböden folgt der Erderwärmung allerdings mit einem Zeitunterschied von Jahrzehnten bis Jahrtausenden. Hinzu kommen weitere physikalisch-chemische Faktoren, welche dazu führen, dass Methan-Klathrate nur langsam freigesetzt werden würden und somit nicht als Kippelement einzuordnen wären (Wang *et al.*, 2023). Allerdings ist eine Freisetzung von Methan-Klathraten ausgelöst durch eine Verlangsamung der Atlantischen Umwälzzirkulation möglich, da dadurch die Erwärmung der verschiedenen Wasserschichten vorangetrieben wird (Weldeab *et al.*, 2022). Methan-Klathraten sind eisähnliche Strukturen, die nur unter Bedingungen von niedrigen Temperaturen und hohem Druck stabil sind. Durch eine Veränderung der Temperatur in den unteren Meeresschichten könnte so Methan freigesetzt werden.

### 2.1.3 Biosphäre

Die Biosphäre umfasst alle Ökosysteme und lebenden Organismen der Erde sowie deren abgestorbene, organische Reste (IPCC, 2021a). Neben Rückkopplungsmechanismen zwischen der Biosphäre und dem Klimasystem ist die Biosphäre besonders wichtig, um unsere Lebensbedingungen, wie beispielsweise die Nahrungsversorgung sicherzustellen (CBD, 2022).

#### 2.1.3.1 Sahelzone

Aufgrund von mehreren abrupten Veränderungen in der Vegetation der Sahelzone und des Westafrikanischen Monsuns in der Vergangenheit können diese als potentielles regionales Kippelement angesehen werden, wobei dies mit großen Unsicherheiten verbunden ist (Armstrong McKay *et al.*, 2022). Nach einer Dürre in der Sahelzone in den 1970er und 1980er

Jahren stieg der Niederschlag wieder an (Douville *et al.*, 2021). Künftig könnten die Niederschläge des Westafrikanischen Monsuns in der zentralen und östlichen Sahelzone zunehmen und im Westen abnehmen, wobei der Monsun verspätet eintreffen könnte (Douville *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023). Auch wird angenommen, dass sich die zentrale und östliche Sahelzone in Richtung Norden ausdehnen würde. Ab einer Erwärmung von rund 2,8 °C (2–3,5 °C) könnten bekannte positive Rückkopplungsmechanismen zwischen zunehmendem Niederschlag und zunehmender Vegetation zu abrupten Veränderungen in der Vegetation der Sahelzone beitragen, wobei diese über einen Zeitraum von rund 50 Jahren (10–500 Jahren) erfolgen würden. Dieser regionale Kippunkt ist mit großen Unsicherheiten verbunden (Armstrong McKay *et al.*, 2022). Die Folgen für das globale Klimasystem wären ungewiss und könnten etwa das arktische Klima und das El-Niño-Phänomen betreffen (Pausata *et al.*, 2020). Die regionalen Auswirkungen eines Kippens wären erheblich. So könnte ein erhöhter Niederschlag zwar Vorteile etwa für die Landwirtschaft bieten, würde jedoch auch große Herausforderungen für die Anpassung etwa der Landwirtschaft und Infrastruktur an die neuen Bedingungen mit sich führen (Schewe & Levermann, 2022).

### 2.1.3.2 Boreale Wälder

Boreale Wälder sind in ihrer Nord-Süd-Ausbreitung zwischen den 50. bis 70. Breitengraden der Nordhemisphäre angesiedelt. Durch den Klimawandel wandern diese Wälder nach Norden. Dabei ist sowohl die Ausbreitung der borealen Wälder gen Norden als auch der Verlust borealer Wälder in den südlichen Ausbreitungsgrenzen ein regionales Kippelement. Beide Phänomene führen zu Veränderungen der Albedo und gefährden zudem einen global wichtigen Kohlenstoffspeicher. Des Weiteren stellen boreale Wälder wichtige Ökosystemfunktionen für die Bewohnerinnen und Bewohner borealer Regionen bereit. Ein flächendeckender Ökosystemwandel von Tundragebieten zu Waldgebieten könnte ab 3,5°C Erwärmung von statten gehen. Der Kippunkt, nach dem die Ausbreitung der Wälder im Norden zu einem kompletten Wandel des Bioms führen würde, wird auf 4 °C (1,5–7,2 °C) geschätzt. Die Ausbreitung gen Norden geschieht in Zeiträumen von rund 100 Jahren und führt durch die Veränderung der Oberflächenreflektion zu einer zusätzlichen Erwärmung von 0,14 °C. In den südlichen Ausbreitungsgrenzen werden ebenfalls bei 4 °C (1,4–5 °C) auf lange Sicht unumkehrbare Ökosystemänderungen ausgelöst, wobei durch hydrologische Veränderungen, vermehrte Waldbrände und Borkenkäferplagen unzählige Bäume absterben und sich Grassteppen-Landschaften entwickeln werden. Nach Übertreten des Kippunktes läuft der Prozess in einem Zeitraum von etwa 100 Jahren. Dieses Kippelement kann zu einer Freisetzung von 52 Gigatonnen Kohlenstoff, hauptsächlich in Form von Kohlenstoffdioxid führen, könnte aber aufgrund der Erhöhung der Albedo auch zu einer Abkühlung des Weltklimas führen (Armstrong McKay *et al.*, 2022).

### 2.1.3.3 Tropische Regenwälder

#### 2.1.3.3.1 Amazonas-Regenwald\*\*\*

Neuesten Studien zufolge könnte sich das Amazonasgebiet einem kritischen Kippunkt nähern. Der Amazonas-Regenwald ist der größte Regenwald der Erde und spielt durch die Speicherung von mehreren Milliarden Tonnen Kohlenstoff und die Regulierung des Wasserkreislaufs eine wichtige Rolle im globalen Klimasystem. Fast 20 % seiner Fläche sind seit 1970, größtenteils durch Rodungsaktivitäten, verloren gegangen. Faktoren wie steigende Temperaturen und erhöhte Dürreerisiken verschärfen die Situation (Wang *et al.*, 2023).

Die hohe Verdunstungs- und Transpirationsrate von Regenwäldern spielen eine wichtige Rolle für die Feuchtigkeit der regionalen atmosphärischen Grenzschicht. Regen beruht insbesondere in Zentral und Ostamazonas auf 'Recycelter Feuchtigkeit' (Zemp *et al.* 2017). Ein Rückgang oder

eine Veränderung der Waldstruktur hat somit eine selbstbeschleunigende Wirkung, bei der Feuchtigkeit systematisch verloren geht.

Der Amazonas gilt somit als ein Kippelement des Erdsystems, dessen Kipppunkt auf 3–4 °C (2–6 °C) globaler Temperaturveränderung geschätzt wird. Zusätzlich zu klimatologischen Veränderungen kann der Kipppunkt ebenfalls durch verstärkte Abholzung ausgelöst werden. Erste Studien sagten voraus, dass eine Abholzung von 40% zum Übergang zu einem waldfreiem Ökosystem führen könnten (Salati et al., 1979). Neuere Abschätzungen von Expert\*innen setzen diesen Schwellwert bereits bei 20–25% an, da sich die negativen Auswirkungen von Klimawandel, Brandrodung und dem Verlust von Waldfläche durch selbst verstärkende (positive) Rückkopplungseffekte gegenseitig verstärken (Lovejoy & Nobre 2018). Außerdem ist es möglich, dass durch eine Verringerung des Niederschlags um 30–40 % in Folge klimabedingter Veränderungen von Regenmustern der Kipppunkt erreicht werden würde, an dem der Amazonas in ein anderes Ökosystem mit einer savannenähnlichen Struktur übergehen würde. Solche Zustandsveränderungen würden sich auf einer Zeitskala von zirka 100 Jahren (50–200 Jahren) vollziehen (Lovejoy & Nobre 2018, Armstrong McKay et al., 2022; Wang et al., 2023) und hätten eine erhöhte Gefahr von Dürren, Waldbränden und eine Bedrohung der Biodiversität zur Folge (Wang et al., 2023). Ein Kippen des Amazonas könnte unumkehrbare Folgen für das globale Klimasystem haben und weitere Kipppunkte auslösen (s. Kippkaskaden, Kap. 2.2). Da im Amazonasgebiet etwa ein Viertel des globalen Kohlenstoffaustauschs stattfindet, hätte ein Kippen ebenfalls Konsequenzen für globale Emissionsziele und verbleibende Kohlenstoffbudgets.

Ein Kippen hat weitreichende Folgen für das globale Klimasystem sowie die lokale Bevölkerung. Der Amazonas fungiert derzeit als Kohlenstoffsene, wobei regionale und saisonale Abweichungen bestehen (Gatti et al., 2021). Dies bedeutet, dass Teile der vom Menschen durch Verbrennungsprozesse freigesetzten Kohlenstoffe von den Wäldern gebunden und gespeichert wird. Ein Kippen zu einem waldfreiem Ökosystem könnte bedeuten, dass der Amazonas von einer Senke zu einer Quelle wird, und Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> freigesetzt werden. Durch Verdunstungsprozesse über Vegetation und Böden (d.h. Evapotranspiration) spielen die Amazonas-Wälder eine wichtige Rolle im Wasserzyklus Südamerikas. Lokale Veränderungen könnten zu weitreichenden Konsequenzen wie Dürren und Überschwemmungen in der Region führen. Der Wechsel von einer Wald- zu einer Savannenlandschaft hätte zusätzlich durch die Veränderung der Oberflächenreflektivität Einflüsse auf die Albedo Eigenschaften vor Ort und würde zu einer beschleunigten Erwärmung und Trockenheit führen. Ein Kippen des Ökosystems hätte somit auch direkte Folgen für die lokale Biodiversität, was den Verlust von Millionen von Pflanzen und Tierarten bedeuten würde.

Indigene Gemeinschaften wären von solchen radikalen Veränderungen besonders betroffen, da sie ihren Lebensraum verlieren und ihre Lebensweise umstellen müssten. Wirtschaftliche Auswirkungen wären in allen Bereichen spürbar, die direkt vom Amazonas und einem funktionierenden Wasserkreislauf abhängen, wie beispielsweise der Landwirtschaft.

Aus globaler Sicht würde ein Wandel des Amazonas-Regenwaldes von einer Kohlenstoffsene zu einer Kohlenstoffquelle die Erderwärmung weiter beschleunigen, mit weltweiten Konsequenzen für das Aufkommen von Wetterextremen und dem daraus resultierenden erhöhtem Druck, bedeutsame Emissionsreduzierungen in allen Sektoren voranzutreiben.

#### **2.1.3.3.2 Kongo-Regenwald**

Das Kongobecken beheimatet über 70 % der Waldfläche des afrikanischen Kontinents und ist als zweitgrößter tropischer Regenwald von zentraler regionaler und globaler Bedeutung für die Biodiversität und den Kohlenstoffkreislauf.

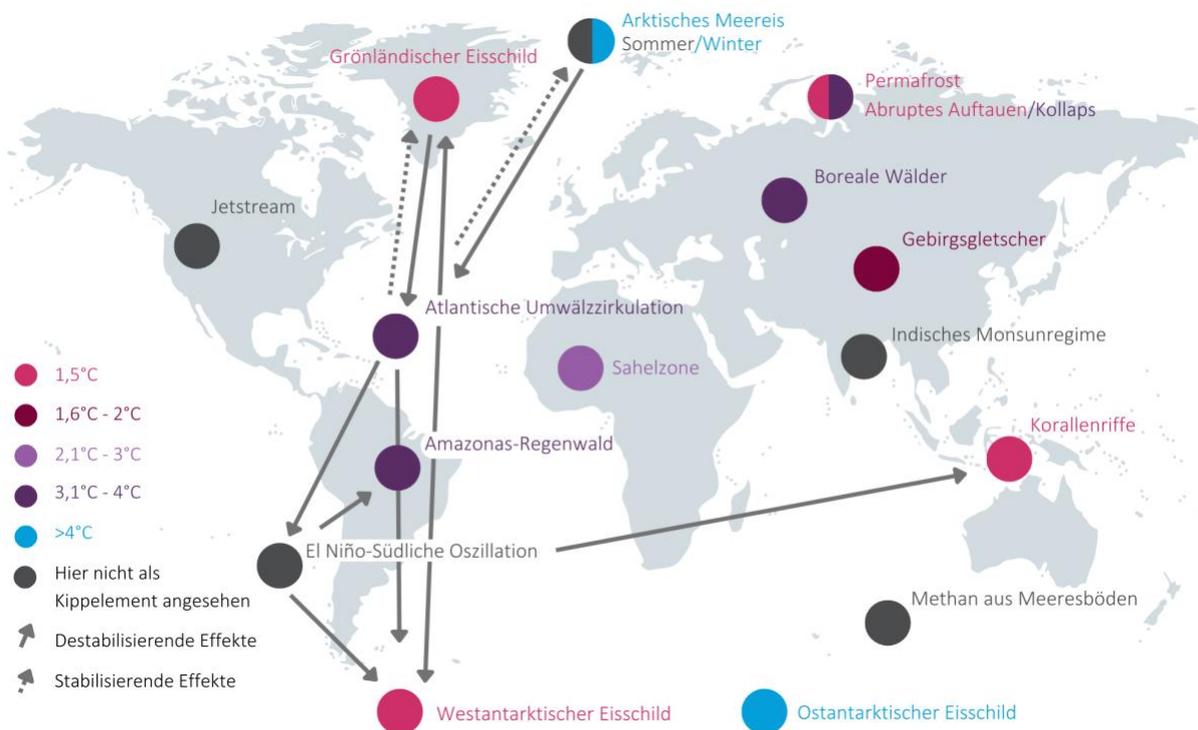
Im Gegensatz zum Amazonas könnte der tropische Regenwald im zentralen Afrika durch den Klimawandel widerstandsfähiger werden, da einige Modelle steigende Niederschlagsmengen im Kongobecken bei steigenden Emissionen prognostizieren (Staal *et al.*, 2020). Vorhandene Modelle zeigen jedoch widersprüchliche Trends für den Niederschlag. Zudem ist die Datenlage für Zentralafrika sehr schlecht. Daher sind solche Prognosen mit großen Unsicherheiten verbunden (Singh *et al.*, 2023).

Im Vergleich zum Amazonas erhalten zentralafrikanische Regenwälder weniger Niederschlag und sind zudem fragmentierter, mit Savannen durchsetzt (Jiang *et al.*, 2019) und starken Veränderungen durch menschliche Einflüsse, wie beispielsweise Abholzung, ausgesetzt. Diese Faktoren könnten die Fähigkeit der zentralafrikanischen Regenwälder auf den Klimawandel zu reagieren, verringern.

## 2.2 Kaskadische Kippdynamiken

Die komplexe Vernetzung einzelner Komponenten im Erdsystem birgt die Möglichkeit von Kettenreaktionen zwischen einzelnen Kippelementen sowie von positiven Rückkopplungen. Solche kaskadischen Kippdynamiken bergen Risiken unvorhergesehener Zustandsänderungen über mehrere Kippelemente hinweg sowie für weitere Teile des Klimasystems. Das Konzept der „Kippkaskaden“ betont die Vernetzung der Systeme der Erde und das Potenzial für unvorhergesehene oder gekoppelte Konsequenzen, wenn wir bestimmte kritische Komponenten stören (OECD, 2022; Wunderling *et al.*, 2021) (Abbildung 3).

**Abbildung 3: Übersichtskarte Kippelemente des Klimasystems und ihre (de)stabilisierenden Effekte untereinander, die Einfluss auf kaskadische Kippdynamiken haben können**



Wichtige Kippelemente und ihre Kippunkte bei einer bestimmten globalen Erwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Niveau (1850–1900). Korallenriffe, das abrupte Tauen der Permafrostböden sowie der Grönländische und der Westantarktische Eisschild (rotes Kreissymbol) drohen bereits bei einer anhaltenden globalen Erwärmung von 1,5 °C ihre Kippunkte 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, Von Der Heydt, *et al.*, 2023

Folgende Feedback-Kaskaden und Kippelemente sind besonders relevant (Wunderling *et al.*, 2021):

- ▶ Grönländischer Eisschild und Atlantische Umwälzzirkulation
  - Das Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes treibt die Abschwächung der Atlantischen Umwälzzirkulation voran. Andersherum würde eine Abschwächung der Atlantischen Umwälzzirkulation allerdings zu einer Abnahme der Temperaturen um Grönland führen und somit den Grönländischen Eisschild stabilisieren. Daher wird davon ausgegangen, dass diese Elemente sich gegenseitig stabilisieren.

- ▶ Grönländischer und Westantarktischer Eisschild
  - Beide Phänomene destabilisieren sich gegenseitig. Der Anstieg des Meeresspiegels, der durch das Schmelzen der Eisschilde verstärkt wird, destabilisiert die Eisschilde weiter.
- ▶ Westantarktischer Eisschild und Atlantische Umwälzzirkulation
  - Die Abschwächung der Atlantischen Umwälzzirkulation würde zu einer Hitzeansammlung im Südpolarmeer führen und damit den Westantarktischen Eisschild destabilisieren. Es ist unklar, ob das Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes zu einer Stabilisierung oder Destabilisierung der Atlantischen Umwälzzirkulation führen würde.
- ▶ El-Niño-Phänomen und Amazonas Regenwald
  - Änderungen von Amplitude und Häufigkeit der ENSO wirken sich auf Niederschlags- und Temperaturschwankungen in verschiedenen Regionen des südamerikanischen Kontinents aus und fördern zusätzlich das Auftreten von Extremereignissen. Diese Änderungen können regional zum Absterben des Regenwaldes und zum Übergang zu degradierten savannenähnlichen Ökosystemen führen.
- ▶ El-Niño-Phänomen und Korallenriffe
  - Das El-Niño-Phänomen führt regional zu außerordentlich hohen Meerestemperaturen, die bereits voranschreitende Erwärmungserscheinungen in diesen Ozeanregionen überlagern. Dies führt zu einer verstärkten Korallenbleiche. Mit zunehmender Erwärmung treten Bleichereignisse von El-Niño-Phasen abgekoppelt auch während der kalten ENSO-Phasen (La-Niña-Phänomen) mit einer nahezu jährlichen Häufigkeit auf und erhöhen somit das Kippunktisiko deutlich.

Interaktionen zwischen den verschiedenen Kippelementen könnten dazu führen, dass diese vorzeitig kippen und damit in einen neuen Systemzustand übergehen. Starke Interaktionen vorausgesetzt, könnte der Westantarktische Eisschild demnach bereits bei einer deutlich geringeren Erwärmung kippen. Für die Atlantische Umwälzzirkulation würde sich der Kippunkt unter Berücksichtigung entsprechender Interaktionen sogar noch deutlicher verringern (Wunderling *et al.*, 2021). Außerdem können Interaktionen mit Kippelementen wie dem Dauerfrostboden oder dem Amazonas Regenwald zu zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen führen und dadurch weitere Kipppunkte beeinflussen (Wunderling, Von Der Heydt, *et al.*, 2023). Die Auswirkungen dieser Kippdynamiken könnten zudem auch durch sozioökonomische und ökologische Systeme kaskadieren, was weitere schwerwiegende Folgen für Gesellschaften und Ökosysteme bedeuten würde (OECD, 2022).

## 3 Klima- und sicherheitspolitische Implikationen

### 3.1 Zeitlicher Horizont von Kippdynamiken und Risiken in *Overshoot*-Szenarien

Die Erkenntnisse um die Risiken von Kippelementen und kaskadischen Kippdynamiken zeigen, dass diese die Auswirkungen des Klimawandels auf Gesellschaften und Ökosysteme verschlimmern würden. Anders als früher angenommen kann das Risiko eines Überschreitens von Kipppunkten in diesem Jahrhundert nicht mehr als gering angesehen werden. Dies erhöht die Dringlichkeit des politischen Handelns. (OECD, 2022)

#### Die Kippunkt-Terminologie

Seit den ersten Veröffentlichungen zu Kipppunkten im Klimasystem, wie Lenton et al., 2008, kamen eine Vielzahl von Erkenntnissen, Ansätzen und Publikationen hinzu.

Konzepte, die zum Teil verwandt sind oder sich der Kippunkt-Terminologie bedienen aber hier nicht weiter erörtert werden, sollen nur genannt werden, wobei auf die Original-Quellen verwiesen wird, wie z.B.: Planetare Grenzen (Richardson *et al.*, 2023), Risiko-Kipppunkte, wie etwa beschleunigtes Artensterben (UNU-EHS, 2023), Anpassung-Kipppunkte, ab denen bestimmte Maßnahmen nicht mehr möglich sind (Deltares, 2023).

Auch nimmt das Interesse am Konzept der sozialen Kipppunkte stetig zu, welche als nichtlineare Prozesse des transformativen Wandels in sozialen Systemen verstanden werden. Anders als Kipppunkte im Klimasystem werden diese als wünschenswert und als Teil möglicher Lösungen für den Klimawandel angesehen. Es ist jedoch für die Qualität wissenschaftlicher Erkenntnisse und für den Dialog mit der politischen Ebene wichtig, dieses Konzept nicht übermäßig zu gebrauchen (Milkoreit, 2022).

Denn dies könnte riskieren, wissenschaftliche Erkenntnisse vereinfachend und ungenau darzustellen, einen unproduktiven Fatalismus angesichts eines scheinbar unkontrollierbaren Klimawandels zu schüren, und einer langfristigen Planung in der Klimapolitik zuwiderzulaufen (Wang, 2023).

In der Diskussion um Kipprisiken ist zu beachten, dass politisch und gesellschaftlich relevante **Zeitskalen** von Jahren und Jahrzehnten sehr unterschiedlichen Zeitskalen für Kippelemente gegenüberstehen. Bei besonders langsam reagierenden Systemen wie Eisschilden kann es Jahrhunderte oder Jahrtausende dauern, bis die gesamten Folgen, inklusive möglicherweise mehreren Metern an Meeresspiegelanstieg, eingetreten sind. Umgekehrt könnte es – bestimmte klimatischen Bedingungen vorausgesetzt – ebenso lange oder länger dauern, bis solche Prozesse umkehrbar wären, weshalb diese meist als „unumkehrbar“ in für den Menschen relevanten Zeitskalen angesehen werden. Diese unter Umständen sehr langen Zeitskalen müssen jedoch auch im politischen Diskurs berücksichtigt werden.

Es ist zudem wichtig zu berücksichtigen, dass sich Einschätzungen von Kipppunkten oft auf anhaltende Erwärmungsniveaus beziehen, nicht nur auf Spitzenwerte der Erwärmung. Wie lange eine bestimmte Temperaturgrenze überschritten sein müsste, um Kippdynamiken auszulösen, und ob dies beispielsweise bereits bei einem temporären, sogenannten „**Overshoot**“ eingeleitet würde, hängt von den Kippelement-spezifischen Dynamiken ab und ist mit großen Unsicherheiten behaftet (Ritchie *et al.*, 2021).

Aufgrund unzureichender Klimaschutzbemühungen in den vergangenen Jahrzehnten sind die Risiken für ein zumindest temporäres Überschreiten der globalen Mitteltemperatur über die 1,5 °C-Grenze auch unter den ambitioniertesten globalen Klimaschuttszenarien erheblich. Die Risiken in *Overshoot*-Szenarien gilt es dabei gesondert zu beachten. Denn unvorhergesehene Dynamiken können auch durch die Erwärmungsrate sowie durch ein kurzfristiges Überschreiten von globalen Temperaturgrenzen ausgelöst werden und unumkehrbare Folgen haben.

Bei einem deutlichen *Overshoot* würde auch bei einer späteren Begrenzung auf 1,5 °C ein hohes Risiko bestehen, dass ein oder mehrere Kipppunkte ausgelöst werden, darunter die des Grönländischen und des Westantarktischen Eisschildes, der Atlantischen Umwälzzirkulation und des Amazonas Regenwaldes. (Wunderling, Winkelmann, *et al.*, 2023).

Bis zum Jahr 2300 steigen die Kipprisiken für jedes Zehntelgrad über 1,5 °C, wenn die globale Erwärmung nicht bis zum Ende dieses Jahrhunderts auf 1,5°C oder weniger zurückgeht. Wenn die Überschreitung von 1,5 °C sowohl in Hinblick auf die Spitztemperatur als auch die Dauer der Überschreitung begrenzt werden kann, können Kipprisiken bis zum Jahr 2300 minimiert werden (Möller *et al.*, 2023).

Für den Grönländischen Eisschild beispielsweise sind die Spitztemperatur und die Dauer eines *Overshoots* für seine Stabilität zentral. Dabei können Verluste des Eisschildes selbst bei einer Spitztemperatur von 6 °C oder mehr über dem vorindustriellen Niveau deutlich verringert werden, wenn die Temperatur anschließend innerhalb von ein paar Jahrhunderten auf weniger als 1,5 °C reduziert wird. Einen Beitrag zum Meeresspiegelanstieg von bis zu mehreren Metern hätte ein *Overshoot* allerdings dennoch (Bochow *et al.*, 2023).

## 3.2 Implikationen für klimapolitische Zielsetzungen

Die derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnisse um das zunehmende Risiko eines Überschreitens von Kipppunkten im Klimasystem samt möglicher kaskadischer Kippdynamiken unterstreichen die **Notwendigkeit für ein sofortiges, beispielloses, dringendes und ehrgeiziges klimapolitisches Handeln in diesem „kritischen Jahrzehnt“**.

Globale politische Strategien explizit zum Umgang mit Kipprisiken existieren jedoch praktisch nicht. Zudem verbleiben kommunikative Herausforderungen bezüglich wissenschaftlicher Unsicherheiten und Wahrscheinlichkeiten. Politische Strategien zum Umgang mit Kipprisiken sollten daher im Angesicht großer verbleibender Wahrscheinlichkeitsbereiche eine Risikovermeidungs- und Vorsorgestrategie verfolgen. Ein Unterschätzen der Risiken ist dabei ebenso zu vermeiden wie „Weltuntergangsstimmung“ („*doomism*“). Wenn **Entscheidungen im Kontext von Unsicherheiten** getroffen werden müssen, wie dies bei Kipprisiken der Fall ist, können Prozesse nützlich sein, die kontinuierliches Monitoring, Bewertung und Lernprozesse ermöglichen. (OECD, 2022).

Ansätze sollten möglichst Klimaschutz, Klimaanpassung und eine nachhaltige, klimaresiliente Entwicklung verbinden, um mit den Risiken von Kipppunkten umzugehen.

### 3.2.1 Kipprisiken im Kontext der Paris-Ziele

Das **Übereinkommen von Paris** sieht vor, dass „der Anstieg der durchschnittlichen Erdtemperatur deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau gehalten wird und Anstrengungen unternommen werden, um den Temperaturanstieg auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen“. Um dieses langfristige Temperaturziel zu erreichen, sollen Anstrengungen unternommen werden, „um in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts ein

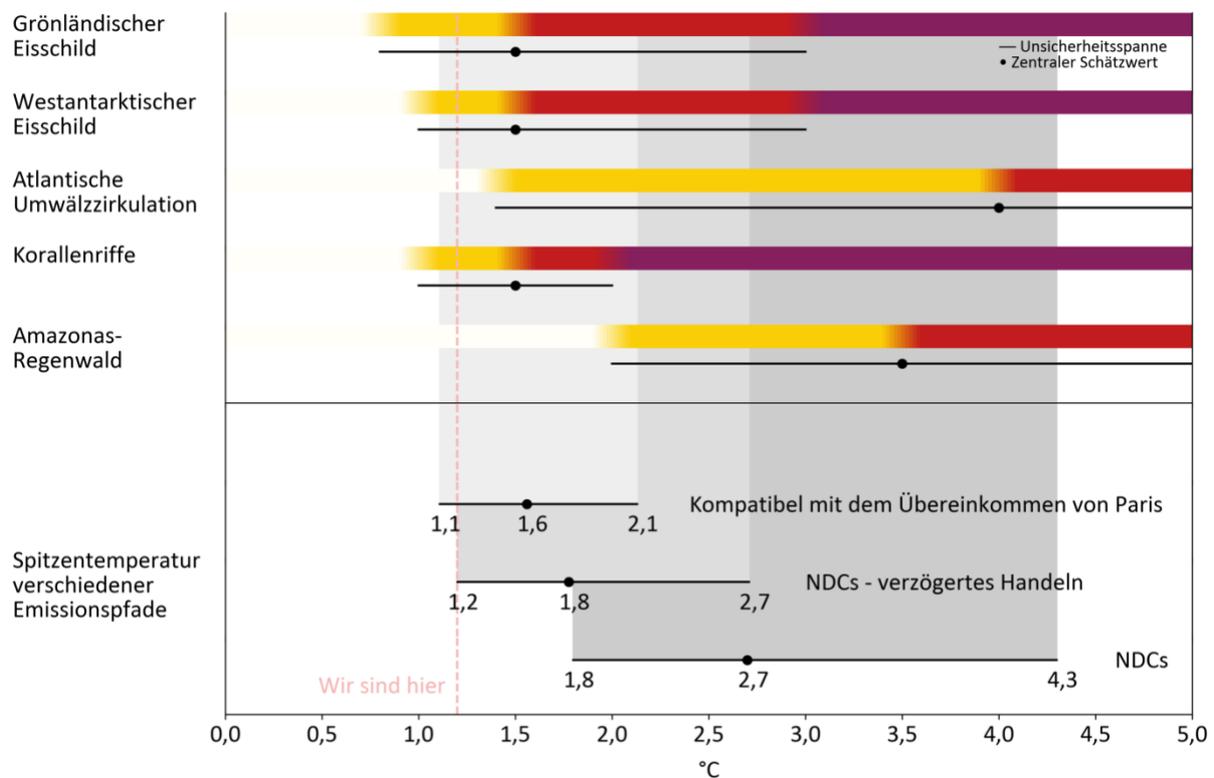
Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken [...] herzustellen“ (UNFCCC, 2015). Dies ist so zu verstehen, dass Netto-Null Emissionen von Treibhausgasen erreicht werden (Fuglestad *et al.*, 2018).

Auf dem Weg dahin müssten globale **Treibhausgasemissionen** bis zum Jahr 2025 ihren Höchstwert erreichen, bis 2030 etwa halbiert und bis 2035 um etwa 60% reduziert werden, wobei Netto-Null Emissionen von CO<sub>2</sub> allein bereits Mitte des Jahrhunderts erreicht werden müssten (IPCC, 2023).

Solch stringente Klimaschutzmaßnahmen würden die globale **Erwärmungsrate** von derzeit etwa 0,2 °C pro Jahrzehnt bereits in den 2030er Jahren halbieren und bis Mitte des Jahrhunderts anhalten oder umkehren (CONSTRAIN, 2022). Dabei spielt auch die starke und rasche Reduzierung anderer Treibhausgase als CO<sub>2</sub>, insbesondere kurzlebiger Gase wie Methan, eine wichtige Rolle. Wenn Netto-Null Treibhausgasemissionen erreicht und beibehalten werden, würde dies zu einem Rückgang der Temperatur führen. (IPCC, 2021b)

Bisherige klimapolitische Anstrengungen sind allerdings unzureichend, um die globale Erwärmung entsprechend des Übereinkommens von Paris zu begrenzen (UNFCCC, 2023). Wenn wir den derzeitigen **nationalen Klimabeiträgen** (*Nationally determined contributions*, NDCs) bis 2030 folgen — selbst, wenn sie nach 2030 erheblich ambitionierter gestaltet würden — könnte dies zu einer Erwärmung führen, bei der das Überschreiten von Kipppunkten nicht nur ein Risiko, sondern das wahrscheinlichste Ergebnis darstellt. Wenn man Kipppunkte mit Emissionspfaden in Kontext setzt, unterstreicht dies die Bedeutung eines **vorsorglichen Ansatzes** mit strengen kurzfristigen Minderungsmaßnahmen bis zum Jahr 2030, ausgerichtet auf 1,5 °C, im Sinne des „**Präventionsprinzips**“. Denn die Risiken eines verspäteten Handelns sind ungleich höher: Bei optimistischen Annahmen bezüglich konsequentem Klimaschutz nach 2030 könnte die Erwärmung zwar im Mittel auf 1,8 °C begrenzt werden. Aufgrund von bestehenden Unsicherheiten, wie genau das Klimasystem auf Emissionen reagiert, kann aber unter einem solchen Emissionsszenario auch eine Erwärmung um bis zu 2,7°C nicht ausgeschlossen werden (Abbildung 4) (Kloenne *et al.*, 2023).

Nur eine Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C im Rahmen des Übereinkommens von Paris kann also die Risiken eines Überschreitens von Kipppunkten minimieren.

**Abbildung 4: Gemeinsame Unsicherheiten von möglichen Kipppunkten und der globalen Erwärmung als Resultat von verschiedenen Emissionspfaden**

Kipppunkte der fünf Hochrisiko-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: Begrenzung der Erwärmung auf 1,5 °C (>50 %) ohne oder mit begrenztem *Overshoot* und Netto-Null-Emissionen (C1a), wobei nur eine Untergruppe von Pfaden verwendet wird, die die Erwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % auch auf 2 °C begrenzen; NDCs bis 2030 mit verzögerten Maßnahmen zur Begrenzung der Erwärmung auf 2 °C (>67 %) (C3b); Begrenzung der Erwärmung auf 3 °C (>50 %), entsprechend der Umsetzung der NDCs aus dem Jahr 2020, mit einigen weiteren Minderungs-Maßnahmen (C6) (Daten von Byers *et al.*, 2022).

Quelle: Eigene Darstellung, Climate Analytics, nach Kloenne, *et al.*, 2023

### 3.2.2 Atmosphärische CO<sub>2</sub>-Entnahme und langfristige Kipprisiken

Eine Vielzahl von Maßnahmen ist erforderlich, um die globale Erwärmung auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen und Kipprisiken auch über das Jahr 2100 hinaus zu minimieren. Der Einsatz von **atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Entnahme** ist dabei unvermeidbar, geht jedoch auch mit Bedenken bezüglich ihrer Machbarkeit und Nachhaltigkeit einher (IPCC, 2022b). Diese sollen hier nicht im Detail diskutiert werden, sondern es wird auf andere Materialien des Umweltbundesamtes in diesem Kontext verwiesen (Purr, Spindler *et al.*, 2023).

Es gilt jedoch hervorzuheben, dass nach den Erkenntnissen des IPCC das Erreichen von globalen Netto-Null CO<sub>2</sub>-Emissionen nur mit Hilfe einer gewissen Menge von CO<sub>2</sub>-Entnahme möglich ist (IPCC, 2022b). Das ist umso mehr der Fall, wenn Netto-Null Treibhausgasemissionen gemäß Artikel 4 des Übereinkommens von Paris angestrebt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sehr große Unterschiede zwischen den Annahmen zur CO<sub>2</sub>-Entnahme in verschiedenen Szenarien existieren, und durch stringente Emissionsreduktionen die Bedarfe dafür deutlich reduziert werden können (Schleussner *et al.*, 2022).

Auf lange Sicht (über 2100 hinaus) erscheint aber eine Absenkung der Temperatur mit Hilfe von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechniken unerlässlich, um die Risiken von Kipppunkten zu reduzieren (Möller *et al.*, 2023). Dabei ist es dann umso entscheidender, dass vorhandene Entnahmekapazitäten nicht zur Kompensation von Restemissionen aufgebraucht werden, sondern tatsächlich zu einer Abkühlung beitragen können.

Da bereits ein *Overshoot* zum Überschreiten von Kipppunkten führen könnte, kann nicht davon ausgegangen werden, dass verzögerte Emissionsreduktionen zu einem späteren Zeitpunkt durch negative Emissionen kompensiert werden können (OECD, 2022).

### 3.2.3 Das Schließen der Emissionslücke

Die „**Emissionslücke**“, die zwischen den Emissionen der NDCs und den Emissionen eines 1,5 °C-kompatiblen Pfades besteht, könnte mit verfügbaren Minderungsmaßnahmen in jedem Wirtschaftssektor – wie Energie, Landwirtschaft oder dem Verkehr – geschlossen werden (IPCC, 2022b).

Um die Klimaziele zu erreichen, müssen die NDCs dringend nachgebessert werden. Eine zentrale Rolle spielt hierfür der Prozess der „Globalen Bestandsaufnahme“ („*Global Stocktake*“) der Klimarahmenkonvention, der alle fünf Jahre stattfindet. Dieser hat im Jahr 2023 zum ersten Mal den kollektiven Fortschritt überprüft und Handlungswege aufgezeigt, um Klimaschutzbemühungen zu stärken (UNFCCC, 2023).

Für den erforderlichen Wandel ist eine **beschleunigte internationale finanzielle Zusammenarbeit** ein entscheidender Faktor. Allerdings ist der Investitionsbedarf bis 2030, um die Erwärmung auf 1,5 °C oder 2 °C zu begrenzen, drei- bis sechs-mal höher, als das derzeitige Niveau (IPCC, 2022b).

### 3.2.4 Grenzen der Anpassung

Trotz der Fortschritte in der Anpassungsplanung und -umsetzung sind diese oft auf die unmittelbare Verringerung von Klimarisiken ausgerichtet und ungleichmäßig verteilt, mit Anpassungslücken, die teilweise auf unzureichende Finanzmittel für Anpassungsmaßnahmen zurückzuführen sind. Bereits bei dem derzeitigen Niveau der globalen Erwärmung sind manche **Grenzen der Anpassungsfähigkeit** für Mensch und Ökosysteme bereits erreicht. Zu den Ökosystemen, die sich bereits nicht mehr anpassen können, zählen manche **Korallenriffe, Regenwälder, und polare Ökosysteme**. Mit zunehmender globaler Erwärmung kommen weitere Systeme an ihre Grenzen. So stellt eine begrenzte Wasserverfügbarkeit ab einer Erwärmung von mehr als 1,5 °C für Regionen, die von Gletschern und Schneeschmelze abhängig sind, eine Grenze dar, ab der sich diese Regionen nicht mehr anpassen können (IPCC, 2022a). Ein Meeresspiegelanstieg infolge eines Überschreitens von Kipppunkten in der Kryosphäre, der zahlreiche kleine Inselstaaten unbewohnbar machen würde, stellt eine Grenze dar, ab der eine Anpassung unmöglich ist. Zudem können nach dem Überschreiten eines Kipppunktes schwerwiegende Auswirkungen innerhalb kurzer Zeit auftreten – zu schnell für wirksame reaktive Anpassungsmaßnahmen, sodass Gesellschaften an ihre Grenzen kommen, um Lösungen zur Anpassung an diese Auswirkungen zu erkennen, zu entwickeln und umzusetzen. Im Allgemeinen trägt die Berücksichtigung von Kipprisiken zu bestehenden Unsicherheiten bei der Anpassungsplanung bei (OECD, 2022).

Die Risiken von Kippdynamiken erhöhen die Notwendigkeit von **vorausschauenden und transformativen Anpassungsmaßnahmen** (OECD, 2022). Unter transformativer Anpassung wird eine Anpassung verstanden, die die grundlegenden Eigenschaften eines sozial-ökologischen Systems in Erwartung des Klimawandels und seiner Folgen verändert. Dazu

können technologische Antworten und Verhaltensänderungen ebenso zählen wie grundsätzliche Änderungen in Institutionen oder verstärkte internationale Zusammenarbeit. Naturbasierte Lösungen können hier auch eine Rolle spielen, wobei zu beachten ist, dass deren Wirksamkeit mit zunehmender Erwärmung abnimmt (IPCC, 2022a). Auch Rückzug und Umsiedlung von Siedlungsräumen und Infrastruktur und langfristige Raumplanung kann erwogen werden (OECD, 2022). Dabei ist zu beachten, dass Rückzug und Migration nicht notwendigerweise als Anpassung betrachtet werden können (IPCC, 2022a).

Für die Anpassungsplanung und Entscheidungsfindung im Kontext von Unsicherheiten, wie dies bei Kipprisiken der Fall ist, kann auch die Verwendung von verschiedenen „Narrativen“ für ein besseres Verständnis von künftigen Risiken zum Einsatz kommen (OECD, 2022).

Schließlich spielen für eine erfolgreiche Anpassung und eine Überwindung einiger Grenzen der Anpassung **finanzielle, institutionelle und politische Ressourcen und Faktoren** eine wesentliche Rolle (OECD, 2022; IPCC, 2022a). So etwa ist der Finanzbedarf für die Anpassung 10–18-mal so hoch wie die derzeitigen internationalen öffentlichen Finanzströme (UNEP, 2023).

Anpassung verhindert jedoch nicht alle **Verluste und Schäden**, auch bei wirksamer Anpassung und vor dem Erreichen von Anpassungsgrenzen (IPCC, 2022a).

### 3.2.5 Kipprisiken und Klimaschäden und Verluste

Stringenter Klimaschutz im Rahmen des Übereinkommens von Paris, der die Risiken für das Eintreten von Kippdynamiken minimiert, ist das zentrale Mittel, um die Chancen für die Anpassung an Klimafolgen zu erhöhen und Verluste und Schäden zu reduzieren.

Ein mögliches Überschreiten von Kipppunkten muss beim **Umgang mit Klimarisiken** berücksichtigt werden. Allerdings bestehen Unsicherheiten bezüglich des Verständnisses der Risiken aufgrund von Unsicherheiten bezüglich der bestimmenden Faktoren von Risiken: der Klimagefahren von Kipppunkten selbst sowie der Verwundbarkeit und Exposition der betroffenen Gesellschaften und Ökosysteme (Begum *et al.*, 2022; OECD, 2022). So lebt fast die Hälfte der Weltbevölkerung, 3,3 bis 3,6 Milliarden Menschen, unter Bedingungen, die sehr verwundbar gegenüber dem Klimawandel sind (IPCC, 2022a). Kippdynamiken würden dies verschärfen (OECD, 2022).

Da etwa der **Meeresspiegelanstieg** durch das Abschmelzen der Eisschilde schwerwiegende Konsequenzen besonders für Küstengebiete und kleine Inselstaaten hat, sollten dortige Akteure mit geringer Risikotoleranz, die etwa Küstenschutz oder kritische Infrastruktur planen, gegebenenfalls auch die weniger wahrscheinlichen, aber dennoch möglichen höheren Schätzungen für künftigen Meeresspiegelanstieg in Betracht ziehen. Die größte Unsicherheit in Hinblick auf solch hohen Meeresspiegelanstieg betrifft weniger, ob, sondern wann dies eintritt — also ob bereits in diesem Jahrhundert oder erst in hunderten oder tausenden von Jahren, was vor allem von dem Grad der Erwärmung und dem Zeitraum, in dem diese stattfindet, abhängt. (IPCC, 2022a; Fox-Kemper *et al.*, 2021) Bei besonders langsam reagierenden Systemen wie Eisschilden kann es Jahrhunderte oder gar Jahrtausende dauern, bis die gesamten Folgen, inklusive möglicherweise mehreren Metern an Meeresspiegelanstieg, realisiert sind. Diese unter Umständen sehr langen **Zeitskalen müssen auch im politischen Diskurs berücksichtigt werden.**

Um das Verständnis von Kippdynamiken sowie den Umgang mit deren Risiken zu verbessern, sind technologische Entwicklung und Innovation, wie etwa das Monitoring und die Modellierung von Kippelementen entscheidend. Insbesondere die dringlichsten Kippelemente sollten genau überwacht werden (OECD, 2022). Es gibt zahlreiche Ansätze, wie etwa das Erforschen und Erkennen möglicher „**Frühwarnsignale**“ herannahender Kipppunkte (Dakos *et al.*, 2023). So

etwa kommt für die frühzeitige Warnung vor einem möglicherweise beschleunigten Meeresspiegelanstieg ein Monitoring des Thwaites-Gletschers der Westantarktis in Frage (Fox-Kemper *et al.*, 2021).

Bereits heute hat der Klimawandel zu weitreichenden Verlusten und Schäden für Mensch und Natur geführt, wobei die verwundbarsten Menschen und Systeme unverhältnismäßig stark betroffen sind. Mit jedem Zuwachs der globalen Erwärmung steigen Verluste und Schäden weiter an und treffen dabei die ärmsten verwundbaren Bevölkerungsgruppen besonders stark. Eine mögliche Überschreitung von Kipppunkten wäre gegebenenfalls mit unumkehrbaren Schäden verbunden. Eine Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C würde künftige Verluste und Schäden erheblich reduzieren aber nicht ganz verhindern. (IPCC, 2022a)

Auch auf internationaler politischer Ebene wird anerkannt, dass ein besseres Verständnis von Kipppunkten und (un)umkehrbaren Veränderungen notwendig ist, besonders im Kontext von Verlusten und Schäden (UNFCCC, 2023).

Es bestehen große Unsicherheiten bezüglich der **Kosten eines Überschreitens von Kipppunkten**. Diese werden erst seit den letzten Jahren in Analysen der Kosten des Klimawandels berücksichtigt und werden vermutlich unterschätzt (OECD, 2022). Die wirtschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels, gemessen an den „gesellschaftlichen Kosten von Kohlendioxid“, könnten durch Kipppunkte um 25% steigen oder sich sogar mehr als verdoppeln (Dietz *et al.*, 2021).

Tiefgreifende, rasche und langfristige Minderungsmaßnahmen und eine beschleunigte Umsetzung von transformativen Anpassungsmaßnahmen in diesem Jahrzehnt, die Kipprisiken minimieren würden, würden **wirtschaftliche und soziale Vorteile** mit sich bringen, die die kurzfristigen Herausforderungen und nötigen Investitionen übersteigen würden (IPCC, 2023; OECD, 2022).

**Unsicherheiten und Forschungsbedarfe** in Hinblick auf Kippdynamiken, besonders für vulnerable Regionen, bergen die Möglichkeit größerer Klimarisiken und sollten daher die Notwendigkeit frühzeitiger, ehrgeiziger und wirksamer Klimamaßnahmen verstärken, statt sie zu schwächen (OECD, 2022).

Selbst bei den Elementen, die sich nicht als Kippelemente herausstellen, wie dem arktischen Sommer-Meereis, sind die Auswirkungen des Verlusts dennoch gravierend und vielfältig. Ansätze die versuchen mit diesen Verlusten und Risiken umzugehen, sind ähnlich wie die hier besprochenen Ansätze zum Umgang mit Kipppunkten (OECD, 2022).

Da Kipppunkte nicht immer nur vom Niveau der globalen Erwärmung abhängen, sondern auch von anderen klimatischen Faktoren oder Störungen durch den Menschen, wie hydrologische Veränderungen oder Landnutzung, können zusätzlich zu Klimamaßnahmen auch andere entsprechende Maßnahmen, wie eine Eindämmung der Entwaldung, die Risiken eines Überschreitens von Kipppunkten minimieren (OECD, 2022).

### 3.2.6 Kontrovers diskutierte Ansätze: *Solar Radiation Modification*

Als Konsequenz des Risikos des möglichen Überschreitens von Kipppunkten wird in der Diskussion zunehmend die Option einer direkten menschlichen Beeinflussung der Sonneneinstrahlung (*Solar Radiation Modification*, SRM) aufgebracht. Das ist ein gefährlicher Trugschluss.

Diese technologische Scheinlösung lenkt von der notwendigen Minderung von Treibhausgasemissionen ab, um die globale Erwärmung gemäß dem Übereinkommen von Paris zu begrenzen. Es existieren weder direkt einsetzbare Technologien, noch Rahmenordnungen, wie mit dem Einsatz von SRM umgegangen werden könnte (Lee *et al.*, 2021). Da die Auswirkungen von SRM global wären, müsste der Einsatz auch unter Kriterien globaler Kooperation, Inklusivität und Fairness kontrolliert werden, was Expertinnen und Experten zufolge unmöglich wäre (Biermann *et al.*, 2022). Zudem steht SRM im direkten Konflikt mit dem übergeordneten Ziel der UN-Klimarahmenkonvention, die Treibhausgaskonzentrationen auf einem Niveau zu stabilisieren, bei dem eine gefährliche, vom Menschen verursachte Störung des Klimasystems verhindert wird (UNFCCC, 1992) — da SRM selbst einen gefährlichen Eingriff in das Klimasystem darstellt — und keine Garantie für die Vermeidung von Klimarisiken bietet. Verschiedene SRM-Techniken würden zu Änderungen von atmosphärischen Zirkulationen, Monsunzyklen, Ökosystemproduktivität und Wasserzyklen führen und somit keine Abminderung von Kipprisiken garantieren (Patt *et al.*, 2022). Korallenriffe wären weiterhin den Folgen der Ozeanversauerung ausgesetzt, da SRM keine Minderung von CO<sub>2</sub>-Konzentrationen erwirkt. Übersäuerung führt zu reduziertem Wachstum und Überlebensfähigkeit von Meeresorganismen mit Kalziumkarbonat-Skeletten, wie Korallen. Dadurch ausgelöste Erosion und Auflösung von Korallenriffen und verminderte Korallenansiedlung stellt ein hohes Risiko für Bevölkerungsgruppen dar, die von Korallenriffen abhängig sind, etwa durch Tourismus, Küstenentwicklung und Fischfang (Cooley *et al.*, 2022).

Auch könnte SRM, bei gleichzeitigen hohen Emissionen, den Niedergang des Westantarktischen Eisschildes zwar verlangsamen aber nicht verhindern (Sutter *et al.*, 2023).

### 3.3 Kipprisiken, Migration und Konflikte

Aufgrund der Risiken eines Überschreitens von Kipppunkten sind eine Vielzahl von möglichen Auswirkungen auf Gesellschaften zu beachten. Dabei sollten das Verständnis und mögliche Verbindungen etwa zwischen Klimawandel inklusive Kipppunkten, Sicherheit, Migration und Konflikten differenziert diskutiert werden.

Es ist allgemein anerkannt, dass Klimawandel oder Umweltveränderungen im Allgemeinen vielschichtige Risiken für Sicherheit, internationalen Frieden und Entwicklung verursachen können (Zingg, 2021; European Commission, 2023). Länder, die am vulnerabelsten sind, sind dabei oft auch insbesondere politisch instabil (Black *et al.*, 2022). Der Klimawandel wird meist als „Multiplikator von Gefahren“ angesehen: Obwohl der Klimawandel nicht direkt oder zwangsläufig gewaltsame Konflikte verursacht, kann er durch das Zusammenspiel mit anderen sozialen, politischen und wirtschaftlichen Faktoren die Treiber von Konflikt und Fragilität verschärfen und negative Auswirkungen auf Frieden, Stabilität und Sicherheit haben (Zingg, 2021). Dabei kann sich der Konfliktbegriff auf den Wettstreit um Ressourcen sowie damit einhergehende Spannungen und gewaltvolle Ausschreitungen beziehen (Flavell *et al.*, 2020).

Die Zusammenhänge zwischen klimatischen Faktoren und gewaltsamen Konflikten sind also komplex und kontextabhängig (Dahm *et al.*, 2023). Das Risiko künftiger gewaltsamer Konflikte wird stark von sozio-ökonomischen Entwicklungspfaden beeinflusst, wobei Entwicklungspfade, die wirtschaftliches Wachstum, politische Rechte und Nachhaltigkeit in den Vordergrund stellen, mit einem geringeren Konfliktrisiko einhergehen (Cissé *et al.*, 2022). Es wird allerdings angenommen, dass bei einer langfristig hohen globalen Erwärmung die Auswirkungen von Wetter- und Klimaextremen, insbesondere von Dürren, die Verwundbarkeit von gesellschaftlichen Gruppen erhöhen und so gewaltsame innerstaatliche Konflikte negativ beeinflussen (IPCC, 2022a).

Es gibt Fortschritte beim Verständnis des Zusammenhangs zwischen Migration, Umwelt und Klimawandel, einschließlich der Rolle, die verschiedene Formen der Migration (in so unterschiedlicher Form wie individuelle Migration, Vertreibung oder auch geplante Umsiedlung) bei der Bewältigung von und Anpassung an Umweltveränderungen, einschließlich des Klimawandels, spielen. Dabei sind Migration, Umwelt- und Klimawandel in vielfältiger Weise miteinander verknüpft, und der Zusammenhang zwischen ihnen ist oft sehr kontextspezifisch (Wright *et al.* 2021). Im Allgemeinen wird angenommen, dass sich der Klimawandel auf die Migration von Menschen auswirkt (Cissé *et al.* 2022). Bereits heute führen Klima- und Wetterextreme zunehmend zu Vertreibung, wobei kleine Inselstaaten unverhältnismäßig stark betroffen sind (IPCC, 2022a). Bereits heute werden weltweit mehr Menschen durch Naturkatastrophen als durch Konflikte zumindest temporär vertrieben, insbesondere in Süd- und Ostasien (IDMC, 2023).

Künftige klimabedingte Migration und Vertreibung werden je nach Region und im Laufe der Zeit in Abhängigkeit von klimatischen Faktoren, der Anpassungsfähigkeit der betroffenen Bevölkerung, dem Bevölkerungswachstum in den Gebieten, die den Klimarisiken am stärksten ausgesetzt sind, sowie vermittelnden Faktoren wie der internationalen Entwicklungs- und Migrationspolitik unterschiedlich ausfallen (Cissé *et al.*, 2022). Künftige Migration und Vertreibung werden in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen stark durch sozio-ökonomische Entwicklungspfade beeinflusst: Umweltbedingte Einflüsse auf Migration werden wahrscheinlich am stärksten in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen in Lateinamerika und der Karibik, in Afrika südlich der Sahara, im Nahen Osten und im größten Teil des asiatischen Kontinents sein. Bei höheren sozio-ökonomischen Entwicklungsniveaus steigt die Anpassungsfähigkeit von Haushalten und Institutionen und die klimatischen Einflüsse auf Migration nehmen dementsprechend ab (Cissé *et al.*, 2022). Wenn Migration freiwillig, sicher und geordnet erfolgt, kann dies Risiken durch sowohl klimatische als auch nicht-klimatische Einflüsse verringern (IPCC, 2022a). Gleichzeitig gilt, dass immobile gesellschaftliche Gruppen, zum Beispiel aus Mangel an Ressourcen, oft besonders hohe Vulnerabilität gegenüber Klimarisiken aufweisen.

Für die nächsten Jahrzehnte wird angenommen, dass sowohl gewaltsame Konflikte als auch Migrationsmuster eher von sozioökonomischen Bedingungen als direkt von Klimafolgen beeinflusst werden (IPCC, 2022a), wobei dabei aber natürlich indirekte Klimafolgen, zB. für die ökonomische Entwicklung, beachtet werden müssen.

Ein Überschreiten von Kipppunkten könnte Einfluss auf Konflikte und Migrationsbewegungen haben. Wenn das Überschreiten von Kipppunkten große Migrationsbewegungen auslösen und gleichzeitig Zielorte betreffen würden, wären daraus resultierende Konfliktsituationen nicht auszuschließen (Flavell *et al.*, 2020).

Das Überschreiten von Kipppunkten könnte etwa Wasserressourcen, Ernährungssicherheit, Meeresspiegelanstieg sowie Infrastruktur und andere grundlegende Ressourcen betreffen:

- ▶ Sowohl das Schmelzen der Gletscher außerhalb der Polargebiete, als auch eine Änderung des indischen Monsunregimes in Folge von Kippkaskaden hätten beispielsweise Einfluss auf den gesamten indischen Subkontinent.
- ▶ Ein weitgehender Verlust des Amazonas-Regenwaldes hätte schwerwiegend Konsequenzen für den globalen Kohlenstoffkreislauf, aber ebenso insbesondere für das Klima Südamerikas hin zu einem trockeneren Klima. Das Risiko von **Dürren** und **für die Wasserverfügbarkeit** würde deutlich zunehmen.

- ▶ Der Verlust von Systemen mit einzigartigem Artenreichtum wie des Amazonas-Regenwalds und tropischer Korallenriffe würde eine **Biodiversitätskatastrophe** bedeuten. Der damit einhergehende Verlust der Ökosystemdienstleistungen würde Menschen weltweit betreffen.
- ▶ Ein Kollaps der Atlantischen Umwälzzirkulation und die damit einhergehenden klimatischen Veränderungen hätten Auswirkungen auf das nordamerikanische, europäische und vorderasiatische Klima und darüber hinaus auf die **Landwirtschaft** und die weltweite **Ernährungssicherheit**, da mehrere der weltweit bedeutendsten landwirtschaftlichen Regionen betroffen wären sowie der Einfluss auf die Wachstumsfähigkeit der drei Grundnahrungsmittel Weizen, Mais und Reis beträchtlich wäre (OECD, 2022).
- ▶ Ein Überschreiten von Kipppunkten in der Kryosphäre, insbesondere im Zusammenhang mit dem Anstieg des Meeresspiegels, würde zu einem weiteren Anstieg der potenziell von Vertreibung bedrohten Weltbevölkerung führen (Cissé *et al.*, 2022). Mittel- bis langfristig würde es mit der Intensivierung von **Starkniederschlägen** und den damit verbundenen **Überschwemmungen, tropischen Wirbelstürmen, Dürren** und zunehmend auch dem **Meeresspiegelanstieg** zu mehr Vertreibung von Menschen kommen (IPCC, 2022a). Insbesondere ein Meeresspiegelanstieg von mehreren Metern als Folge eines Überschreitens von Eisschildkipppunkten würde die globalen Küstenlinien fundamental verändern und hätte gravierende Konsequenzen für Küstengebiete weltweit und die Bewohnbarkeit.
- ▶ **Marine Konflikte** nehmen aufgrund der dortigen steigenden wirtschaftlichen Aktivitäten, der weltweit steigenden Nachfrage nach marinen Ressourcen und des Klimawandels zu. Konflikte können auch die nachhaltige Nutzung und das Management der Meere beeinträchtigen, indem sie Ungerechtigkeiten weiterführen, die Umwelt durch Mehrfachnutzung unter Druck setzen oder Klimaschutzbemühungen stören. Die Lösung dieser Konflikte erfordert ein Verständnis der Faktoren, durch die sie entstehen und fortbestehen. Beispielsweise gab es im Südchinesischen Meer, in dem sich mehr als die Hälfte aller weltweiten Fischereifahrzeuge aufhalten, in den letzten Jahrzehnten zunehmend konkurrierende Gebietsansprüche, da die Länder der Region Hoheitsrechte über Inseln, natürliche Ressourcen und Fischgründe anstreben und anfechten (Boonstra *et al.*, 2023).
- ▶ Das Überschreiten einiger ozeanischer Kipppunkte würde sich auf die Meeresumwelt auswirken. So leben in 117 Ländern mit **Korallenriffen** insgesamt fast eine Milliarde Menschen im Umkreis von 100 Kilometern eines Korallenriffs. In kleinen Inselstaaten lebt sogar fast die gesamte Bevölkerung in der Nähe zu Korallenriffen (Sing Wong *et al.*, 2022). Der Tourismus, die Küstenentwicklung und der kommerzielle Fischfang profitieren von Korallenriffen und leisten somit etwa im mittelamerikanischen Riff und dem „Korallendreieck“ von Indonesien, Philippinen, Malaysia, Papua-Neuguinea, Salomonen, und Timor-Leste erhebliche wirtschaftliche Erträge (UN Environment *et al.*, 2018).
- ▶ Die Ausdehnung des arktischen Meereises bestimmt den Zugang zu **Schiffahrtsrouten** sowie den möglichen Umfang von **Exploration und Förderung von Öl und Gas im arktischen Ozean**. Die Exploration der Arktis nimmt mit zunehmendem Verlust des Meereises zu. Dies geschieht auch ohne Kippdynamiken, weswegen bereits Bedenken über damit verbundene geopolitische Spannungen und Klima-Konflikte aufgeworfen wurden (OECD, 2022).

### 3.4 Politische Handlungsforen und -strategien

Aufgrund der Verschiedenheit der einzelnen Kippelemente, ihrer Verbindungen und Kaskaden, sowie möglicher weitreichender Konsequenzen eines Überschreitens von Kippunkten, ist eine Auseinandersetzung mit diesen Themen über reine Klima- oder selbst Umweltforen hinaus erforderlich. Da das Überschreiten von Kippunkten Konsequenzen hätte, die auch sicherheitspolitisch relevant sein könnten, gilt es, diese Risiken auch in anderen Gremien und Bündnissen weiter zu adressieren oder neu aufzunehmen. Dazu zählen <sup>3</sup>:

- ▶ UN-Umweltkonventionen:
  - Klimarahmenkonvention (*United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC*), für die Gestaltung einer wirksamen Klimapolitik für den Umgang mit Risiken von Kippunkten
  - Übereinkommen über die biologische Vielfalt (*Convention on Biological Diversity, CBD*), da etwa polare Ökosysteme auf dem Land und im Ozean aufgrund von Eisverlust und möglichen Kippdynamiken gefährdet sind
  - Übereinkommen zur Bekämpfung der Wüstenbildung (*United Nations Convention to Combat Desertification, UNCCD*) aufgrund von möglichen weltweiten veränderten klimatischen Bedingungen
- ▶ UN-Umweltprogramm (*United Nations Environment Programme, UNEP*) und *United Nations Development Programme (UNDP)*
- ▶ Büro der Vereinten Nationen für Katastrophenvorsorge (*United Nations Office for Disaster Risk Reduction, UNDRR*)
- ▶ Welternährungsorganisation (*Food and Agriculture Organisation, FAO*), etwa aufgrund der Auswirkungen eines Kollapses der Atlantischen Umwälzzirkulation oder des arktischen Meereises auf die Landwirtschaft bzw. den Fischfang und somit die Ernährungssicherheit weltweit (OECD, 2022)
- ▶ Weltklimarat (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*), um eine politikrelevante Aufbereitung der wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Thema Kippunkte zu stärken
- ▶ Weltorganisation für Meteorologie (*World Meteorological Organization, WMO*), etwa im Rahmen der Initiative „*Early Warnings for All*“, die Frühwarnsysteme zum Ziel hat
- ▶ Foren für Migration zum Umgang mit möglichen Folgen für die Migration etwa eines Überschreitens von Kippunkten in der Kryosphäre und daraus folgendem Meeresspiegelanstieg
- ▶ UN-Generalversammlung und UN-Sicherheitsrat und deren „*Group of Friends on Climate and Security*“, sowie der „*Climate Security Mechanism*“ (CSM)
- ▶ Münchner Sicherheitskonferenz als weltweites Forum zu internationalen Sicherheitsrisiken

<sup>3</sup> Für einen Überblick über Handlungsforen zur generellen Befassung mit globalen Klimafolgen und Sicherheitspolitik siehe u. a. Dröge (2020): Die Folgen des Klimawandels als sicherheitspolitische Herausforderung, Dröge (2020): Umgang mit den Risiken des Klimawandels: Welche Rolle für den VN-Sicherheitsrat?, SWP (2011): Klimawandel und Sicherheit - Herausforderungen, Reaktionen und Handlungsmöglichkeiten.

- ▶ Sicherheitspolitische Bündnisse, wie das Verteidigungsbündnis NATO (*North Atlantic Treaty Organization*) inklusive des neuen „*Climate Change and Security Centre of Excellence*“
- ▶ G7 und G20

## 4 Quellenverzeichnis

- Abbott, B. W., Brown, M., Carey, J. C., Ernakovich, J., Frederick, J. M., Guo, L., Hugelius, G., Lee, R. M., Loranty, M. M., Macdonald, R., Mann, P. J., Natali, S. M., Olefeldt, D., Pearson, P., Rec, A., Robards, M., Salmon, V. G., Sayedi, S. S., Schädel, C., ... Zolkos, S. (2022). We Must Stop Fossil Fuel Emissions to Protect Permafrost Ecosystems. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.889428>
- Angenendt, S., Dröge, S., Richert, J. (2011). Klimawandel und Sicherheit: Herausforderungen, Reaktionen und Handlungsmöglichkeiten. Berlin: SWP Stiftung Wissenschaft und Politik. Klimawandel und Sicherheit - Stiftung Wissenschaft und Politik ([swp-berlin.org](http://swp-berlin.org)). Download unter: <https://www.swp-berlin.org/publikation/klimawandel-und-sicherheit/>
- Armstrong McKay, D. I., Staal, A., Abrams, J. F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., Fetzer, I., Cornell, S. E., Rockström, J., & Lenton, T. M. (2022). Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377(6611). <https://doi.org/10.1126/science.abn7950>
- Bathiany, S., Notz, D., Mauritsen, T., Ruedel, G., & Brovkin, V. (2016). On the Potential for Abrupt Arctic Winter Sea Ice Loss. *Journal of Climate*, 29(7), 2703–2719. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0466.1>
- Baum, J. K., Claar, D. C., Tietjen, K. L., Magel, J. M. T., Maucieri, D. G., Cobb, K. M., & McDevitt-Irwin, J. M. (2023). Transformation of coral communities subjected to an unprecedented heatwave is modulated by local disturbance. *Science Advances*, 9(14). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abq5615>
- Begum, R. A., Lempert, R., Ali, E., & T.A. Benjaminsen, T. Bernauer, W. Cramer, X. Cui, K. Mach, G. Nagy, N.C. Stenseth, R. Sukumar, and P. Wester. (2022). Point of Departure and Key Concepts. In H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Hrsg.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 121–196). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.003>
- Biermann, F., Oomen, J., Gupta, A., Ali, S. H., Conca, K., Hajer, M. A., Kashwan, P., Kotzé, L. J., Leach, M., Messner, D., Okereke, C., Persson, Å., Potočník, J., Schlosberg, D., Scobie, M., & VanDeveer, S. D. (2022). Solar geoengineering: The case for an international non-use agreement. *WIREs Climate Change*, 13(3), e754. <https://doi.org/10.1002/wcc.754>
- Black, R., Busby, J., Dabelko, G. D., De Coning, C., Maalim, H., McAllister, C., Ndiloseh, M., Smith, D., Alvarado Cobar, J. F., Barnhoorn, A., Bell, N., Bell-Moran, D., Broek, E., Eberlein, A., Eklöv, K., Faller, J., Gadnert, A., Hegazi, F., Kim, K., ... Staudenmann, J. A. (2022). *Environment of Peace: Security in a New Era of Risk*. Stockholm International Peace Research Institute. <https://doi.org/10.55163/LCLS7037>
- Bochow, N., Poltronieri, A., Robinson, A., Montoya, M., Rypdal, M., & Boers, N. (2023). Overshooting the critical threshold for the Greenland ice sheet. *Nature*, 622(7983), 528–536. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06503-9>
- Boers, N., & Rypdal, M. (2021). Critical slowing down suggests that the western Greenland Ice Sheet is close to a tipping point. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(21). <https://doi.org/10.1073/pnas.2024192118>
- Boonstra, W. J., Dahlet, L., Eriksson, B., Selim, S. A., & Van Putten, E. I. (2023). Understanding and analysing the complex causality of conflicts over marine environments through process tracing. *Maritime Studies*, 22(2), 19. <https://doi.org/10.1007/s40152-023-00306-4>
- Boulton, C. A., Lenton, T. M., & Boers, N. (2022). Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. *Nature Climate Change*, 12(3), 271–278. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01287-8>

- Box, J. E., Wehrlé, A., Van As, D., Fausto, R. S., Kjeldsen, K. K., Dachauer, A., Ahlstrøm, A. P., & Picard, G. (2022). Greenland Ice Sheet Rainfall, Heat and Albedo Feedback Impacts From the Mid-August 2021 Atmospheric River. *Geophysical Research Letters*, 49(11). <https://doi.org/10.1029/2021GL097356>
- Byers, E., Volker Krey, Elmar Kriegler, & et al. (2022). *AR6 Scenarios Database hosted by IIASA*. International Institute for Applied Systems Analysis. <https://data.ece.iiasa.ac.at/ar6/>. Abgerufen am: 26.07.2023
- Caesar, L., McCarthy, G. D., Thornalley, D. J. R., Cahill, N., & Rahmstorf, S. (2021). Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience*, 14(3), 118–120. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00699-z>
- Cai, W., Santoso, A., Collins, M., Dewitte, B., Karamperidou, C., Kug, J.-S., Lengaigne, M., McPhaden, M. J., Stuecker, M. F., Taschetto, A. S., Timmermann, A., Wu, L., Yeh, S.-W., Wang, G., Ng, B., Jia, F., Yang, Y., Ying, J., Zheng, X.-T., ... Zhong, W. (2021). Changing El Niño–Southern Oscillation in a warming climate. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(9), 628–644. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00199-z>
- Casado, M., Hébert, R., Faranda, D., & Landais, A. (2023). The quandary of detecting the signature of climate change in Antarctica. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01791-5>
- CBD. (2022). *Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework*. Decision 15/4, U.N. Doc. CBD/COP/DEC/15/4.
- Cissé, G., McLeman, R., Adams, H., & P. Aldunce, K. Bowen, D. Campbell-Lendrum, S. Clayton, K.L. Ebi, J. Hess, C. Huang, Q. Liu, G. McGregor, J. Semenza, and M.C. Tirado. (2022). Health, Wellbeing, and the Changing Structure of Communities. In H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösckke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Hrsg.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 1041–1170). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.009>
- Constable, A. J., Harper, S., Dawson, J., Holsman, K., Mustonen, T., Piepenburg, D., & Rost, B. (2022). Cross-Chapter Paper 6: Polar Regions. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösckke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (Hrsg.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 2319–2368). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.023>
- CONSTRAIN. (2022). *ZERO IN ON The Critical Decade: Insights from the latest IPCC reports on the Paris Agreement, 1.5°C, and climate impacts*. The CONSTRAIN Project Annual Report 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7117315>
- Cooley, S., Schoeman, D., Bopp, L., Boyd, P., Donner, S., Ghebrehiwet, D. Y., Ito, S.-I., Kiessling, W., Martinetto, P., Ojea, E., Racault, M.-F., Rost, B., & Skern-Mauritzen, M. (2022). Ocean and Coastal Ecosystems and their Services. In H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösckke, V. Möller, A. Okem (Hrsg.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 379–550). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.005>
- Dahm, R., Meijer, K., Kuneman, E., & Van Schaik, L. (2023). What climate? The different meaning of climate indicators in violent conflict studies. *Climatic Change*, 176(11), 145. <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03617-x>
- Dakos, V., Boulton, C. A., Buxton, J. E., Abrams, J. F., Armstrong McKay, D. I., Bathiany, S., Blaschke, L., Boers, N., Dylewsky, D., López-Martínez, C., Parry, I., Ritchie, P., Van Der Bolt, B., Van Der Laan, L., Weinans, E., & Kéfi, S. (2023). *Tipping Point Detection and Early-Warnings in climate, ecological, and human systems* [Preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1773>

- DeConto, R. M., Pollard, D., Alley, R. B., Velicogna, I., Gasson, E., Gomez, N., Sadai, S., Condrón, A., Gilford, D. M., Ashe, E. L., Kopp, R. E., Li, D., & Dutton, A. (2021). The Paris Climate Agreement and future sea-level rise from Antarctica. *Nature*, *593*(7857), 83–89. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03427-0>
- Deltares. (2023). *Dynamic Adaptive Policy Pathways*. <https://www.deltares.nl/en/expertise/areas-of-expertise/sea-level-rise/dynamic-adaptive-policy-pathways>. Abgerufen am: 06.11.2023
- Diebold, F. X., Rudebusch, G. D., Göbel, M., Goulet Coulombe, P., & Zhang, B. (2023). When will Arctic sea ice disappear? Projections of area, extent, thickness, and volume. *Journal of Econometrics*, *236*(2), 105479. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2023.105479>
- Dietz, S., Rising, J., Stoerk, T., & Wagner, G. (2021). Economic impacts of tipping points in the climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *118*(34). <https://doi.org/10.1073/pnas.2103081118>
- Donovan, M. K., Burkepile, D. E., Kratochwill, C., Shlesinger, T., Sully, S., Oliver, T. A., Hodgson, G., Freiwald, J., & Van Woesik, R. (2021). Local conditions magnify coral loss after marine heatwaves. *Science*, *372*(6545), 977–980. <https://doi.org/10.1126/science.abd9464>
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., & R.P. Allan, P.A. Arias, M. Barlow, R. Cerezo-Mota, A. Cherchi, T.Y. Gan, J. Gergis, D. Jiang, A. Khan, W. Pokam Mba, D. Rosenfeld, J. Tierney, and O. Zolina. (2021). Water Cycle Changes. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Hrsg.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 1055–1210). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.010>
- Drijfhout, S., Gleeson, E., Dijkstra, H. A., & Livina, V. (2013). Spontaneous abrupt climate change due to an atmospheric blocking–sea-ice–ocean feedback in an unforced climate model simulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(49), 19713–19718. <https://doi.org/10.1073/pnas.1304912110>
- Dröge, S. (2019). Die Folgen des Klimawandels als sicherheitspolitische Herausforderung. *Z Außen Sicherheitspolit* 12, 405–416. <https://doi.org/10.1007/s12399-020-00790-0>
- Dröge, S. (2020). Umgang mit den Risiken des Klimawandels, Welche Rolle für den VN-Sicherheitsrat?, SWP-Studie 2020/S 05, März 2020. <https://doi.org/10.18449/2020S05>
- Duque-Villegas, M., Salazar, J. F., & Rendón, A. M. (2019). Tipping the ENSO into a permanent El Niño can trigger state transitions in global terrestrial ecosystems. *Earth System Dynamics*, *10*(4), 631–650. <https://doi.org/10.5194/esd-10-631-2019>
- Eakin, C. M., Sweatman, H. P. A., & Brainard, R. E. (2019). The 2014–2017 global-scale coral bleaching event: Insights and impacts. *Coral Reefs*, *38*(4), 539–545. <https://doi.org/10.1007/s00338-019-01844-2>
- Eddy, T. D., Lam, V. W. Y., Reygondeau, G., Cisneros-Montemayor, A. M., Greer, K., Palomares, M. L. D., Bruno, J. F., Ota, Y., & Cheung, W. W. L. (2021). Global decline in capacity of coral reefs to provide ecosystem services. *One Earth*, *4*(9), 1278–1285. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.08.016>
- European Commission. (2023). *JOINT COMMUNICATION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL. A new outlook on the climate and security nexus: Addressing the impact of climate change and environmental degradation on peace, security and defence*. JOIN/2023/19 final. Download unter: [https://www.eeas.europa.eu/sites/default/files/documents/2023/JOIN\\_2023\\_19\\_1\\_EN\\_ACT\\_part1\\_v7.pdf](https://www.eeas.europa.eu/sites/default/files/documents/2023/JOIN_2023_19_1_EN_ACT_part1_v7.pdf)
- Flavell, A., Melde, S., & Milan, A. (2020). *Migration, environment and climate change: Impacts*. Umweltbundesamt (UBA). Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau, Germany, 48 Seiten. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-19\\_texte\\_79-2021\\_migration.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-19_texte_79-2021_migration.pdf)

- Fohlmeister, J., Sekhon, N., Columbu, A., Vettoretti, G., Weitzel, N., Rehfeld, K., Veiga-Pires, C., Ben-Yami, M., Marwan, N., & Boers, N. (2023). Global reorganization of atmospheric circulation during Dansgaard–Oeschger cycles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *120*(36). <https://doi.org/10.1073/pnas.2302283120>
- Forster, P., Smith, C. J., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., Hauser, M., Ribes, A., Rosen, D., Gillett, N., Palmer, M. D., Rogelj, J., Von Schuckmann, K., Seneviratne, S. I., Trewin, B., Zhang, X., Allen, M., Andrew, R., Birt, A., Borger, A., ... Zhai, P. (2023). Indicators of Global Climate Change 2022: Annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data*, *15*(6), 2295–2327. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>
- Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, & et al. (2021). The Earth’s Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Fox-Kemper, H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, & Y. Yu. (2021). Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Hrsg.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 1211–1362). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>
- Fuglestad, J., Rogelj, J., Millar, R. J., Allen, M., Boucher, O., Cain, M., Forster, P. M., Kriegler, E., & Shindell, D. (2018). Implications of possible interpretations of ‘greenhouse gas balance’ in the Paris Agreement. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *376*(2119). <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0445>
- Garbe, J., Albrecht, T., Levermann, A., Donges, J. F., & Winkelmann, R. (2020). The hysteresis of the Antarctic Ice Sheet. *Nature*, *585*(7826), 538–544. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2727-5>
- Gastineau, G., L’Hévéder, B., Codron, F., & Frankignoul, C. (2016). Mechanisms Determining the Winter Atmospheric Response to the Atlantic Overturning Circulation. *Journal of Climate*, *29*(10), 3767–3785. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0326.1>
- Gatti, L. V., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H. L. G., Tejada, G., Aragão, L. E. O. C., Nobre, C., Peters, W., Marani, L., Arai, E., Sanches, A. H., Corrêa, S. M., Anderson, L., Von Randow, C., Correia, C. S. C., Crispim, S. P., & Neves, R. A. L. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, *595*(7867), 388–393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- Geneva Environment Network. (2022). *Climate Tipping Points, Irreversibility and their Consequences for Society, Environment and Economies | Switzerland’s Proposal for an IPCC Special Report*. <https://www.genevaenvironmentnetwork.org/events/climate-tipping-points-irreversibility-and-their-consequences-for-society-environment-and-economies-switzerlands-proposal-for-an-ipcc-special-report/>. Abgerufen am: 14.09.2023
- Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Hrsg.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>
- Gulev, S. K., Thorne, P. W., Ahn, J., & F.J. Dentener, C.M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D.S. Kaufman, H.C. Nnamchi, J. Quaas, J.A. Rivera, S. Sathyendranath, S.L. Smith, B. Trewin, K. von Schuckmann, and R.S. Vose. (2021). Changing State of the Climate System. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Hrsg.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.

- Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 287–422). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>
- Haarsma, R. J., Selten, F. M., & Drijfhout, S. S. (2015). Decelerating Atlantic meridional overturning circulation main cause of future west European summer atmospheric circulation changes. *Environmental Research Letters*, *10*(9), 094007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/9/094007>
- Hankel, C., & Tziperman, E. (2021). The Role of Atmospheric Feedbacks in Abrupt Winter Arctic Sea Ice Loss in Future Warming Scenarios. *Journal of Climate*, *34*(11), 4435–4447. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0558.1>
- Höning, D., Willeit, M., Calov, R., Klemann, V., Bagge, M., & Ganopolski, A. (2023). Multistability and Transient Response of the Greenland Ice Sheet to Anthropogenic CO<sub>2</sub> Emissions. *Geophysical Research Letters*, *50*(6). <https://doi.org/10.1029/2022GL101827>
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Baird, A. H., Connolly, S. R., Dietzel, A., Eakin, C. M., Heron, S. F., Hoey, A. S., Hoogenboom, M. O., Liu, G., McWilliam, M. J., Pears, R. J., Pratchett, M. S., Skirving, W. J., Stella, J. S., & Torda, G. (2018). Global warming transforms coral reef assemblages. *Nature*, *556*(7702), 492–496. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0041-2>
- IDMC. (2023). *Internal displacement and food security*. The Internal Displacement Monitoring Centre (IDMC). Download unter: <https://www.internal-displacement.org>
- International Cryosphere Climate Initiative. (2022). *State of the Cryosphere 2022 – Growing Losses, Global Impacts*. International Cryosphere Climate Initiative (ICCI). Download unter: [www.iccinet.org](http://www.iccinet.org)
- IPCC. (2021a). Annex VII: Glossary. In Matthews, J.B.R., V. Möller, R. van Diemen, J.S. Fuglestedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (Hrsg.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 2215–2256). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.022>
- IPCC. (2021b). Summary for Policymakers. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Hrsg.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 3–32). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- IPCC. (2022a). Summary for Policymakers. In H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (Hrsg.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 3–33). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>
- IPCC. (2022b). Summary for Policymakers. In P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (Hrsg.), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
- IPCC. (2023). Summary for Policymakers. In Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Hrsg.), *Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 1–34). IPCC, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- Jackson, L. C., Kahana, R., Graham, T., Ringer, M. A., Woollings, T., Mecking, J. V., & Wood, R. A. (2015). Global and European climate impacts of a slowdown of the AMOC in a high resolution GCM. *Climate Dynamics*, *45*(11–12), 3299–3316. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2540-2>

- Jiang, Y., Zhou, L., Tucker, C. J., Raghavendra, A., Hua, W., Liu, Y. Y., & Joiner, J. (2019). Widespread increase of boreal summer dry season length over the Congo rainforest. *Nature Climate Change*, 9(8), 617–622. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0512-y>
- Jones, M. C., Grosse, G., Treat, C., Turetsky, M., Anthony, K. W., & Brosius, L. (2023). Past permafrost dynamics can inform future permafrost carbon-climate feedbacks. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 272. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00886-3>
- Kim, Y.-H., Min, S.-K., Gillett, N. P., Notz, D., & Malinina, E. (2023). Observationally-constrained projections of an ice-free Arctic even under a low emission scenario. *Nature Communications*, 14(1), 3139. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38511-8>
- Kloenne, U., Nauels, A., Pearson, P., DeConto, R. M., Findlay, H. S., Hugelius, G., Robinson, A., Rogelj, J., Schuur, E. A. G., Stroeve, J., & Schleussner, C.-F. (2023). Only halving emissions by 2030 can minimize risks of crossing cryosphere thresholds. *Nature Climate Change*, 13(1), 9–11. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01566-4>
- Lee, J.-Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J. P., Engelbrecht, E., Fischer, E., Fyfe, J. C., Jones, C., Maycock, A., Mutemi, J., Ndiaye, O., Panickal, S., & Zhou, T. (2021). Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Hrsg.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 553–672). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>
- Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., & Schellnhuber, H. J. (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), 1786–1793. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>
- Lenton, T. M., Rockström, J., Gaffney, O., Rahmstorf, S., Richardson, K., Steffen, W., & Schellnhuber, H. J. (2019). Climate tipping points—Too risky to bet against. *Nature*, 575(7784), 592–595. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-03595-0>
- Levermann, A., Griesel, A., Hofmann, M., Montoya, M., & Rahmstorf, S. (2005). Dynamic sea level changes following changes in the thermohaline circulation. *Climate Dynamics*, 24(4), 347–354. <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0505-y>
- Levermann, A., Schewe, J., Petoukhov, V., & Held, H. (2009). Basic mechanism for abrupt monsoon transitions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(49), 20572–20577. <https://doi.org/10.1073/pnas.0901414106>
- Liu, T., Chen, D., Yang, L., Meng, J., Wang, Z., Ludescher, J., Fan, J., Yang, S., Chen, D., Kurths, J., Chen, X., Havlin, S., & Schellnhuber, H. J. (2023). Teleconnections among tipping elements in the Earth system. *Nature Climate Change*, 13(1), 67–74. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01558-4>
- Liu, W., Fedorov, A. V., Xie, S.-P., & Hu, S. (2020). Climate impacts of a weakened Atlantic Meridional Overturning Circulation in a warming climate. *Science Advances*, 6(26). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz4876>
- Lovejoy, T. E., & Nobre, C. (2018). Amazon Tipping Point. *Science Advances*, 4(2). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2340>
- Lynch-Stieglitz, J. (2017). The Atlantic Meridional Overturning Circulation and Abrupt Climate Change. *Annual Review of Marine Science*, 9(1), 83–104. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010816-060415>
- Milkoreit, M. (2023). Social tipping points everywhere?—Patterns and risks of overuse. *WIREs Climate Change*, 14(2). <https://doi.org/10.1002/wcc.813>

- Mohtadi, M., Prange, M., Oppo, D. W., De Pol-Holz, R., Merkel, U., Zhang, X., Steinke, S., & Lückge, A. (2014). North Atlantic forcing of tropical Indian Ocean climate. *Nature*, *509*(7498), 76–80. <https://doi.org/10.1038/nature13196>
- Möller, T., Högner, A. (Ernest), Schleussner, C.-F., Bien, S., Kitzmann, N., Lamboll, R., Rogelj, J., Donges, J., Rockström, J., & Wunderling, N. (2023). *Achieving net zero greenhouse gas emissions critical to limit climate tipping risks* [Preprint]. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3253269/v1>
- Naughten, K. A., Holland, P. R., & De Rydt, J. (2023). Unavoidable future increase in West Antarctic ice-shelf melting over the twenty-first century. *Nature Climate Change*, *13*(11), 1222–1228. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01818-x>
- OECD (2022), *Climate Tipping Points: Insights for Effective Policy Action*, OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/abc5a69e-en>.
- Patt, A., Rajamani, L., Bhandari, P., Ivanova Boncheva, A., Caparrós, A., Djemouai, K., Kubota, I., Peel, J., Sari, A. P., Sprinz, D. F., & Wettstad, J. (2022). International Cooperation. In P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (Hrsg.), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.016>
- Pausata, F. S. R., Gaetani, M., Messori, G., Berg, A., Maia De Souza, D., Sage, R. F., & deMenocal, P. B. (2020). The Greening of the Sahara: Past Changes and Future Implications. *One Earth*, *2*(3), 235–250. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.03.002>
- Purr, K., Spindler, J. et al. (2023). Carbon Capture and Storage - Diskussionsbeitrag zur Integration in die nationalen Klimaschutzstrategien. Position, Sept. 2023. Umweltbundesamt. 28 p. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/carbon-capture-storage-diskussionsbeitrag>
- Ranasinghe, R., Ruane, A. C., Vautard, R., Arnell, N., Coppola, E., Cruz, F. A., Dessai, S., Islam, A. S., Rahimi, M., Ruiz Carrascal, D., Sillmann, J., Sylla, M. B., Tebaldi, C., Wang, W., & Zaaboul, R. (2021). Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Hrsg.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 1767–1926). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.014>
- Rantanen, M., Karpechko, A. Yu., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., & Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, *3*(1), 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., Von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., ... Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, *9*(37). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Ritchie, P. D. L., Clarke, J. J., Cox, P. M., & Huntingford, C. (2021). Overshooting tipping point thresholds in a changing climate. *Nature*, *592*(7855), 517–523. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03263-2>
- Robinson, A., Calov, R., & Ganopolski, A. (2012). Multistability and critical thresholds of the Greenland ice sheet. *Nature Climate Change*, *2*(6), 429–432. <https://doi.org/10.1038/nclimate1449>
- Salati, E., Dall’Olio, A., Matsui, E., & Gat, J. R. (1979). Recycling of water in the Amazon Basin: An isotopic study. *Water Resources Research*, *15*(5), 1250–1258. <https://doi.org/10.1029/WR015i005p01250>

- Schellnhuber, H. J., Rahmstorf, S., & Winkelmann, R. (2016). Why the right climate target was agreed in Paris. *Nature Climate Change*, 6(7), 649–653. <https://doi.org/10.1038/nclimate3013>
- Schewe, J., & Levermann, A. (2012). A statistically predictive model for future monsoon failure in India. *Environmental Research Letters*, 7(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044023>
- Schewe, J., & Levermann, A. (2022). Sahel Rainfall Projections Constrained by Past Sensitivity to Global Warming. *Geophysical Research Letters*, 49(18). <https://doi.org/10.1029/2022GL098286>
- Schleussner, C.-F., Frieler, K., Meinshausen, M., Yin, J., & Levermann, A. (2011). Emulating Atlantic overturning strength for low emission scenarios: Consequences for sea-level rise along the North American east coast. *Earth System Dynamics*, 2(2), 191–200. <https://doi.org/10.5194/esd-2-191-2011>
- Schleussner, C.-F., Ganti, G., Rogelj, J., & Gidden, M. J. (2022). An emission pathway classification reflecting the Paris Agreement climate objectives. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 135. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00467-w>
- Sheppard, C., Dixon, D. J., Gourlay, M., Sheppard, A., & Payet, R. (2005). Coral mortality increases wave energy reaching shores protected by reef flats: Examples from the Seychelles. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64(2–3), 223–234. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.02.016>
- Sing Wong, A., Vrontos, S., & Taylor, M. L. (2022). An assessment of people living by coral reefs over space and time. *Global Change Biology*, 28(23), 7139–7153. <https://doi.org/10.1111/gcb.16391>
- Singh, C., Ruud van der Ent, Ingo Fetzer, & Lan Wang-Erlandsson. (2021). *Multi-fold increase in rainforests tipping risk beyond 1.5-2°C warming*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1486>
- Staal, A., Fetzer, I., Wang-Erlandsson, L., Bosmans, J. H. C., Dekker, S. C., Van Nes, E. H., Rockström, J., & Tuinenburg, O. A. (2020). Hysteresis of tropical forests in the 21st century. *Nature Communications*, 11(1), 4978. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18728-7>
- Sutter, J., Jones, A., Frölicher, T. L., Wirths, C., & Stocker, T. F. (2023). Climate intervention on a high-emissions pathway could delay but not prevent West Antarctic Ice Sheet demise. *Nature Climate Change*, 13(9), 951–960. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01738-w>
- Turetsky, M. R., Abbott, B. W., Jones, M. C., Anthony, K. W., Olefeldt, D., Schuur, E. A. G., Grosse, G., Kuhry, P., Hugelius, G., Koven, C., Lawrence, D. M., Gibson, C., Sannel, A. B. K., & McGuire, A. D. (2020). Carbon release through abrupt permafrost thaw. *Nature Geoscience*, 13(2), 138–143. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0526-0>
- UN Environment, ISU, ICRI, & Trucost. (2018). *The Coral Reef Economy. The business case for investment in the protection, preservation and enhancement of coral reef health*. Download unter: <https://wedocs.unep.org>
- UNEP. (2023). *Adaptation Gap Report 2023: Underfinanced. Underprepared. Inadequate investment and planning on climate adaptation leaves world exposed*. United Nations Environment Programme (UNEP). Download unter: <https://www.unep.org>
- UNFCCC. (1992). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. U.N. Doc. A/AC.237/18 (Part II)/Add.1.
- UNFCCC. (2015). *Paris Agreement*. U.N. Doc. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1.
- UNFCCC. (2022). *Sharm el-Sheikh Implementation Plan*. Decision 1/CP.27. FCCC/CP/2022/10/Add.1.
- UNFCCC. (2023). *Views on the elements for the consideration of outputs component of the first global stocktake*. 2023 Synthesis report on GST elements.
- UNU-EHS. (2023). *Interconnected Disaster Risks: Risk Tipping Points*. United Nations University – Institute for Environment and Human Security. Download unter: <https://interconnectedrisks.org/>

- Wang, S. (2023). *There Is No Climate Tipping Point*. The Breakthrough Institute. <https://thebreakthrough.org/journal/climate-change-banned-words/climate-tipping-point-real>. Abgerufen am: 01.11.2023
- Wang, S., Foster, A., Lenz, E. A., Kessler, J. D., Stroeve, J. C., Anderson, L. O., Turetsky, M., Betts, R., Zou, S., Liu, W., Boos, W. R., & Hausfather, Z. (2023). Mechanisms and Impacts of Earth System Tipping Elements. *Reviews of Geophysics*, *61*(1). <https://doi.org/10.1029/2021RG000757>
- Weldeab, S., Schneider, R. R., Yu, J., & Kylander-Clark, A. (2022). Evidence for massive methane hydrate destabilization during the penultimate interglacial warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *119*(35). <https://doi.org/10.1073/pnas.2201871119>
- Wright, E., Tänzler, D., & Rüttinger, L. (2021). *Migration, environment and climate change*. Umweltbundesamt (UBA). Download unter: [www.umweltbundesamt.de/](http://www.umweltbundesamt.de/)
- Wunderling, N., Donges, J. F., Kurths, J., & Winkelmann, R. (2021). Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming. *Earth System Dynamics*, *12*(2), 601–619. <https://doi.org/10.5194/esd-12-601-2021>
- Wunderling, N., Von Der Heydt, A., Aksenov, Y., Barker, S., Bastiaansen, R., Brovkin, V., Brunetti, M., Couplet, V., Kleinen, T., Lear, C. H., Lohmann, J., Roman-Cuesta, R. M., Sinet, S., Swingedouw, D., Winkelmann, R., Anand, P., Barichivich, J., Bathiany, S., Baudena, M., ... Willeit, M. (2023). *Climate tipping point interactions and cascades: A review* [Preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1576>
- Wunderling, N., Willeit, M., Donges, J. F., & Winkelmann, R. (2020). Global warming due to loss of large ice masses and Arctic summer sea ice. *Nature Communications*, *11*(1), 5177. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18934-3>
- Wunderling, N., Winkelmann, R., Rockström, J., Loriani, S., Armstrong McKay, D. I., Ritchie, P. D. L., Sakschewski, B., & Donges, J. F. (2023). Global warming overshoots increase risks of climate tipping cascades in a network model. *Nature Climate Change*, *13*(1), 75–82. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01545-9>
- Yin, J., & Goddard, P. B. (2013). Oceanic control of sea level rise patterns along the East Coast of the United States: U.S. EAST COAST SEA LEVEL RISE. *Geophysical Research Letters*, *40*(20), 5514–5520. <https://doi.org/10.1002/2013GL057992>
- Zemp, D. C., Schleussner, C.-F., Barbosa, H. M. J., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G., Staal, A., Wang-Erlandsson, L., & Rammig, A. (2017). Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nature Communications*, *8*(1), 14681. <https://doi.org/10.1038/ncomms14681>
- Zickfeld, K., Knopf, B., Petoukhov, V., & Schellnhuber, H. J. (2005). Is the Indian summer monsoon stable against global change? *Geophysical Research Letters*, *32*(15), L15707. <https://doi.org/10.1029/2005GL022771>
- Zingg, S. (2021). *Exploring the climate change–conflict–mobility nexus* (Migration Research Series, N° 70). International Organization for Migration (IOM), Geneva. Download unter: <https://publications.iom.int>