

Döblinger Gymnasium, Gymnasiumstraße 83, 1190 Wien

Der Klimawandel in Grönland und dessen globale Auswirkungen

Vorwissenschaftliche Arbeit

Anna Mascher
8A

Betreuerin: Mag. Brigitte Kytir
Abgabedatum: 15.2.2018

Abstract

Kaum ein Thema ist aktueller und akuter als der von Menschen verursachte Klimawandel. Doch während sich die globalen Klimafolgen in den meisten Gebieten der Erde erst sehr spärlich zeigen, gibt es einen Ort, an dem sie bereits deutlich auftreten: Grönland ist regional übermäßig stark vom Klimawandel betroffen und ist damit ein Vorbote für zukünftige Szenarien des globalen Klimawandels. Hier sind eine Vielzahl an Auswirkungen zu beobachten, die nicht nur die Arktis, sondern das gesamte Klimasystem des Planeten entweder bereits beeinflussen oder mit großer Wahrscheinlichkeit in nächster Zukunft beeinflussen werden.

Grönland spielt in dem eng vernetzten globalen Klimasystem eine entscheidende Rolle. Es ist ein gutes Beispiel dafür, wie relativ „kleine“ Störungen über Jahrtausende funktionierende Vorgänge unseres Klimas aus dem Gleichgewicht bringen. Diese Arbeit bietet einen Einblick in dieses umfassende Thema und soll ein Verständnis für die Wichtigkeit der Zusammenarbeit aller Länder schaffen. Denn Klimawandel ist ein globales Phänomen und somit auch ein globales Risiko.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	2
1. Einleitung.....	4
2. Definition Klima und Klimawandel.....	5
3. Klimaforschung.....	7
3.1 Erhebung und Interpretation von Messdaten	7
3.2 Klimamodellierung.....	8
4. Geschichte des Klimas mit Schwerpunkt Grönland	9
5. Vorgänge und Reaktionen des Klimasystems	11
5.1 Rückkoppelungseffekte im Klima	11
5.2 Kippelemente im Klima	12
6. Auswirkungen auf Grönland und deren globale Folgen	15
6.1 Eisschmelze in Grönland	15
6.2 Freisetzung von Methan	19
6.3 Versauerung der Ozeane	22
6.4 Abschwächungen der Atlantischen Thermohalinen Zirkulation	24
6.5 Anstieg des Meeresspiegels.....	29
6.6 Ressourcenabbau.....	32
7. Fazit	35
Literaturverzeichnis	36
Abbildungsverzeichnis	40

1. Einleitung

Das Thema Klimawandel wird von Politik und Medien sehr häufig aufgegriffen und auch in der Schule behandelt. Oft wird Grönland herangezogen, um die Auswirkungen des globalen Klimawandels zu illustrieren: Wie sehr wirkt sich der Klimawandel auf diesen Teil der Erde aus? Wie sehr spielen das grönländische Eis oder Vorgänge im grönländischen Meer im globalen Klimasystem eine Rolle? Welche physikalischen beziehungsweise chemischen Phänomene verbergen sich dahinter? Welche neuen ökonomischen Möglichkeiten ergeben sich?

Nach einem allgemeinen Einstieg in das Thema Klimawandel und Klimaforschung behandelt die Arbeit die Entwicklung des Klimawandels am Beispiel Grönlands. Das Klimasystem sowie typische Reaktionen des Klimas auf globale Veränderungen stellen den Inhalt des nächsten Kapitels dar. Dann werden spezifische, ausgewählte Klimafolgen, die man in Grönland und dem grönländischen Meer teilweise bereits beobachten kann, erläutert. Weiters wird die Reaktion des globalen Klimasystems auf besagte Klimafolgen beschrieben. Die Arbeit kann keinen universellen Überblick über alle Klimafolgen bieten. Es werden eine Auswahl an Auswirkungen des Klimawandels auf Grönland und die damit verbundenen globalen Folgen bearbeitet.

Verfasst wurde die Arbeit ausschließlich auf Literaturbasis. Die Arbeit ist von einem primär geografischen Standpunkt aus geschrieben. Insofern wird nur ein knapper Überblick über physikalische und chemische Vorgänge gegeben, diese werden aber nicht detailliert erklärt.

Trotz der Aktualität und Relevanz bleiben viele Auseinandersetzungen mit dem Klimawandel insbesondere in den Medien und der Politik auf einem nicht wissenschaftlichen Niveau. Die Meinungen reichen von der Überzeugung, dass von Menschen verursachter Klimawandel nicht existiert, bis hin zur Prognose von Schreckensszenarien, die die Erde in unmittelbarer Zukunft treffen sollen. Das Ziel dieser Arbeit ist es, Fakten und genaue Prognosen darzulegen und das somit oft polarisierende Thema sachlich zu bearbeiten.

2. Definition Klima und Klimawandel

Das Wort Klima kommt aus dem Altgriechischen („κλίμα“) und heißt Neigung. Diese Bedeutung verweist auf den Zusammenhang zwischen dem Winkel, unter dem die Sonneneinstrahlung auf die Erde fällt, und den Phänomenen, die wir zusammenfassend Klima nennen. Die bekannteste und am weitesten verbreitete Definition stammt von J. Hann: „Unter Klima verstehen wir die Gesamtheit der meteorologischen Erscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an irgendeiner Stelle der Erdoberfläche kennzeichnen.“ (Hann, 1883 zit. n. Heyer, 1993, S. 7f) Modernere Definitionen berücksichtigen zusätzlich den Zeitfaktor der Änderungen des Klimas (Heyer, 1993, S. 7f).

Es ist wichtig, den Terminus Klima von den Begriffen Wetter und Witterung zu unterscheiden. Als Wetter wird der Zustand der Atmosphäre in einem sehr kurzen Zeitabschnitt (beispielsweise einem Tag) bezeichnet. Es wird durch die meteorologischen Erscheinungen wie Luftdruck, Wind, Temperatur, Bewölkung und Niederschlag gekennzeichnet. Der Wetterverlauf über eine längere Zeitspanne wird Witterung genannt. Hierbei wird der Zustand der Atmosphäre verallgemeinert und als einheitlicher Charakterzug des Wettergeschehens dargestellt. Diese Zeitspanne kann sich von wenigen Tagen bis über ganze Jahreszeiten erstrecken. Das Klima wiederum ist eine Verallgemeinerung des Witterungsverlaufs. Grundsätzlich wird der Verlauf des Wetters (beziehungsweise der Witterung) in einer Zeitspanne von ca. 30 Jahren als Klima bezeichnet (Heyer, 1993, S. 8).

Rahmstorf und Schellnhuber definieren das globale Klima als das Resultat der Energiebilanz der von der Erde absorbierten Sonnenstrahlung und der von der Erde abgestrahlten Wärmestrahlung. Es gilt das Prinzip der Erhaltung der Energie: „Die auf der Erde ankommende Sonnenstrahlung abzüglich des reflektierten Anteils ist gleich der von der Erde abgestrahlten Wärmestrahlung.“¹ (Rahmstorf und Schellnhuber, 2012, S. 13)

¹ Bei dieser Berechnung kann man die Energie, die von der Photosynthese verwendet wird, sowie jene, die im Erdinneren fließt, vernachlässigen (Rahmstorf und Schellnhuber, 2012, S.13).

Treibhausgase der Atmosphäre werfen einen Teil der von der Erdoberfläche abgestrahlten Energie zurück (natürlicher Treibhauseffekt). Änderungen dieser Relationen führen zu Klimaänderung. Das regionale Klima wird zudem durch die Verteilung der Wärme, durch die Atmosphäre, die Erdstruktur (z.B. Gebirge) und das Meer bestimmt. Klimawandel kann seinen Ursprung laut Rahmstorf und Schellnhuber (2012, S. 13) in drei verschiedenen Ursachen haben:

- Erstens kann Klimawandel durch die Veränderung der absorbierten Sonneneinstrahlung, verursacht durch eine Alternation der Umlaufbahn der Erde oder durch eine von der Sonne direkt verursachte Variation der Strahlungsintensität, ausgelöst werden.
- Zweitens ist es möglich, dass der reflektierte Teil der Sonneneinstrahlung (Albedo genannt) wächst beziehungsweise schrumpft.² Dies ist einerseits von dem Wetterzustand - also der Wolkendichte, andererseits von der Helligkeit der Erde, das heißt dem Land- beziehungsweise dem Meer- und Eisanteil der Erdoberfläche, abhängig.
- Drittens beeinflusst der Gehalt an Treibhausgasen (absorbierten Gasen) und Aerosolen (heterogenen Gemischen aus Schwebepartikeln) in der Atmosphäre die Wärmestrahlung der Erde.

Im Laufe der Erdgeschichte haben sich diese Faktoren stets gewandelt, daher gab es niemals ein einheitliches Klima. Folglich ist der Klimawandel ein immerwährendes Phänomen, das weder als ungewöhnlich noch als negativ zu bewerten ist. Dennoch muss man zwischen natürlichem Klimawandel, der bislang das Klima der Erde beeinflusst hat, und anthropogenem³ Klimawandel unterscheiden. Der von den Menschen verursachte Klimawandel wird hauptsächlich durch Änderung des Treibhausgasanteiles (vor allem Kohlenstoffdioxid und Methan) sowie des Aerosolanteiles verursacht. Die Menschen beeinträchtigen, indem sie fossile Rohstoffe verbrennen, den natürlichen Verlauf des Klimasystems von Abgabe und Aufnahme von Kohlenstoffdioxid. Das Kohlenstoffdioxid, das zusätzlich in die Atmosphäre gelangt, kann nicht von den Pflanzen weiterverarbeitet werden und bleibt somit in der Atmosphäre bestehen (Rahmstorf und Schellnhuber, 2012, S. 12f).

² Der heutige Prozentsatz des von der Erdoberfläche zurück in die Atmosphäre reflektierten Anteils (Albedo) beträgt ca. 30%.

³ Anthropogen= vom Menschen verursacht

Ein rasanter Anstieg der Treibhausgase, wie er seit dem 20. Jahrhundert durch die Nutzung von Ressourcen wie Erdöl, Erdgas oder Kohle aber auch durch Nahrungsmittelproduktion wie Rinderzucht oder Reisanbau verursacht wurde, beeinflusst den globalen Klimawandel auf so gravierende Weise, dass man die aktuellen Klimaschwankungen nicht mehr auf natürliche Ursachen zurückführen kann (Rahmstorf und Schellnhuber, 2012, S. 12f).

3. Klimaforschung

Hauptziel der Klimaforschung ist es, Prognosen für Klimaänderungen zu erstellen und die relevanten Ursachen dafür zu ermitteln. Voraussetzung für möglichst exakte Klimavorhersagen sind genaue Daten über die Klimavergangenheit. Erst nach einer präzisen Erhebung und Rekonstruktion von Daten sowie deren Interpretation im Kontext kann eine zuverlässige Basis für Klimamodelle geschaffen werden. Klimamodelle prognostizieren anhand ähnlicher Szenarien, die bereits in der Vergangenheit aufgetreten sind, eine mögliche aber bestenfalls wahrscheinliche Entwicklung des Klimas (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

3.1 Erhebung und Interpretation von Messdaten

Die systematische Erhebung von meteorologischen Klimadaten auf globaler Ebene begann erst Mitte bis Ende des 19. Jahrhunderts, in Europa etwa 100 Jahre früher. Dieser Zeitraum wird von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik als Neoklima bezeichnet. Im Vergleich mit der Erdgeschichte ist das ein verschwindend geringer Bruchteil. Folglich stützen sich Klimamodelle auch umfassend auf die Rekonstruktion des sogenannten Paläoklimas. Darunter versteht man die Klimavergangenheit, auf die nur durch indirekte Informationen geschlossen werden kann (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

Das Paläoklima wird mit Hilfe von Beobachtung von Klimaauswirkungen, die bis heute erhalten geblieben sind, erforscht. Beispiele für solche Auswirkungen sind Tropfsteine, Baumringe oder Seesedimente⁴. Anhäufungen von zum Beispiel Stürmen, starken Niederschlägen oder Hitzeperioden, also allen Phänomenen, die als Klimaextreme klassifiziert werden, können uns Auskunft über das Hintergrundklima⁵ geben (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

Was die Messdaten der letzten zwei Jahrhunderte angeht, wird eine objektive Deutung durch viele Störfaktoren, die die Genauigkeit der Datensätze beeinträchtigen, erschwert. Änderung der Stationslokationen, neue Messverfahren und Messinstrumente, Verstädterung und andere Phänomene der Gesellschaft verändern die Forschungsverhältnisse. All diese Komponenten können das Aufzeichnen der „wahren“ Klimaentwicklung verfälschen. Der Datensammlungs- und der Prognoseprozess sind langwierig und fehleranfällig (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik). WissenschaftlerInnen in Grönland beklagen zudem die geringe Anzahl von Satellitenaufnahmen und Bodenstationen. Es können daher nicht genügend Daten für präzise Klimamodelle erhoben werden (Gschnaller et al., 2016).

3.2 Klimamodellierung

Prognosen des Klimawandels basieren auf umfassenden Klimamodellen. Das Ziel dieser computerbasierten Modelle ist es, das Klimasystem unseres Planeten und dessen Weiterentwicklung in vereinfachter Form abzubilden. Der Aufbau ist sehr komplex und das Resultat ist keineswegs eine genaue Prognose. Klimamodelle sind die Grundlage für die Beantwortung der Frage, wie sich das künftige Klima entwickeln wird. Kompliziert wird es, wenn man den anthropogenen Klimawandel untersuchen will: noch nie in der Geschichte der Erde war dieser Faktor für das Klima relevant (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

⁴ Seesedimente bestehen aus Partikeln wie fossilen Algen, Mikrofossilien oder Pollen. Diese werden am Meeresgrund von Schlamm eingeschlossen und sind so für die Nachwelt wichtige Forschungsquellen (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

⁵ Als Hintergrundklima bezeichnet man das Klima, das gewirkt hat, damit solche Phänomene entstehen (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

4. Geschichte des Klimas mit Schwerpunkt Grönland

Wie schon aus dem Namen Grönlands⁶ zu schließen ist, war dieses Land nicht immer von Eismassen umschlossen. Glaziale und Interglaziale⁷ tauchen wiederholt in der Erdgeschichte auf. Die Erde war vermutlich sogar eine Zeit lang vollkommen oder fast zur Gänze vereist („Schneeball Erde“). Die Ausbildung der Plattentektonik⁸ war entscheidend für den Klimawandel: die Nähe der „Kontinentalplatten“ zu den Polen beziehungsweise zum Äquator wurde ausschlaggebend für das Temperaturniveau. Diese Entwicklung ergab sich vor etwa 542 Millionen Jahren (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

Während die Antarktis schon wesentlich früher vereist war, begann sich ein Meereisschild am Nordpol und somit auch um Grönland erst vor etwa 5 Millionen Jahren zu bilden - und das zunächst nur im Winter. Inlandeis tauchte erst innerhalb der letzten Jahrillion auf. In dieser Zeit kam es zu immer mehr Schwankungen von Warm- und Kaltzeiten. War die Warmzeit relativ kurz und schwach, schmolzen die Inlandeisschilde Grönlands nicht ab. Temperaturänderungen waren in Grönland bis zu dreimal so groß wie im Rest der Welt (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

Grönland spielt als eines der größten Eisreservoirs der Welt bei Klimaschwankungen eine entscheidende Rolle. Die letzte Interglazialzeit (auch unter dem Namen „Eemian“ bekannt) dauerte von vor 130.000 bis vor 115.000 Jahren. Damals herrschten um ca. zwei bis sechs Grad höhere Durchschnittstemperaturen und der Meeresspiegel war um vier bis sechs Meter höher als heute. Die letzte globale Eiszeit war vor etwa 20.000 Jahren. Gigantische Eismassen waren nördlich des Polarkreises vorhanden. Das Meereis um Grönland besaß eine vielmal so große Ausdehnung wie derzeit. In dieser Zeitspanne war das globale Meeresniveau im Vergleich zu heute um ca. 120 bis 130 Meter niedriger. Man nimmt an, dass das grönländische Eisschild ein Relikt aus der letzten Eiszeit ist (CAPE-Last Interglacial Project Members, 2006; Sime et al., 2009; zit. n. Levermann et al., 2011).

⁶ Die Namensgebung Grönlands ist umstritten.

⁷ Glazial= Eiszeit, Interglazial = Warmzeit

⁸ Erdmantel= die äußere Hülle der Erdkugel (Gestaltung der Kontinente)

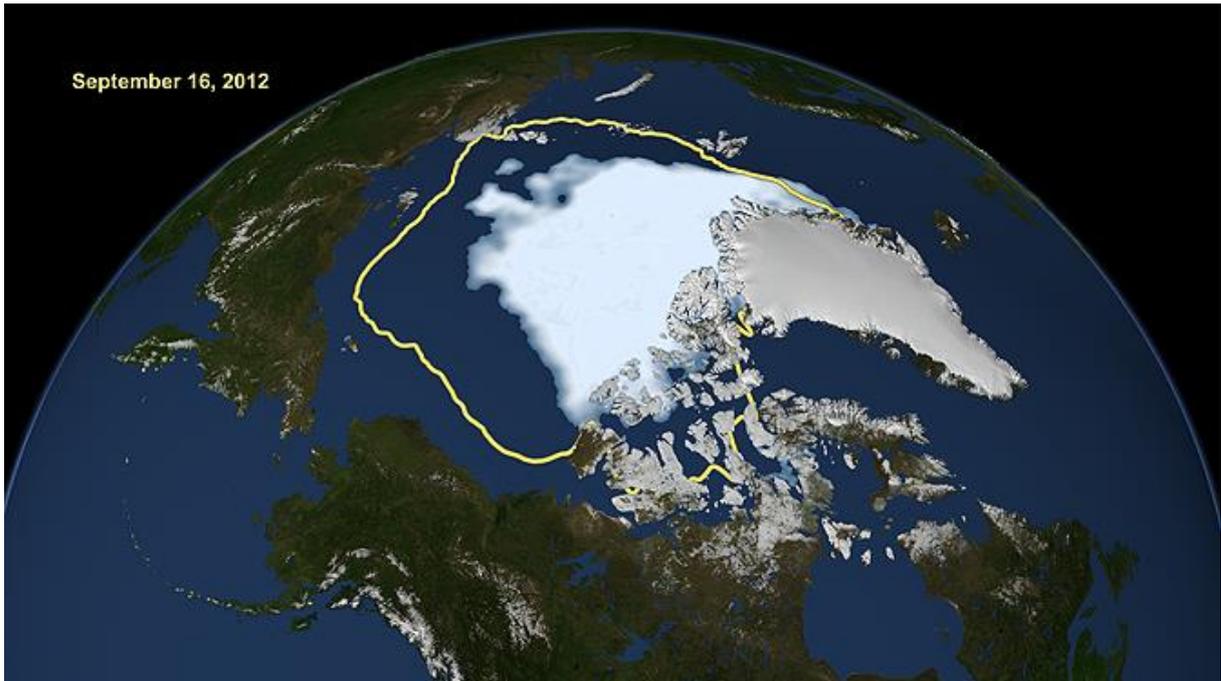


Abbildung 1: Basierend auf Satellitendaten zeigt das Rekordtief der Meereisausdehnung im September 2012 im Vergleich zu der durchschnittlichen Ausdehnung der letzten 30 Jahre

Die Forschungsergebnisse zum Paläoklima zeigen auch in den nachfolgenden Jahrtausenden und Jahrhunderten Veränderungen des Klimas in der Arktis. Im 20. und 21. Jahrhundert wurden gravierende Änderungen der Meereisausdehnung in der Arktis gemessen. Diese Klimaveränderungen können nicht mehr nur auf natürliche Ursachen zurückgeführt werden, sondern werden zusätzlich von den Menschen beeinflusst.

Die Abbildung zeigt das Ausmaß des gigantischen Schmelzvorgangs und vergleicht die Ausdehnung des Eises im September 2012 mit dem Durchschnitt der letzten 30 Jahre. Nicht nur die Forschung, auch die Massenmedien greifen diese alarmierende Entwicklung auf: *„Eine Auswertung der Messdaten eines NASA-Satelliten liefert alarmierende Ergebnisse: Das Eis der Arktis und Antarktis schmilzt noch schneller als bislang befürchtet. In manchen Regionen hat sich die Eisschmelze sogar verselbstständigt – Das Eis schmilzt dort unabhängig vom Temperaturanstieg.“* (Borenstein, 2009)

5. Vorgänge und Reaktionen des Klimasystems

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf Grönland und deren globale Folgen aufzulisten sowie deren Problematik verständlich erläutern zu können, ist es erforderlich, zuerst das Prinzip von Rückkoppelungseffekten und Kippelementen im Klimasystem zu behandeln. Dabei ist zu beachten, dass die meisten Phänomene beides sein können: Rückkoppelungseffekt und Kippelement.

5.1 Rückkoppelungseffekte im Klima

Unter Rückkoppelungen werden Vorgänge verstanden, durch welche ursprüngliche Effekte entweder sich selbst verstärken oder sich selbst abschwächen. Diese Art von selbstverstärkenden bzw. -begrenzenden Prozessen findet sich in vielen Wissenschaften und es können viele verschiedene Phänomene der Naturwissenschaften oder auch der Geisteswissenschaften auf Rückkoppelungen zurückgeführt werden. Im Klimasystem spielen Rückkoppelungen allerdings eine besonders wichtige Rolle, denn sie sind folgenschwer für Klimaschwankungen. Außerdem sind sie charakteristisch für die häufig nicht linear verlaufenden Reaktionen unseres Klimasystems (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik). Rückkoppelungen werden in die Kategorien positive und negative Rückkoppelungen unterteilt.

5.1.1 Positive Rückkoppelung

Positive Rückkoppelung bezeichnet die Selbstverstärkung von Vorgängen der Klimaantriebe⁹. Diese sind anfänglich zu schwach, um größere Auswirkungen auf das Klimasystem zu haben. Durch positive Rückkoppelung werden diese immer weiter verstärkt, sodass sie immer größere Änderungen im Klima bewirken können. Der wichtigste positive Rückkoppelungseffekt ist der Eis-Albedo-Rückkopplungseffekt, der später genauer erläutert wird (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

⁹ Klimaantriebe sind Phänomene, die Klimaänderungen verursachen. Beispiele sind Vulkanausbrüche, Plattentektonik oder Treibhausgase (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

5.1.2 Negative Rückkoppelung

Negative Rückkoppelung ist die Selbstbegrenzung von Vorgängen. Sie schwächt Änderungen im Klimasystem ab. Durch sie werden Störungen nicht verstärkt sondern abgeschwächt. Negative Rückkoppelung ist daher essentiell für die interne Stabilisierung im Klimasystem. Die genaue Wirkungsweise dieses Phänomens ist noch nicht geklärt, daher ist es sehr schwierig über das genaue Ausmaß der Stabilisierung Vorhersagen zu treffen. Einig sind sich die ForscherInnen allerdings dabei, dass negative Rückkoppelung ausschlaggebend für die Klimasensitivität¹⁰ ist. Wichtige Beispiele für negative Rückkoppelungen sind die Biosphäre¹¹ oder der Anteil der Wolken in der Atmosphäre. Dieses Element hat allerdings sowohl Aspekte von negativer als auch von positiver Rückkoppelung (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

5.1.3 Anthropogener Rückkoppelungseffekt

Man spricht von einem anthropogenen Rückkoppelungseffekt, wenn die Handlungen der Menschen sowohl Ursache als auch Folge klimatischer Änderungen sind. Ein gutes Beispiel für anthropogene positive Rückkoppelung ist der Ressourcenabbau, der durch das starke Schmelzen der Eisschichten möglich gemacht wird. Es werden freigesetzte fossile Rohstoffe abgebaut und verbrannt. Das Kohlenstoffdioxid, das bei der Verbrennung ausgestoßen wird, führt zu einem Temperaturanstieg, durch den wieder mehr Rohstoffe zugänglich werden (Gschnaller et al., 2016).

5.2 Kippelemente im Klima

Es gibt Komponenten des Klimasystems, die dadurch charakterisiert werden können, dass sie beim Überschreiten eines bestimmten Schwellenwerts in einen neuen Zustand kippen. Diese Komponenten werden als Kippelemente bezeichnet. Die Überschreitung des Schwellenwertes kann durch externe, oft nur minimale Änderungen des Hintergrundklimas erfolgen. Oft hängen Kippelemente mit positiven Rückkoppelungen zusammen.

¹⁰ Klimasensitivität wird als die globale Änderung der durchschnittlich vorherrschenden Temperatur, wenn der CO₂ Gehalt in der Atmosphäre verdoppelt wird, definiert (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

¹¹ Ausschlaggebend für die Biosphäre ist vor allem die Pflanzendecke (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

Sind sie einmal ausgelöst, das heißt wurde der Schwellenwert überschritten, laufen sie auch ohne weitere Einwirkungen von außen weiter, auch wenn die Änderungen des Hintergrundklimas wieder unter den Schwellenwert fallen. Der Übergang des Kippelements in den neuen Zustand kann sowohl sehr langsam als auch sehr schnell erfolgen. Weiters können sie entweder reversibel oder irreversibel sein. Kippelemente sind wichtig für unser Klimasystem, da ihre Auswirkungen nicht nur regional, sondern auch global weitreichend sind (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung).

Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung unterscheidet drei Kategorien von Kippelementen: Ökosysteme, Strömungssysteme und Eiskörper.

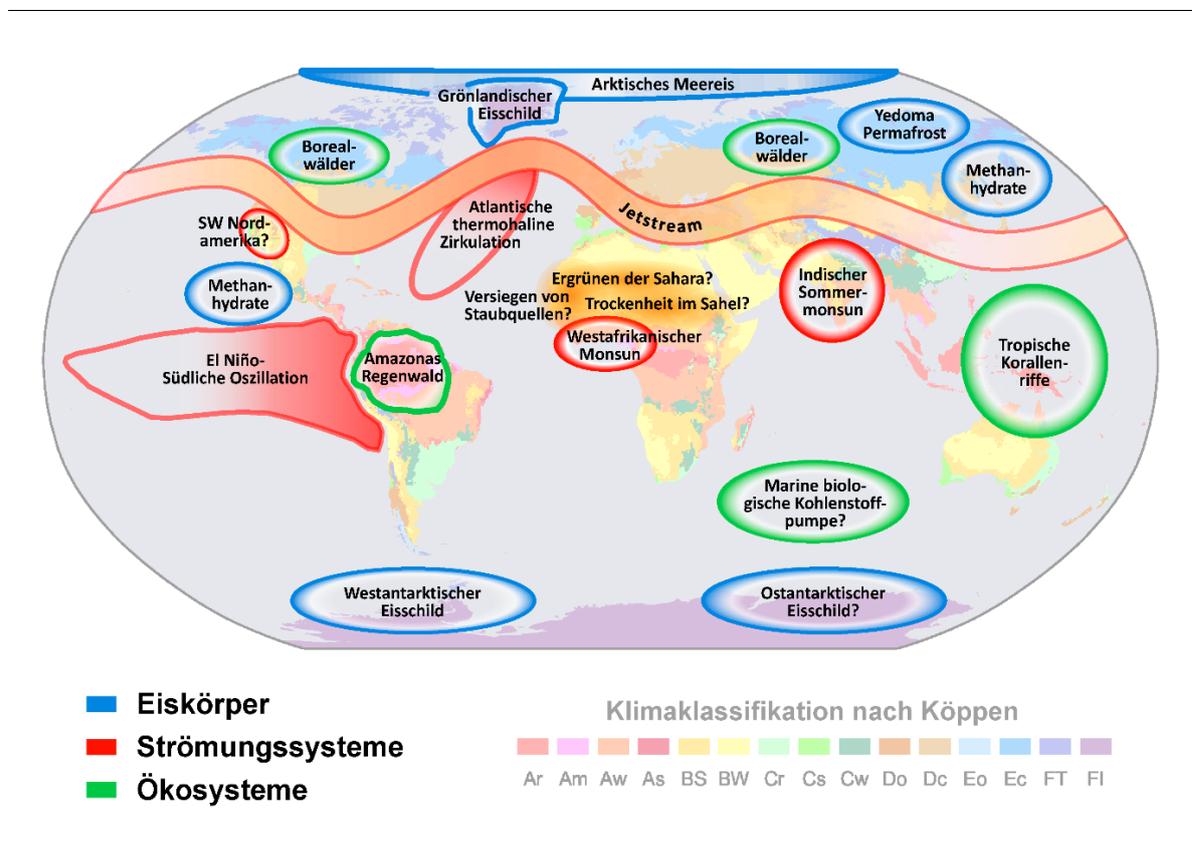


Abbildung 2: Geografische Einordnung der wichtigsten Kippelemente im Erdsystem

5.2.1 Ökosysteme

Temperaturänderungen können zu gravierenden Veränderungen der Lebensräume für Pflanzen, Tiere und Menschen führen. Manche Lebewesen schaffen es nicht, sich an die neuen Rahmenbedingungen der Ökosysteme anzupassen. Das Absterben der Korallenriffe, die Abholzung der Regen- und Borealwälder sowie die Versauerung der Ozeane zählen zu den Kippelementen der Ökosysteme (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung).

5.2.2 Strömungssysteme

Meeres- und Luftströmungen beeinflussen saisonal oder ganzjährig das Klima: dazu zählen das Zusammenbrechen der Atlantischen Thermohalinen Zirkulation oder des indischen und westafrikanischen Monsuns sowie fundamentale Änderungen der Jet Stream- und El Niño-Systeme. Aber auch ein Austrocknen des Südwestens in den USA zählt zu dieser Kategorie der Kippelemente (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung).

5.2.3 Eiskörper

Das Schmelzen von Eis basiert auf dem Eis-Albedo-Rückkoppelungseffekt, der durch die Reduktion der Albedo, die durch die Ablösung der Eisoberfläche durch eine andere dunklere Oberfläche verursacht wird, ausgelöst wird. Zu diesen Kippelementen gehören das Abschmelzen der Eismassen in der Arktis und Antarktis sowie auf dem Festland Grönlands. Auch das Auftauen der Permafrostböden in Nordamerika und Sibirien und das Austreten von Methan aus den Ozeanen zählen dazu (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung).

Fünf Kippelemente – die Versauerung der Ozeane, die Abschwächung der Atlantischen Thermohalinen Zirkulation, das Schmelzen des Meereises in der Arktis, das Schmelzen des Festlandeises Grönlands und die Freisetzung von ozeanischem Methan – sind für Grönland relevant. Sie werden im nächsten Kapitel beschrieben. Die entscheidende Frage ist, bei wieviel Grad globaler Erwärmung der Schwellenwert der Kippelemente erreicht wird. Da Studien den Schwellenwert meist mit zwei Grad Erwärmung vorhersehen, wurde im Klimaabkommen von Paris 2015 beschossen, die globale Erderwärmung auf höchstens zwei Grad zu begrenzen. Damit soll der „gefährliche Klimawandel“ verhindert werden (Bentz-Hözl, 2014; zit. n. Gschnaller et al., 2016). Fraglich bleibt, ob zwei Grad Erwärmung nicht bereits zu viel sind. Neuere Studien deuten auf eine tiefer liegende „Kipp-Grenze“ hin. Im Jahr 2015 haben sich 195¹² Länder als Ergebnis der Weltklimakonferenz (UNFCCC)¹³ dem Klimaabkommen verpflichtet. Es ist entscheidend, dass die Bedingungen auf globaler sowie nationaler Ebene eingehalten werden (Vaks et al., 2013; zit. n. Gschnaller et al., 2016).

¹² Das sind alle Länder der Welt, inklusive Nicaragua und Syrien, die zuletzt ihre Beitrittsabsicht bekannt gegeben haben, und den USA, die angekündigt haben, 2020 auszutreten.

¹³ Das Pariser Klimaabkommen ist die Nachfolgevereinbarung zum Protokoll von Kyoto vom Dezember 1994.

6. Auswirkungen auf Grönland und deren globale Folgen

Die Arktis und damit auch Grönland ist das am meisten vom Klimawandel beeinträchtigte Gebiet der Erde. Hier kann man Klimaschwankungen und langfristige Änderungen im Klimasystem am besten beobachten (NOAA, 2014; zit. n. Gschnaller et al., 2016). Auch wenn sich die Arbeit vorwiegend auf Grönland bezieht, gelten die meisten Prozesse natürlich auch für den Rest der Arktis und teilweise für andere Eismassen, wie die der Antarktis.

Die Vorgänge, die durch den Klimawandel in Grönland auftreten, beschränken ihre Auswirkungen nicht auf Grönland, sondern sind von globaler Bedeutung. Da die zentrale Wärmeregulierung und der Süßwasseraustausch der Ozeane von Grönland und der Arktis bestimmt werden, haben sowohl das Abschmelzen des Festland- als auch des Meereises Einfluss auf das globale Klimasystem (Gschnaller et al., 2016).

6.1 Eisschmelze in Grönland

Die Arktis besteht überwiegend aus Meereis, also aus auf Wasser schwimmenden Eisplatten. Grönland allerdings ist fast vollständig von einem Panzer aus Festlandeis bedeckt. Schmilzt dieses Festlandeis, bilden sich umliegende Eisplatten - das Schelfeis. Es ist nicht mehr auf Land, bleibt aber mit ihm verbunden. Eisberge sind die wiederum vom Schelfeis abbrechenden Eisstücke. Packeis besteht aus mehreren im freien Meer schwimmenden miteinander gekoppelten Eisplatten (Goruma).

Das Schmelzen des arktischen Meereises, das sich zu einem großen Teil um Grönland befindet, nahm in den letzten Jahrzehnten neue Ausmaße an. Beispielloos rasant verringert sich nicht nur die Ausbreitung, sondern auch die Dicke des Eises. Schneereiche Jahre täuschen eine Besserung des Zustands durch schnell wachsendes Eis im Winter vor, doch im Sommer geht mehr Eis verloren als nachwachsen kann (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung).

Im Vergleich zur durchschnittlichen globalen Erwärmung ist der Temperaturanstieg in der Arktis ungefähr doppelt so hoch (NOAA, 2014; zit. n. Gschnaller et al., 2016). Der mittlere Anstieg der weltweiten Temperatur des 20. Jahrhunderts betrug etwa 0,7 Grad. Abhängig von der betrachteten Region war die Erwärmung in der Arktis um das Doppelte bis Vierfache so groß. Dies bewirkt einen enormen Rückgang des Meer- sowie Festlandeises in Grönland und Umgebung. Grund dafür ist unter anderem das Phänomen der polaren oder auch arktischen Amplifikation (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung).

6.1.1 Polare / Arktische Amplifikation

Diesem Phänomen liegen größtenteils folgende drei Vorgänge zu Grunde: Der Eis-Albedo-Rückkoppelungseffekt, der selbstverstärkende Höhenverlust des grönländischen Inlandeises und das Zurückgehen des Packeises. Der Eis-Albedo-Rückkoppelungseffekt basiert auf den Änderungen der Albedo der Oberflächen, die durch das Schmelzen des Meereises ausgelöst werden. Der Eis-Albedo-Rückkoppelungseffekt ist ein Prozess positiver Rückkoppelung. Der Eisverlust ist direkte Folge sowie Teilgrund des Temperaturanstiegs (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung).

Da die Albedo sowohl von der Topografie als auch von der Farbe der Erdoberfläche abhängt, kommt es zu einer großen Änderung sobald sich diese zwei Komponenten hinreichend verändern. Genau das passiert bei dem Schmelzen von Meereis. Wo vorher eine helle Oberfläche wegen der Schnee- und Eisdecke vorhanden und die Albedo dadurch sehr hoch war, ist jetzt die dunkle Oberfläche des Meeres, die eine sehr geringe Albedo besitzt. Je niedriger die Albedo, desto mehr Wärme wird von der Erde absorbiert. Somit löst dunkle, stark absorbierende Oberfläche immer mehr die weiße, stark reflektierende ab. Die Albedo der Arktis sinkt drastisch. Dadurch verstärkt sich die Erwärmung, die wiederum das Schmelzen antreibt und somit noch mehr dunkle Oberfläche freisetzt, die mehr Wärme absorbiert. Es ist ein sich selbst antreibender Kreislauf, aus dem das Schmelzen des Eises und das Steigen der Temperatur folgt. Das Reflektieren des Meereises trägt wesentlich zur Temperaturregulierung des globalen Klimas bei (Bargali, 2008; zit. n. Gschnaller et al., 2016).

Studien nehmen an, dass der Schwellenwert bei einer Erwärmung von 0,5 bis 2 Grad erreicht wird. Der Eis-Albedo-Rückkoppelungseffekt ist das wichtigste Kippelement und außerdem ein reversibles Kippelement (Flachland, 2010; zit. n. Gschnaller et al., 2016).

Der zweite Rückkoppelungseffekt, der für die polare Amplifikation zuständig ist, ist der selbstverstärkende Höhenverlust des grönländischen Inlandeises. Die bis zu 3.500 Meter dicke Festlandeisdecke bedeckt beinahe ganz Grönland (Levermann et al., 2011). Die Eisdecke verliert rasant an Höhe, da im Sommer die Gletscher schnell schmelzen und in den Ozean fließen: Anfangs befindet sich die Eisoberfläche noch sehr hoch über dem Meeresspiegel, durch das Schmelzen sinkt diese jedoch und wird dadurch noch mehr erwärmt. Das wiederum verstärkt den Schmelzvorgang (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung).

Klimamodelle prognostizieren, dass, sollte das Inlandeis einmal seinen Schwellenwert erreicht haben, es unter den jetzigen Klimabedingungen nicht mehr zunehmen könnte (Toniazco et al., 2004; Ridley et al., 2010; zit. n. Levermann et al., 2011). Unsicher bleibt, bei welcher Temperaturerhöhung der Schwellenwert für dieses Kippelement erreicht wird. Das IPCC-AR4¹⁴ schätzte diesen 2007 auf etwa 3,6 bis 5,5 Grad Erwärmung direkt in Grönland. Diese würde wegen des Effekts der polaren Amplifikation bei einer globalen Klimaerwärmung von ca. 2,3 bis 3,9 Grad erfolgen. Laut dem IPCC-AR4 besteht die Möglichkeit, dass dieser Schwellenwert in diesem Jahrhundert erreicht wird. Diese Studie ist laut Levermann et al. (2007) allerdings kritisch zu betrachten, da sie mit Hilfe veralteter Parameter aus dem Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur und dem Schmelzen der Eisoberfläche erstellt wurde. Es gibt keine Beweise dafür, dass sie unter Berücksichtigung aktueller Klimaänderungen noch immer gültig sind.

Andere physikalische Ansätze, die auf Energie-Bilanz Modellen basieren anstatt sich allein auf Beobachtungen der Vergangenheit zu stützen, sehen den Schwellenwert bei einer höheren Temperatur. Trotzdem muss klar sein, dass es keine Beweise dafür gibt, dass das

¹⁴ IPCC ist die Abkürzung für „Intergovernmental Panel on Climate Change“. AR4 steht für „Fourth Assessment Report“.

Inlandeis überhaupt innerhalb der nächsten Jahrtausende komplett geschmolzen sein wird (Ridley et al., 2005; zit. n. Levermann et al., 2011).

Zu erwähnen ist außerdem eine weitere Folge, die das Schmelzen des grönländischen Inlandeises mit sich bringen könnte: einer der größten Süßwasserspeicher der Erde strömt in den Ozean. Kombiniert mit dem Schmelzen der Antarktis und den Gletschern unseres Planeten wird dies eventuell zu einer extremen globalen Wassernot führen.

Das dritte Kippelement, das ebenfalls auf positiver Rückkoppelung basiert und ausschlaggebend für die polare / arktische Amplifikation ist, ist das Zurückgehen des Packeises. Dieses dämpft den Wärmefluss aus dem Wasser, sodass die Wärme nicht in die Atmosphäre gelangt. Als Folge des stärkeren Schmelzens geht diese Schutzschicht zurück und der Ozean setzt mehr Wärme frei (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

6.1.2 Messungen und Prognosen

Messdaten belegen diese drastische Entwicklung. Zu Beginn des Jahres 2016 wurde ein neuer Rekord aufgestellt, was den Rückgang der Meereisdecke betrifft: Seit Satellitenaufzeichnungen für diesen Forschungszweck verwendet werden, wurde noch nie im Jänner eine so kleine Meereisausdehnung gemessen. Während im Jänner des Zeitraums von 1981 bis 2010 eine Ausdehnung von etwa 14,4 Millionen km² aufgezeichnet wurde, betrug sie im Jänner 2016 nur noch etwa 13,5 Millionen km² (Alfred-Wegner-Institut, 2016; zit. n. Gschnaller et al., 2016). Klimamodelle deuten darauf hin, dass, falls sich dieser rasante Erwärmungstrend auch über die nächsten Jahrzehnte fortsetzt, das arktische Meer bereits im Zeitraum von 2030 bis 2040 beinahe eisfrei sein könnte (Wang und Overland, 2012; zit. n. Gschnaller et al., 2016). Da Klimamodelle allerdings nur mit sehr beschränkter Sicherheit imstande sind, Prognosen zu treffen, sind diese Vorhersagen eher als Vermutungen zu werten. Den Klimamodellen ist es bis heute nicht möglich, die Kryosphäre¹⁵ umfangreich zu modellieren und dadurch Vorhersagen für die Eisschmelze und deren Auswirkungen zu machen (Strahlendorff et al., 2016; zit. n. Gschnaller et al., 2016).

¹⁵ Die Kryosphäre umfasst alle gefrorenen Wasservorkommen auf der Erde. Dazu zählen Gletscher, Permafrost, Meereis, Schelfeis, Schnee und alle anderen zugefrorenen Gewässer. Wegen ihrer hohen Albedo spielt sie eine große Rolle in der Klimaregulierung (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

6.2 Freisetzung von Methan

Methan ist in Permafrostböden sowohl auf Land als auch am Meeresgrund in der Form von Methanhydraten¹⁶ gespeichert. Methanhydrate bilden den größten Anteil der globalen fossilen Kohlenstoffvorkommen. Wenn diese durch das Tauen des Meereises freigesetzt werden, so würde dies große Auswirkung auf den Treibhauseffekt haben: Methan ist ein Treibhausgas, dessen Klimawirkung jene von Kohlenstoffdioxid bei weitem übersteigt (Treude, 2013).

Beobachtungen der Klimageschichte lassen auf einen Zusammenhang zwischen warmen Perioden und der Freisetzung von großen Massen Methans aus Methanhydraten schließen. Klimamodelle suggerieren einen sehr langsamen Prozess der Freisetzung durch Erwärmung. Außerdem soll nur ein Bruchteil der sich im relativ seichten Wasser befindlichen Methanhydrate betroffen sein (Treude, 2013). Die Freisetzung vom Methan der Ozeane wird wegen seines sehr langsamen Kippens nach dem Erreichen des Schwellenwertes als träges Kippelement klassifiziert. Trotzdem ist seine Bedeutsamkeit nicht zu vernachlässigen, da Methan ein potentes¹⁷ Treibhausgas ist (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung).

Besonders betroffen ist die Arktis, da sich hier wegen perfekter Temperatur- und Druckvoraussetzungen zur Bildung von Methan sehr viele Methanhydrate befinden (Kvenvolden, 1993a, Suess und Haeckel, 2012; zit. n. Treude, 2013). Methan bildet sich in Seesedimenten, also nur an jenen Stellen, an denen sich genügend organisches Material befindet. Stabile Methanhydrate befinden sich bei einer durchschnittlichen Temperatur von 0 bis 4 Grad in der Tiefe von etwa 500 Metern und darunter. In der Arktis trifft man sie bereits ab 300 Metern unter dem Meeresspiegel an (Hester und Brewer 2009; zit. n. Treude, 2013).

¹⁶ Methanhydrate sind in Sedimenten eingeschlossene Strukturen, die mit Eis vergleichbar sind. In ihnen befinden sich Methanmoleküle, die von Molekülen einer anderen Substanz an den Platz gebunden sind (Kvenvolden 1993a, Suess & Haeckel, 2010; zit. n. Treude, 2013).

¹⁷ Sobald es in die Atmosphäre gelangt, oxidiert innerhalb von zehn Jahren ein Großteil des Methans zu Kohlendioxid. Dieses wiederum ist ein Treibhausgas, das die Erde über Jahrtausende erwärmt (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung).

Methan wird durch Erwärmung der Luft abgebaut, die auf die Meeresoberfläche trifft, welche diese Wärme absorbiert. In einem langsamen Vorgang (sogenannte langsame Konduktion) erreicht das wärmere Wasser den Meeresgrund. Schneller erfolgt dies durch Strömungen und Aufwirbeln des Wassers. Abhängig von der Tiefe, in der sich die Vorkommen befinden, werden die Methanhydrate langsamer oder schneller destabilisiert und dadurch das gelagerte Methangas in Form von Gasblasen freigesetzt. Die Schätzungen des dafür notwendigen Zeitraums reichen von Jahrzehnten bis Jahrhunderten. Daher wird es als träges Kippelement bezeichnet (Treude, 2013).

Die Arktis ist besonders davon betroffen, da sich die Ablagerungen in seichteren Gewässern befinden und somit die Wärme schneller die Seesedimente erreicht. Außerdem existiert eine große Anzahl an fossilem Methan, das durch das Schmelzen der Permafrostböden freigesetzt werden kann. Es existieren Studien, die starke Methanfreisetzungen in Sibirien (Shakhova et al., 2010; zit. n. Treude, 2013) und Nord-West Spitzbergen (Westbrook et al., 2009; zit. n. Treude, 2013) belegen. Die Forschung vermutet, dass es nur eine Frage der Zeit ist, dass das gleiche auch in der Nähe Grönlands gemessen werden kann (Treude, 2013).

Es besteht die Möglichkeit, dass Mikroorganismen in den Seesedimenten einen Großteil des Methangases davon abhalten würden, die Atmosphäre zu erreichen. Somit besteht die Hoffnung, dass eine Situation, die für das globale Klima problematisch wäre, eingedämmt werden kann. Es gibt zwei Arten von Prozessen, bei denen Mikroorganismen Methanemissionen verringern (Treude, 2013).

6.2.1 Anaerobe Methanoxidation

Der anaerobe Abbau läuft ohne Hilfe von Sauerstoff ab. Mikroorganismen transformieren Methan in einem komplexen Prozess zu Hydrogencarbonat. Ist die richtige chemische Zusammensetzung der Seesedimente gegeben, reagiert das Hydrogencarbonat mit Kalziumionen zu Kalziumkarbonat und damit zu Kalkstein. Somit bleibt es an den Meeresgrund gebunden. Zum anaeroben Abbau kommt es überwiegend in Seesedimenten (Knittel & Boetius, 2009; zit. n. Treude, 2013).

6.2.2 Aerobe Methanoxidation

Der aerobe Abbau findet mit Hilfe von sauerstoffnutzenden Bakterien statt. Sie oxidieren das Methan zu Kohlendioxid, das allerdings zur Versauerung der Ozeane beiträgt. Der aerobe Abbau erfolgt überwiegend im Meerwasser (Treude, 2013).

Das jährlich von Mikroorganismen oxidierte Methan wird auf 80 bis 90 Prozent des gesamten freigesetzten Methans geschätzt (Reeburgh, 2007; Knittel & Boetius, 2009; zit. n. Treude, 2013). Das Funktionieren des Abbaus hängt wesentlich mit der Geschwindigkeit der globalen Erwärmung, der Tiefe des Meeres und den Meeresströmungen zusammen. Die Reaktion der Bakterien erfolgt bei einer rasanten Erwärmung mit großer Verzögerung und wenig Effektivität. In seichten Gebieten wie der Arktis kommen die Gasbläschen schneller in die Atmosphäre. Strömungen verdünnen das Methan im Wasser und erschweren somit den Abbau (Treude et al., 2003; zit. n. Treude, 2013). Sollte es zu einem schnellen Abbau kommen, prognostizieren Forscher fortschreitende Versauerung der Meere, sauerstofffreie Zonen und weitere globale Erwärmung (Zachos et al., 2005; Jiang et al., 2006; zit. n. Treude, 2013).

6.3 Versauerung der Ozeane

Erhöhte Treibhausgasemissionen verursachen nicht nur Klimaerwärmung, sondern auch die Versauerung der Ozeane. Der wachsende Anteil von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre bewirkt eine um 30 Prozent höhere Versauerung der Meere als vor der industriellen Revolution. Besonders die kalten Ozeane an den Polen sind gefährdet, da sie etwa doppelt so schnell versauern wie der Rest der Meere. Denn je geringer die Temperatur des Wassers, desto schneller wird Kohlendioxid aufgenommen. Aktuelle Studien prognostizieren, dass das Meer um Grönland das erste sein wird, das einen kritischen Zustand der Versauerung erreichen wird. Laut diesen Studien soll ein Zehntel der Arktis innerhalb des nächsten Jahrzehnts so viel Kohlenstoffdioxid aufgenommen haben, dass die Versauerung im Meer jedes Leben dort ernsthaft beeinträchtigt. Wissenschaftler befürchten, dass dieses Phänomen genauso gefährlich für unser Klimasystem sein könnte wie die Klimaerwärmung (Mitchell, 2010).

6.3.1 Wie funktioniert Versauerung?

Die Verbrennung fossiler Rohstoffe befördert uraltes Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre. Dadurch wurde der Anteil des Kohlenstoffdioxids in der Atmosphäre von 0,03 auf 0,04 Prozent durch Einwirkung des Menschen erhöht (Mitchell, 2010). Dies scheint ein geringer Wert zu sein, stellt aber den höchsten Wert der letzten 800.000 Jahre dar. Ein Viertel davon wird wieder in den Ozeanen gespeichert. Im Wasser wird es zu Kohlensäure. Pro Tag werden den Ozeanen ca. 22 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid zugeführt. Seit der industriellen Revolution ist der durchschnittliche globale pH-Wert¹⁸ des Wassers an der Oberfläche der Meere bereits von 8,2 auf 8,1 abgefallen. Das ist ein Mittelwert aller Ozeane. Regional, wie zum Beispiel in der Arktis, können die Schwankungen viel größer sein. Sollte der pH-Wert weiterhin fallen und Werte von 7,0 oder weniger erreichen, wäre das Oberflächenwasser nicht mehr basisch sondern sauer (Feely, 2010).

¹⁸ Der pH-Wert gibt an, ob ein Stoff basisch oder sauer ist. 7,0 ist neutral, alles darunter sauer, alles darüber basisch.

6.3.2 Auswirkungen der Versauerung

Am meisten leidet das Ökosystem unter der Versauerung, da der hohe Kohlensäureanteil unmittelbare Auswirkungen auf die Biodiversität hat. Die Lebensbedingungen von Fauna und Flora, die vom Meereis abhängig sind, werden drastisch verändert (Gschnaller et al., 2016). Einheimische Arten, wie etwa Korallen, Muscheln, Seeschnecken, Krabben und Plankton werden von invasiven verdrängt, die sich dank der neuen Bedingungen ausbreiten können (Mitchell, 2010).

Je mehr Kohlensäure sich im Wasser befindet desto weniger Kalzium ist vorhanden. Pflanzen und Tiere, die auf Kalzium angewiesen sind, um Panzer oder knochenähnliche Strukturen zu bilden, leiden unter dieser Entwicklung. Korallenriffe verlieren ihre Größe und Diversität und Austern werden zerbrechlicher. Tiere können nicht richtig ausreifen, Fische verlieren teilweise ihre Fähigkeit sich zu orientieren und zu riechen (Mitchell, 2010). Auch verhindert der niedrigere pH-Wert, dass zum Beispiel Fische und Tintenfische ihre volle Atemkapazität nützen können (Feely, 2010).

Plankton benötigt für den eigenen Aufbau zunehmend mehr Energie, die sie eigentlich für die Regulierung der grundlegenden Funktionen des Meeres verwenden sollten (Mitchell, 2010). Die Versauerung der Meere behindert viele Pflanzenarten bei ihrer Aufgabe, den Ozean zu säubern. Diese Auswirkungen der Versauerung werden folgenschwere Beeinträchtigungen verursachen. Die Wissenschaft kann aber derzeit den genauen Grad der Veränderungen nicht bestimmen, da sich die Forschung in diesem Gebiet noch in einem Anfangsstadium befindet (Feely, 2010).

6.4 Abschwächungen der Atlantischen Thermohalinen Zirkulation

Meeresströmungen beeinflussen das Klima maßgebend. Sie kontrollieren den Wasser- sowie Energiekreislauf des Planeten durch den Transport von Energie durch Meerwassermengen (Levermann, 2016). Ozeanströmungen resultieren hauptsächlich aus Zirkulationen von Winden wie zum Beispiel den West- und Passatwinden und der Corioliskraft¹⁹. Die meisten der Meeresströmungen sind miteinander verbunden und werden zusammenfassend als das Große Marine Förderband oder als Thermohaline Zirkulation (THC) bezeichnet (Bildungswiki Klimawandel). Einen Teil davon bildet die Atlantische Thermohaline Zirkulation (auch Atlantische Meridionale²⁰ Umwälzbewegung), zu welcher auch der Golfstrom zählt. Sie ist ein umfangreicher Mechanismus innerhalb des Atlantischen Ozeans, der als Förderband von Wärme fungiert (Levermann, 2016).

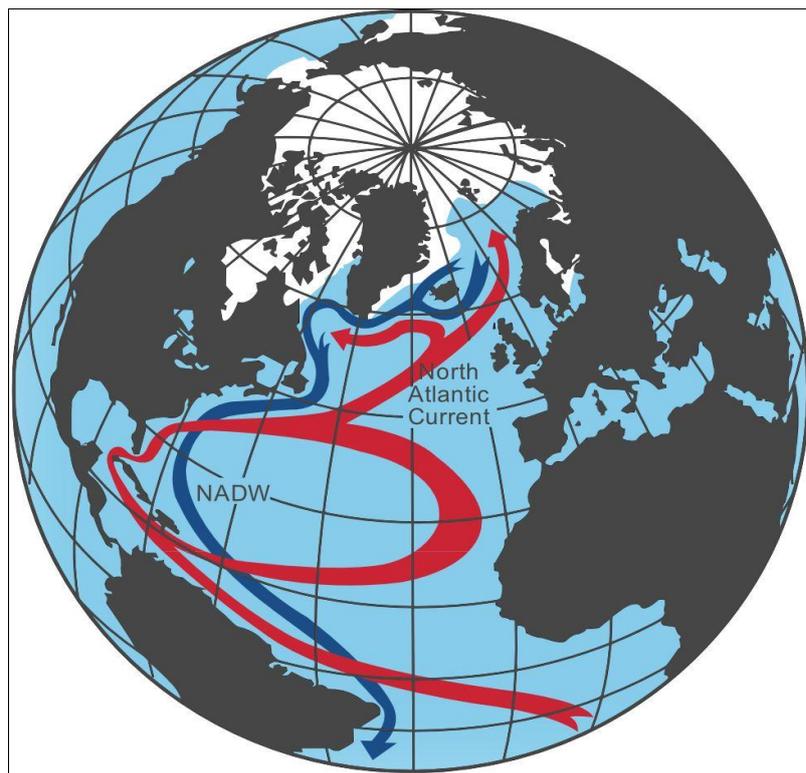


Abbildung 3: Schema der Atlantikzirkulation. Oberflächenströme in rot, Tiefenströme in blau, Meeresisdecke im Winter in weiß

¹⁹ Corioliskraft: Die Erde ist ein rotierender Körper. Die Corioliskraft geht auf diese Erdrotation zurück und wirkt auf Objekte, die sich auf der Erde bewegen (Levermann, 2016).

²⁰ Meridional bezeichnet die Ausrichtung der Umwälzbewegung nach Süden und Norden (Levermann, 2016).

Die Wassermenge von 15 Millionen Kubikmetern transportiert etwa 1 Petawatt²¹ der Wärme (Ganachaud und Wunsch, 2000; zit. n. Levermann et al., 2011) pro Sekunde von der Süd- zur Nordhalbkugel (Levermann, 2016).

6.4.1 Der Mechanismus der THC

Mehrere miteinander zusammenhängende physikalische Prozesse liegen der THC zugrunde. Es ist ein komplexes Zusammenspiel von Anziehungskraft des Mondes, Winden und wasserbedingten Dichteunterschieden. Die Zirkulation funktioniert folgendermaßen: auf der Oberfläche des Südatlantiks strömt warmes, salzreiches Wasser in den Nordatlantik. Dort sinkt es ab und fließt zurück (Levermann, 2016). Der wichtigste Motor der Umwälzungsströmung ist die Bildung von Tiefenwasser. Tiefenwasser ist sehr kaltes und stark salzhaltiges Wasser, welches entsteht, wenn die Lufttemperatur extrem niedrig ist und die Oberfläche des Meeres einen hohen Salzgehalt besitzt. Sind diese Anforderungen erfüllt, steigt der Salzgehalt des Wassers noch weiter an, es wird dichter und sinkt zum Meeresgrund. Somit wird das andere, leichtere Wasser verdrängt und gelangt zur Oberfläche. Es kommt zu einer Umwälzbewegung. Dies findet zum Teil in der Nähe von Grönland statt. Ein weiterer Motor sind die Winde, die die Umwälzbewegung zusätzlich verstärken (Bildungswiki Klimawandel).

Es gibt zwei Erklärungsansätze in der Forschung für das Zustandekommen dieser Zirkulation. Der erste Ansatz beschreibt die Durchmischung von warmem und kaltem Wasser als einen Prozess, der verteilt über den gesamten Atlantik kontinuierlich stattfindet. Die zweite Theorie sagt aus, dass das Aufsteigen nur an einer bestimmten Stelle des Südatlantiks stattfindet. Winde und Bodentopographie seien dafür die Auslöser (Levermann, 2016).

6.4.2 Wie wirkt sich der Klimawandel auf die Zirkulation aus?

Die Stärke der Zirkulation wird unter anderem von der Dichte des Wassers des Nordatlantiks, die vom Salzgehalt abhängt, beeinflusst (Levermann et al., 2011). Diese wird durch folgende drei Aspekte bestimmt. Erstens bewirkt die Klimaerwärmung einen erhöhten Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre, folglich auch erhöhte Niederschläge in

²¹ 10^{15} Watt entsprechen einem Petawatt.

Grönland. Zweitens verringert der Eis-Albedo-Rückkoppelungseffekt den Salzgehalt des Meeres dadurch, dass immer weniger Meereis gebildet wird: beim Entstehen von Meereis wird Salz in das umliegende Meerwasser abgegeben. Drittens kommt hinzu, dass vermehrt geschmolzenes Süßwasser Grönlands in den Ozean fließt. Diese drei Vorgänge lassen ein salzärmeres und wärmeres Wasser entstehen. Somit wird die Bildung von Tiefenwasser abgeschwächt und die atlantische THC verlangsamt (Levermann, 2016).

Zwei der Hauptregionen, in denen Tiefenwasser gebildet wird, sind das Zentrale Grönländische und das Zentrale Labrador Meer (Abb.). Es wird vermutet, dass die Atlantische Thermohaline Zirkulation stark auf verhältnismäßig kleine Änderungen der Bedingungen dieser Regionen reagiert. Die „Odden Eiszunge“ im grönländischen Meer war vermutlich eine wichtige Stütze des funktionierenden Systems. Diese verschwand allerdings 1998. Es ist wahrscheinlich, dass dies zu einer geringeren Bildung von Tiefenwasser beiträgt (Levermann et al., 2011).

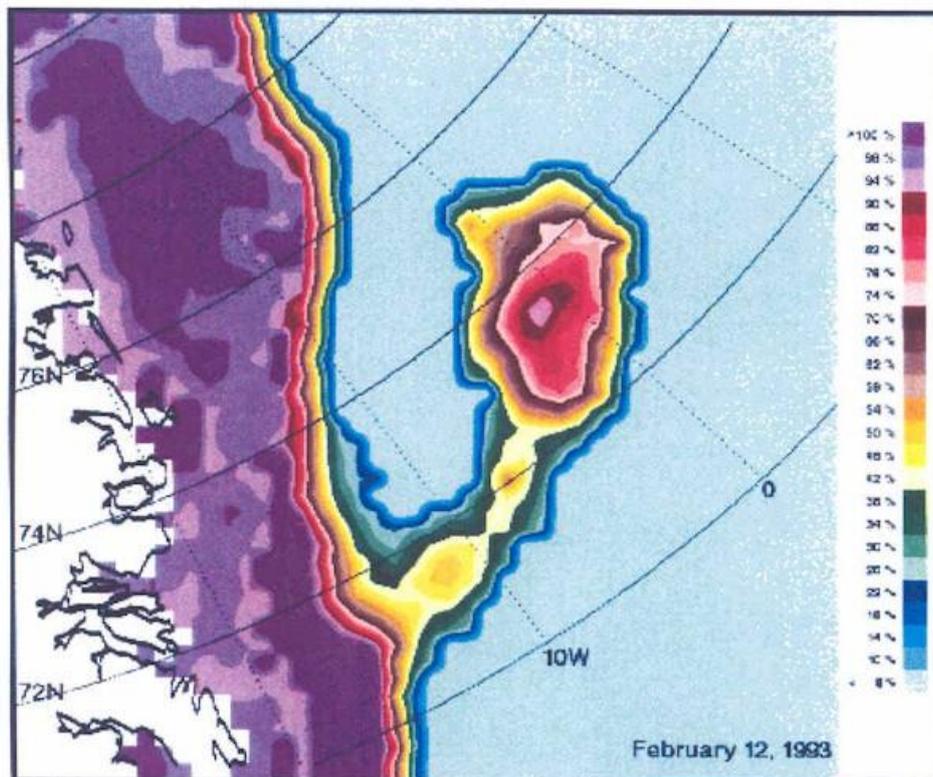


Abbildung 4: Die Odden Eiszunge im Grönland Meer 12. Februar 1993, Satellitenbild

6.4.3 Globale Auswirkungen der Abschwächung der Atlantischen Thermohalinen Zirkulation

Die Atlantische Thermohaline Zirkulation besteht schon seit langer Zeit, doch sie war keineswegs stabil. In der letzten Glazialzeit fanden grundlegende Änderungen statt, ausgelöst durch globale Klimastörungen. Seit damals können keine großen Schwankungen in der Umwälzströmung erkannt werden (Levermann, 2016). Allerdings bestehen Hinweise für eine langsame Abschwächung. Messungen zeigen, dass eine weitreichende Versüßwasserung in den nördlichen Breiten im Gange ist (Levermann et al., 2011). Das Ausmaß der Reaktion der Atlantischen Thermohalinen Zirkulation auf das verringerte Tiefenwasser ist ungeklärt. Die meisten Klimamodelle prognostizieren eine Verlangsamung, ein absoluter Kollaps ist hingegen unwahrscheinlich (Levermann, 2016).

Die IPCC-AR4 schätzte die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenbruchs der Atlantischen Thermohalinen Zirkulation in diesem Jahrhundert auf ca. zehn Prozent. Außerdem wird vermutet, dass das Stoppen der Atlantischen Thermohalinen Zirkulation reversibel ist. Das heißt, sollte wieder genügend salzhaltiges Wasser vorhanden sein, würde sie wieder funktionieren (Levermann et al., 2011).

Eine wesentliche Reduktion der Atlantischen Thermohalinen Zirkulation würde dazu führen, dass sich das im nördlichen Eismeer transportierte Wasser um etwa acht Grad abkühlt. Somit würde möglicherweise der Golfstrom Nordeuropa nicht mehr so stark erwärmen (Vellinga und Wood, 2002, zit. n. Levermann et al., 2011). Für das europäische Klima würde das weniger Niederschläge bedeuten. Weiters würde sich das Windsystem ändern. Westliche Winde würden vom Norden in Richtung Mittelmeer wandern und der Meeresspiegel an den westeuropäischen Küsten würde etwa um einen Meter steigen (Laurian et al., 2009, zit. n. Levermann et al., 2011).

Auch in Nordamerika würde beim Kollaps der Atlantischen Thermohalinen Zirkulation der Meeresspiegel ansteigen. Dies würde wiederum eine globale Erhöhung des Meeresspiegels bewirken: der heute beobachtbare Anstieg des Meeresspiegels würde sich verzehnfachen (Levermann, 2011). Das Ökosystem des Atlantiks würde mit großer Wahrscheinlichkeit geschädigt werden (Schmittner, 2005, Kuhlbrodt et al., 2009, zit. n. Levermann et al., 2011).

Als weitere Konsequenz würde sich der tropische Regenwaldgürtel im atlantischen Sektor Hunderte von Kilometern in Richtung Süden verschieben. Dieses neue Klima würde die Lebensbedingungen der Bewohner des Amazonasregenwaldes und Westafrikas wesentlich verändern (Schmittner, 2005, Kuhlbrodt et al., 2009, zit. n. Levermann et al., 2011).

Darüber hinaus prognostizieren die Klimamodelle als weitere Folgen das Zusammenbrechen des asiatischen Monsunsystems und gravierende Änderungen des pazifischen El Niño Systems (Levermann, 2016).

6.5 Anstieg des Meeresspiegels

Durch die Eis-Albedo-Rückkoppelung und deren Auswirkungen ist das grönländische Eisschild von essentieller Bedeutung bei der Risikoabschätzung für den globalen Meeresspiegelanstieg: das Schmelzen des in grönländischem Eis gespeicherten Wassers würde einen globalen Meeresspiegelanstieg von etwa sieben Metern bewirken (Levermann et al., 2011). Globale Temperaturschwankungen von zwei bis fünf Grad können eine Änderung des Meeresspiegels von weit über zehn Metern verursachen. Dies wird durch Analysen der Klimavergangenheit belegt. Diese Vorgänge in der Vergangenheit sind vermutlich stufenartig über lange Zeitabstände passiert. Die Übertragung dieser Modelle der Klimavergangenheit in die Zukunft muss mit Vorsicht geschehen, zu viele unerforschte Faktoren spielen hierbei eine Rolle (Levermann et al., 2011).

Die Forschung schätzt die globale Erwärmung im 20. Jahrhundert auf etwa 0,6 bis 0,8 Grad und den daraus folgenden Meeresspiegelanstieg auf 0,15 bis 0,2 Meter (Church and White, 2006, zit. n. Levermann et al., 2011). Untersucht wurde auch, aus welchem schmelzenden Wasser sich diese 0,15 bis 0,2 Meter zusammensetzen. Der Anteil von Gebirgsgletscherwasser, Eiskappen und dem thermosterischen Anstieg²² wird auf etwa 0,1 bis 0,15 Meter geschätzt. Es wird angenommen, dass der Rest sich aus dem schmelzenden Eis Grönlands und der Antarktis zusammensetzt (Levermann et al., 2011).

Eine genaue Datenerhebung bezüglich des Meeresspiegelanstiegs findet erst seit den 1970er Jahren statt. Seitdem kann belegt werden, dass sich der Beitrag Grönlands und des westlichen Eisschildes der Antarktis immer weiter vergrößert (Velicogna, 2009, zit. n. Levermann et al., 2011). Die Klimamodelle, die sich auf die Entwicklung der Eisschilde beziehen, haben diesen Ablauf jedoch nicht prognostiziert. Daraus hat die Forschung gelernt, dass das Schmelzverhalten von Eismassen nicht genau abgebildet werden kann. Deshalb ist auch die Schätzung des IPCC 2007, wonach der Meeresspiegel bis zum Jahr 2100 um 0,2 bis 0,6 Meter ansteigen soll, nicht mehr auf dem neuesten Forschungsstand. Es wird

²² Die Ozeane expandieren dadurch, dass sie erwärmt werden. Der thermosterische Anstieg trug den größten Teil zum Meeresspiegelanstieg des letzten Jahrhunderts bei (Bildungswiki Klimawandel).

nun von vielen Forscher vermutet, dass die bisherigen Klimamodelle die Auswirkungen des Schmelzens fundamental unterschätzten (Rahmstorf, 2007, zit. n. Levermann et al., 2011). Alternative Berechnungen schätzen den Beitrag allein der Eisschmelze in Grönland zum Meeresspiegelanstieg bis zum Ende dieses Jahrhunderts auf bis zu 1,4 Meter (Pfeffer et al., 2008 zit. nach Levermann et al., 2011). Diese Berechnungen beziehen auch die Geschwindigkeit mit ein, mit der das geschmolzene Eis in die Ozeane strömt. Der globale Anstieg des Meeresspiegels würde durch die Berücksichtigung der Antarktis²³ wesentlich höher sein (Levermann et al., 2011).

Die Vorstellung, dass ein globaler Meeresspiegelanstieg eine gleichmäßige Erhöhung des Wasserspiegels auf der Erde bewirken würde, ist falsch. Das Schmelzen der riesigen Eisvorkommen kann zu Änderungen im Gravitationsfeld unseres Planeten führen. Neue Klimamodelle belegen, dass das Abschmelzen der großen Eiskörper eine Reduktion der Gravitationskraft in diesen Regionen bewirkt. Das führt dazu, dass der regionale Anstieg des Meeresspiegels wesentlich höher als der globale Durchschnitt sein kann. Sogar ein Absinken ist regionalspezifisch möglich (Kopp et al., 2010, Yin et al., 2009, Stammer, 2008, Levermann et al., 2005, zit. n. Levermann et al., 2011).

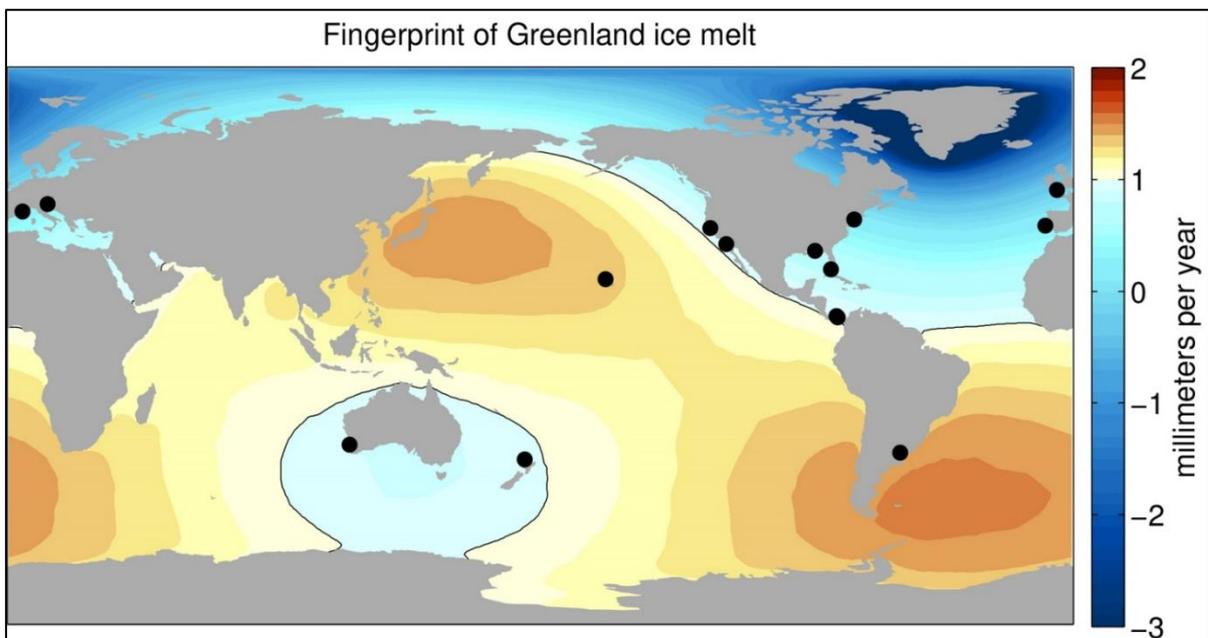


Abbildung 5: Durch die Eisschmelze in Grönland ausgelöster globaler Meeresspiegelanstieg

²³ Das komplette Abschmelzen der Antarktis würde einen globalen Meeresspiegelanstieg von 50 Metern bewirken (Levermann et al., 2011).

6.5.1 Beispiel Europa

Die überwiegende Mehrheit der bestehenden Dämme in Europa, die die tief gelegenen Regionen vor Überflutungen bewahren, könnte gerade einmal einem Meeresspiegelanstieg von einem Meter standhalten. Sobald diese Schwelle überschritten wird, müssten praktisch alle Dämme Europas umgebaut werden. Dies würde zu enormen Kosten führen. Doch auch erhöhte Dämme sind nur begrenzt effektiv. Die ForscherInnen vermuten, dass ab einem gewissen Anstieg des Wasserspiegels alle Bemühungen, das Meer zurückzuhalten, vergeblich wären. Bei welchem Wert diese Grenze erreicht wird, ist jedoch unklar. Wie bereits erwähnt, haben die Eismassen Grönlands allein die Kapazität, den Meeresspiegel um ca. sieben Meter zu erhöhen. Trifft das ein, wären fast die ganzen Niederlande, Teile Belgiens, Deutschlands, Italiens, der Ukraine, Rumäniens und Russlands überflutet (Levermann et al., 2011).

6.5.2 Beispiel Asien

Vor allem Süd-Ostasien trifft ein Anstieg des Meeresspiegels besonders hart. Länder wie China, Bangladesch, Thailand, Myanmar und Indien werden mit großen überfluteten Landteilen und Millionen von Flüchtlingen umgehen müssen. Als besonders gefährdet gelten die großen Wasserdeltas Asiens. Sie liegen meist nur ein paar Meter über dem Meeresspiegel. Zu der Überflutung kommt das Problem des durch Salzwasser verunreinigten Grundwassers. Diese Gebiete liegen in einigen der ärmsten Ländern der Welt. Eine Bevölkerung von über 200 Millionen Menschen wäre betroffen. Eine asiatische Flüchtlingskrise würde wahrscheinlich zu einer globalen werden (Bildungswiki Klimawandel).

6.6 Ressourcenabbau

Die Klimaerwärmung kann in der Arktis sowie in Grönland nicht nur negative, sondern auch positive Auswirkungen haben. Die polare Amplifikation ermöglicht einen besseren Zugang zu den einst tief im Eis verborgenen Ressourcen. Durch den Klimawandel entstehen neue Möglichkeiten, aus der Arktis wirtschaftlichen Profit zu schöpfen. Das Schmelzen des Eises setzt eine ungeheure Menge an Rohstoffen von globaler Bedeutung frei. Noch dazu ist nur ein Bruchteil der vermuteten Rohstoffvorkommen bis jetzt entdeckt worden. Somit entsteht ein bisher kaum genütztes geoökonomisches Potenzial Grönlands (Gautier et al, 2009, zit. n. Gschnaller et al, 2016).

Ökonomisch sind auf Grund der globalen Nachfrage die Ressourcen Erdgas und Erdöl am bedeutendsten. 2008 schätzte das U.S. Geological Survey (USGS), dass ungefähr dreizehn Prozent der bis jetzt unentdeckt gebliebenen Ölvorkommen und etwa 30 Prozent der Erdgasvorkommen nördlich des Polarkreises eingeschlossen sind (Gschnaller et al, 2016).

Bis jetzt konnten nur Lagerstätten auf dem Festland nachgewiesen werden. Aber auch das Vorkommen mineralischer Rohstoffe im Boden unter dem Meereis wird von Forschern als sehr plausibel angesehen (Damm et al., 2016). Diese Lagerstätten werden größtenteils in einer Tiefe von 500 Metern unterhalb des Meeresspiegels vermutet. Doch es gibt nicht nur energetische Ressourcen in der Arktis. Große Mengen an Seltenen Erden, Industriemineralien wie Phosphat und Edelmetallen (Gold, Silber, Platin etc.), verschiedenen Edelsteinen (auch Diamanten), Eisenerz, Nickel, Kupfer liegen in der Arktis verborgen (BGR 2014, zit. nach Gschnaller et al, 2016). Die Vorkommen verteilen sich zu 70 Prozent auf das arktische Alaska-Becken, das Amerasische Becken, das Westgrönland-Ostkanada-Becken, das Ost-Barents-Becken und das östliche Grönland-Becken (Sander et al, 2015, Lasserre und Pelletier, 2011, zit. n. Gschnaller et al, 2016).



Abbildung 6: Klimawandel und Rohstoffe

Bereits in den 1930er Jahren wurden in den betroffenen Regionen Erkundungsexpeditionen durchgeführt. Damals stieß man auf mehr als 450 beachtliche Lagerstätten auf dem Festland und auch auf vereinzelt im Schelfeis. Elf „Giants“ (Riesenvorkommen) befinden sich darunter (Damm et al., 2016).

Grönland und seine Umgebung besitzen eines der größten Vorkommen weltweit an Gold, Diamanten, Eisenerz, Blei, Zink und Uran (BGR 2012a, 2012c). In den 1970er Jahren durchgeführte erfolgreiche Bohrungen belegen, dass es in Grönland das weltweit größte Kohlenwasserstoffvorkommen gibt. Diese Voraussetzungen machen Grönland für Großunternehmen interessant. Zurzeit führen diese allerdings erst Explorationsstudien durch (Damm et al., 2016).

Bereits heute stammen etwa 10 Prozent des global gewonnen Erdöls und 25 Prozent des Erdgases aus Ressourcenvorkommen des arktischen Festlandes (Damm et al., 2016). Ölkonzern-Giganten wie Shell, ENI oder die OMV sind in der Arktis tätig und bauen darauf, dass weitere Vorkommen in naher Zukunft zugänglich werden. Der Abbau von Ressourcen unter solch extremen Umständen, wie sie in der Arktis herrschen, bringt einige Risiken mit sich. Das extreme Wetter erschwert den Abbau und Transport enorm. Es entstehen somit große, zusätzliche Kosten, um sichere Bohrungen gewährleisten zu können (Conley 2013 zit. n. Gschnaller et al., 2016).

Die Klimaerwärmung ermöglicht einen profitablen Abbau dieser Ressourcenvorkommen und die zunehmend eisfreien Gewässer deren günstigen Schifftransport (Sander et al, 2015, Lasserre und Pelletier, 2011, zit. n. Gschnaller et al., 2016).

Die Einwohner Grönlands hoffen auf die baldige Möglichkeit, diese Vorkommen abbauen zu können und dadurch eine größere wirtschaftliche Selbstständigkeit gegenüber Dänemark zu erlangen. Damit könnte Grönland sich von der Abhängigkeit zur bestehenden Haupteinnahmequelle, dem Export von Fisch und Krabben, lösen. Der Klimawandel, die Versauerung des Meeres und die Überfischung beeinträchtigen diese Einnahmequelle sehr stark. Die steigenden Temperaturen und die geringeren Niederschlagsmengen machen ein traditionelles Leben für die indigene Bevölkerung schwer. Sie sind auf den künftigen Abbau von Ressourcen angewiesen (Rüttinger et al., 2015, zit. n. Gschnaller et al., 2016).

7. Fazit

Kaum ein anderes Gebiet wird so stark vom globalen Klimawandel beeinflusst wie Grönland. Es ist wegen der speziellen Bedingungen, die in der Arktis vorherrschen, eine Ausnahmeregion, da zahlreiche Klimafolgen vorzufinden sind. Die bedeutendsten Faktoren sind hierbei die Überproportionalität des Temperaturanstiegs sowie der Eisschmelze und die Änderung der Meerestemperatur.

Aus diesen drei Faktoren lässt sich jedes Phänomen herleiten, das in dieser Arbeit beschrieben wird. Zugrunde liegen ihnen Kipp- und Rückkoppelungseffekte, die unser Klimasystem aus dem Gleichgewicht bringen oder auch ausbalancieren können. Essentiell sind dabei die Schwellenwerte, bei denen diese Effekte ausgelöst werden. Der Klimawandel in Grönland führt zu Auswirkungen, die globale Änderungen im Erdklima bewirken. Insbesondere werden das europäische und nordamerikanische Klima von Grönland beeinflusst. Schätzungen hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung sind wegen der großen Komplexität von Klimaabläufen derzeit ungenau. Dennoch ist das Übertreten der Schwellenwerte einiger Elemente innerhalb des nächsten Jahrhunderts sehr wahrscheinlich.

All die in dieser Arbeit aufgezählten Klimafolgen tragen zur Beschleunigung des globalen Klimawandels bei. Somit lösen das Schmelzen des Eises, das Freisetzen von Methan, die Versauerung der Ozeane, die Abschwächung der Atlantischen Thermohalinen Zirkulation, der Anstieg des Meeresspiegels und insbesondere der Ressourcenabbau (anthropogener Klimawandel) einen Kreislauf aus, der die globale Klimaerwärmung immer weiter ankurbelt.

Diese Arbeit sollte vor allem darstellen, wie vernetzt unser Klimasystem ist. Es gibt keinen Klimawandel, der sich nur auf eine Region begrenzt. Das globale Klima wird maßgebend von regionalen Veränderungen bestimmt. Es gibt keinen Ort der Welt, der nicht vom Klimawandel betroffen ist. Die Anstrengungen, den Klimawandel und dessen Folgen einzudämmen, müssen daher global von der gesamten Staatengemeinschaft angegangen werden.

Literaturverzeichnis

Buchquellen

Heyer, Ernst: Witterung und Klima: Eine allgemeine Klimatologie. 9. Auflage. Stuttgart, Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1993

Rahmstorf, Stefan/Schellnhuber, Hans Joachim: Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie. 7. Auflage. München: C.H. Beck: 2012

Onlinequellen

Bildungswiki Klimawandel: Globales Förderband. 22.10.2014.

http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Globales_Foerderband (Zugriff: 15.1.2018)

Bildungswiki Klimawandel: Meeresspiegelanstieg in Asien. 15.1.2018

http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Meeresspiegelanstieg_in_Asien

(Zugriff: 26.12.2017)

Borenstein, Seth: Abschmelzen der Polkappen nicht mehr zu stoppen, Welt N24,

24.9.2009 <https://www.welt.de/wissenschaft/umwelt/article4607517/Abschmelzen-der-Polkappen-nicht-mehr-zu-stoppen.html> (Zugriff: 15.1.2018)

Damm, Volkmar/Reichert, Christian/Berglar, Kai/Andruleit, Harald: Der arktische Ozean aus rohstoffwirtschaftlicher und völkerrechtlicher Sicht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffen, Hannover: Oktober 2016

https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/52_arktisch.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff: 15.1.2018)

Feely, Richard: Ocean acidification threatening our oceans. Acid and the arctic Ocean, our chaotic chemistry experiment. WWF Global Arctic Programme, The Circle, Oslo: December 2010. <http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/thecircle0410.pdf> (Zugriff: 15.1.2018)

Goruma: Eisberge, Packeis und Schelfeis.
https://www.goruma.de/Wissen/Naturwissenschaft/Geografie/Eisberge_Schelfeis_Packeis.html
(Zugriff:27.12.2017)

Gschnaller, Sandra/Lippelt, Jana/von Schickfus, Marie-Theres/Bohland, Moritz: Kurz zum Klima: Die Arktis als Getriebene und Treiberin des Klimawandels. ResearchGate: 30.5.2016.
https://www.researchgate.net/profile/Jana_Lippelt/publication/303667431_Kurz_zum_Klima_Die_Arktis_als_Getriebene_und_Treiberin_des_Klimawandels/links/574c293e08aed1a8cf2972e3/Kurz-zum-Klima-Die-Arktis-als-Getriebene-und-Treiberin-des-Klimawandels.pdf (Zugriff: 15.1.2018)

Levermann Anders/Bamber, Jonathan L./Drijfhout, Sybren/Ganopolski, Andrey/Haeberli, Winfried/Harris, Neil R. P./Huss, Matthias/Krüger, Kirstin/Lenton, Timothy M./Lindsay, Ronald W./Notz, Dirk/Wadhams, Peter/Weber, Susanne: Potential climatic transitions with profound impact on Europe. Review of the current state of six 'tipping elements of the climate system'. Springer Science+Business Media B.V.: 17.7.2011. http://www.pik-potsdam.de/~anders/publications/levermann_bamber12.pdf (Zugriff: 15.1.2018)

Levermann, Anders: Die Thermohaline Zirkulation des Atlantiks. Welt der Physik: 7.3.2016. <https://www.weltderphysik.de/gebiet/planeten/atmosphaere/meere/atlantik-zirkulation/> (Zugriff: 15.1.2018)

Mitchell, Alanna: Ocean acidification threatening our oceans. Ocean acidification is invisible. WWF Global Arctic Programme, The Circle, Oslo: December 2010.
<http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/thecircle0410.pdf> (Zugriff: 15.1.2018)

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung: Kippelemente – Achillesfersen im Erdsystem.
<https://www.pik-potsdam.de/services/infothek/kippelemente#r14> (Zugriff: 22.1.2018)

Treude, Tina: Methanhydrate: Erwärmung, Freisetzung und mikrobiologischer Abbau.
Leibniz-Institut für Meereswissenschaften und Exzellenz Cluster »Ozean der Zukunft«:
Februar 2013. <http://www.warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2013/02/Treude.pdf> (Zugriff: 15.1.2018)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: Klima / Klimaforschung / Datensätze
<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimaforschung/datensaetze> (Zugriff: 20.12.2017)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: Klima / Klimaforschung /
Klimamodellierung <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimaforschung/klimamodellierung>
(Zugriff: 20.12.2017)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: Klima / Informationsportal
Klimawandel / Klimaforschung / Klimarekonstruktion
[https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-
klimawandel/klimaforschung/klimarekonstruktion](https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimaforschung/klimarekonstruktion) (Zugriff: 20.12.2017)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: Klima / Informationsportal
Klimawandel / Klimaforschung / Klimamodellierung / Globale Klimamodelle
[https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-
klimawandel/klimaforschung/klimamodellierung/globale-klimamodelle](https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimaforschung/klimamodellierung/globale-klimamodelle) (Zugriff: 20.12.2017)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: Klima / Informationsportal
Klimawandel / Klimasystem / Rückkopplungen
[https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-
klimawandel/klimasystem/rueckkopplungen](https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimasystem/rueckkopplungen) (Zugriff: 20.12.2017)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: Klima / Informationsportal
Klimawandel / Klimavergangenheit / Paläoklima
[https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-
klimawandel/klimavergangenheit/palaeoklima](https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/palaeoklima) (Zugriff:20.12.2017)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: Klima / Informationsportal

Klimawandel / Klimavergangenheit / Neoklima

<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal->

[klimawandel/klimavergangenheit/neoklima](https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima) (Zugriff: 20.12.2017)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: NASA/Goddard Scientific Visualization Studio

<https://www.nasa.gov/centers/goddard/news/features/2012/year-review.html>

(Zugriff: 26.1.2018)

Abbildung 2: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung [https://www.pik-](https://www.pik-potsdam.de/services/infothek/kippelemente#r14)

[potsdam.de/services/infothek/kippelemente#r14](https://www.pik-potsdam.de/services/infothek/kippelemente#r14) (Zugriff: 22.1.2018)

Abbildung 3: Rahmstorf, Nature 1997

https://www.researchgate.net/profile/Jana_Lippelt/publication/303667431_Kurz_zum_Klima_Die_Arktis_als_Getriebene_und_Treiberin_des_Klimawandels/links/574c293e08aed1a8cf2972e3/Kurz-zum-Klima-Die-Arktis-als-Getriebene-und-Treiberin-des-Klimawandels.pdf (Zugriff: 15.1.2018)

Abbildung 4: Wadhams 2003 [https://www.pmel.noaa.gov/arctic-](https://www.pmel.noaa.gov/arctic-zone/essay_wadhams.html)

[zone/essay_wadhams.html](https://www.pmel.noaa.gov/arctic-zone/essay_wadhams.html) (Zugriff: 12.2.2018)

Abbildung 5: University of Hawaii/NASA-JPL/Caltech

<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=6650> (Zugriff: 12.2.2018)

Abbildung 6: Nestler 2015 [http://www.tagesspiegel.de/wissen/klimawandel-und-](http://www.tagesspiegel.de/wissen/klimawandel-und-rohstoffe-jeder-unfall-kann-verheerende-folgen-fuer-die-oekosysteme-haben/11718070-2.html)

[rohstoffe-jeder-unfall-kann-verheerende-folgen-fuer-die-oekosysteme-haben/11718070-2.html](http://www.tagesspiegel.de/wissen/klimawandel-und-rohstoffe-jeder-unfall-kann-verheerende-folgen-fuer-die-oekosysteme-haben/11718070-2.html) (Zugriff: 12.2.2018)