



KIPP-PUNKTE IM KLIMASYSTEM

Welche Gefahren drohen?

Impressum

Herausgeber: Umweltbundesamt

Pressesprecher: Martin Ittershagen (verantwortlich)
Autoren: Fachgebiet I 2.1, Dr. Claudia Mäder
Adresse: Postfach 1406, 06813 Dessau
Telefon: 0340/21 03-2122
E-Mail: pressestelle@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Stand: Juli 2008

Titelbild: www.pixelio.de

INHALT

1. Einleitung	4
2. Kipp-Punkte im Klimasystem und damit verbundene Prozesse	5
2.1 Schmelzen des Meereises und Abnahme der Albedo in der Arktis	5
2.2 Schmelzen des Grönländischen Eisschildes und Anstieg des Meeresspiegels	6
2.3 Instabilität des Westantarktischen Eisschildes und Anstieg des Meeresspiegels	7
2.4 Störung der ozeanischen Zirkulation im Nordatlantik	8
2.5 Zunahme und mögliche Persistenz des El Niño - Phänomens	9
2.6 Störung des Indischen Monsunregimes	11
2.7 Instabilität der Sahel-Zone in Afrika	12
2.8 Austrocknung und Kollaps des Amazonas-Regenwaldes	12
2.9 Kollaps der borealen Wälder	13
2.10 Auftauen des Permafrostbodens unter Freisetzung von Methan und Kohlendioxid	14
2.10.1 Natürliche Tauprozesse im Frühjahr	14
2.10.2 Freisetzung von Kohlenstoff infolge der Klimaerwärmung	15
2.11 Schmelzen der Gletscher und Abnahme der Albedo im Himalaya	16
2.12 Versauerung der Ozeane und Abnahme der Aufnahmekapazität für Kohlendioxid	16
2.13 Freisetzung von Methan aus Meeresböden	17
3. Risiko und Unsicherheiten des Eintretens von Kipp-Punkten	19
4. Was muss getan werden, um der Gefahr des Eintretens von Kipp-Punkten zu begegnen?	20
4.1 Begründung der Minderungsmaßnahmen	20
4.1.1 Klimaschutzmaßnahmen zur Einhaltung des 2 Grad Celsius-Zieles	21
4.2 Begründung der Anpassungsmaßnahmen	22
Literatur und weiterführende Informationen	23

1. EINLEITUNG

Die meisten Menschen denken an eine allmähliche Erwärmung des Klimas, wenn sie den Begriff „anthropogene Klimaänderung“ hören (anthropogen = durch den Menschen verursacht). Es ist jedoch auch möglich, dass besonders starke oder sogar abrupte Klimaänderungen einsetzen. Derartige Prozesse sind mit kritischen Schwellen im Klimasystem, sogenannten Kipp-Punkten (englisch: Tipping Points) verbunden. Bereits geringe Änderungen im Klimasystem können bewirken, dass Kipp-Punkte erreicht werden, in deren Folge sich das Klima qualitativ ändert.

Die Zunahme der Konzentrationen treibhauswirksamer Gase in der Atmosphäre führt zu einer allmählichen Erwärmung des Klimas, die sich unter anderem in einem Anstieg des globalen Mittels der bodennahen Lufttemperatur widerspiegelt. Das Klimasystem reagiert bei bestimmten Größenordnungen des Temperaturanstiegs - den Kipp-Punkten - mit starken Veränderungen im System. Zu diesen Veränderungen gehören:

- ▶ abrupte Klimaänderungen
- ▶ unumkehrbare (irreversible) Prozesse
- ▶ langfristige, starke Klimaänderungen

Es besteht die Gefahr, dass abrupte, drastische Klimaänderungen die Anpassungsmöglichkeiten der menschlichen Gesellschaft überaus fordern oder auch übersteigen. Dies gilt besonders für solche Fälle, in denen die bewirkten Änderungen nicht mehr umkehrbar sind.

In Verbindung mit dem Anstieg der atmosphärischen Konzentrationen der Treibhausgase und möglichen Kipp-Punkten im Klimasystem diskutiert die Fachwelt folgende Prozesse [1], [2], [3]:

- ▶ Schmelzen des Meereises und Abnahme der Albedo in der Arktis
- ▶ Schmelzen des Grönländischen Eisschildes und Anstieg des Meeresspiegels
- ▶ Instabilität des westantarktischen Eisschildes und Anstieg des Meeresspiegels
- ▶ Störung der ozeanischen Zirkulation im Nordatlantik
- ▶ Zunahme und mögliche Persistenz des El-Niño-Phänomens
- ▶ Störung des Indischen Monsunregimes
- ▶ Instabilität der Sahel-Zone in Afrika
- ▶ Austrocknung und Kollaps des Amazonas-Regenwaldes
- ▶ Kollaps der borealen Wälder
- ▶ Auftauen des Permafrostbodens unter Freisetzung von Methan und Kohlendioxid
- ▶ Schmelzen der Gletscher und Abnahme der Albedo im Himalaya

- ▶ Versauerung der Ozeane und Abnahme der Aufnahmekapazität für Kohlendioxid
- ▶ Freisetzung von Methan aus Meeresböden.

Der Klimaforscher Professor Stefan Rahmstorf vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung äußert im Hinblick auf Kipp-Punkte: "Das Klimasystem ist kein träges und gutmütiges Faultier, sondern es kann sehr abrupt und heftig reagieren" [4]. Welche Reaktionen im Einzelnen möglich sind, verdeutlichen die folgenden Abschnitte.

2. KIPP-PUNKTE IM KLIMASYSTEM UND DAMIT VERBUNDENE PROZESSE

2.1 Schmelzen des Meereises und Abnahme der Albedo in der Arktis

Die durchschnittlichen Temperaturen in der Arktis sind in den letzten 100 Jahren fast doppelt so schnell gestiegen wie im globalen Mittel. Diese Feststellung treffen die Wissenschaftler im 4. Sachstandsbericht des Weltklimarates (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen - IPCC). In diesem Bericht, der die neueren wissenschaftlichen Erkenntnisse auf dem Gebiet der Klimawissenschaft enthält, ist weiterhin festgehalten, dass die durchschnittliche jährliche Ausdehnung des arktischen Meereises um mehr als 2 Prozent pro Jahrzehnt abnahm. Im Sommer ist die Abnahme stärker und liegt bei etwa 7 Prozent pro Dekade [5].

Darüber hinaus erwarten die Klimatologen in der Nordpolar-Region auch künftig eine besonders starke Erwärmung. Das arktische Meereis wird weiter abnehmen. Einige Klimamodelle kommen gemäß 4. Sachstandsbericht des IPCC zu dem Resultat, dass das Meereis in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts im Spätsommer fast vollständig verschwindet [5]. Da die Modelle den gegenwärtig in der Arktis beobachteten Eisrückgang unterschätzen, könnte der Kipp-Punkt für eine sommerliche eisfreie Arktis sehr nah oder sogar bereits überschritten sein [2].

Eine große Eisfläche wie die Fläche der Arktis hat wegen der weißen Farbe eine hohe Albedo. Das bedeutet, dass ein großer Teil der einfallenden Sonnenstrahlung reflektiert wird. Erwärmt sich nun die Atmosphäre und Teile der Arktis schmelzen, verringert sich die Albedo der Erdoberfläche. Dadurch wird weniger Sonnenstrahlung reflektiert und der Untergrund erwärmt sich stärker. Ein weiterer Anstieg der Temperatur in der Atmosphäre ist die Folge. Dieser Prozess - Erwärmung der Atmosphäre, Schmelzen von Schnee- und Eismassen, Verringerung der Oberflächenalbedo, verstärkte Erwärmung der Atmosphäre - ist einer

der wichtigsten positiven Rückkopplungseffekte im Klimasystem. Ein positiver Rückkopplungsmechanismus verstärkt den Anfangsimpuls, in diesem Falle die Erwärmung des Klimas, ein negativer schwächt ihn dagegen ab.

Taut die Arktis infolge einer Klimaerwärmung, wird diese Erwärmung durch die positive Rückkopplung weiter verstärkt. Die Arktis bedeckt Teile von Russland, den USA, Kanada, Grönland, Lappland sowie Spitzbergen und wird von etwa 1 Million Menschen bevölkert. Die Erwärmung und die Tauprozesse werden diese Menschen vor große Anpassungsprobleme stellen, wenn beispielsweise die Infrastruktur auf tauenden Böden destabilisiert und beschädigt wird oder traditionell gejagte Tierarten verschwinden.

2.2 Schmelzen des Grönländischen Eisschildes und Anstieg des Meeresspiegels

Grönland ist die größte Insel der Erde und hat eine Gesamtfläche von 2,1 Millionen Quadratkilometern. Ist also mehr als sechsmal so groß wie Deutschland. Ungefähr 1,7 Millionen Quadratkilometer - das sind rund 80 Prozent der Fläche Grönlands - sind von einem dicken Eispanser, dem Grönländischen Eisschild, bedeckt. Im Mittel ist das Eis etwa 2000 Meter dick, an den dicksten Stellen sogar über 3000 Meter. Die räumliche Ausdehnung des nach der Antarktis zweitgrößten Eisschildes der Welt beträgt ungefähr 2,85 Millionen Kubikkilometer.

Wenn der Eisschild an der Oberfläche zu schmelzen beginnt, entstehen Seen, deren Wasser durch Gletscherspalten in die Tiefe bis auf den felsigen Grund der Insel gelangt. So entstehen Flüsse unter dem Eis, auf denen die Eismassen in Richtung Ozean gleiten. Die Bewegung der Gletscher kann durch das Grundwasser merklich beschleunigt werden. Ein Anstieg der Fließgeschwindigkeit einiger grönländischer Gletscher wurde in der jüngsten Vergangenheit beobachtet [5].

Der Grönländische Eisschild hat bereits durch dynamische Prozesse (beispielsweise Verlust von Schelfeis¹ oder Verlust schwimmender Gletscherzungen) sowie durch Abschmelzen an Masse verloren. Der dynamische Eisverlust erklärt etwa die Hälfte des Eismassenverlustes in Grönland. Der Rest des Massenverlustes ist dadurch bedingt, dass die Verluste durch das Abschmelzen größer waren als der Zuwachs durch Schneefall [5].

Die Wissenschaftler erwarten, dass der Grönländische Eisschild weiter abschmilzt und nach 2100 fortgesetzt zum Meeresspiegelanstieg beiträgt. Nach

¹ Schelfeise sind am Rand polarer Landflächen vorkommende, im Meerwasser schwimmende, große Eis tafeln. Sie sind mit einem Gletscher an Land verbunden und ragen ins offene Meer hinaus. An diesem äußeren Ende im Meer brechen immer wieder große Teile ab und lösen sich in Eisberge auf. Dieser Prozess wird als "Kalben" bezeichnet.

gegenwärtigen Erkenntnissen kann eine Zunahme des globalen Mittels der bodennahen Lufttemperatur von mehr als 1,9 Grad Celsius gegenüber vorindustriellen Werten (zwischen 1906 und 2005 stieg die globale bodennahe Mitteltemperatur bereits um 0,74 Grad Celsius [5], [6]) zu fortwährendem Abschmelzen führen². Falls diese Prozesse - größere Eismassenverluste als Zunahmen durch Schneefall - in den kommenden Jahrhunderten anhalten, rechnen die Forscher mit dem vollständigen Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes und einem daraus folgenden Anstieg des Meeresspiegels von bis zu **7 Metern** [5]. Ohne Zweifel wäre ein derartiger Meeresspiegelanstieg mit äußerst gravierenden Auswirkungen in küstennahen Gebieten verbunden.

2.3 Instabilität des Westantarktischen Eisschildes und Anstieg des Meeresspiegels

In der Antarktis stellten die Wissenschaftler bisher keine Zunahme der über die Region gemittelten Temperatur in Bodennähe fest [5]. Eine Erklärung dafür ist, dass die Antarktis eine sehr große zusammenhängende Eismasse ist, die eine hohe Albedo hat und einen großen Teil der am Boden ankommenden Sonnenstrahlung reflektiert. Dadurch bleibt die Luft über der Eisfläche zunächst kalt. Erwärmt sich die Luft, enthält sie auch mehr Wasserdampf, was zu höheren Niederschlägen führt. In der sehr kalten Antarktis fallen die Niederschläge in Form von Schnee und führen zur Zunahme der Eismasse. Auf der Grundlage aktueller Modellstudien projizieren die Klimaforscher, dass ein verbreitetes Abschmelzen an der Oberfläche oder gar ein Abtauen der Antarktis nicht zu erwarten ist [5].

Möglich ist jedoch ein verstärktes Schmelzen in den Randzonen des antarktischen Inlandeises, verursacht durch die Erwärmung des Meerwassers. Dadurch könnten große Eismassen in das Meer abfließen. Besonders in der weit in die See herausragenden Westantarktis beobachten die Wissenschaftler das Abgleiten großer Eisteile in das Meer, wobei allerdings auch natürliche Prozesse eine Rolle spielen [7]. Die Forscher können jedoch nicht ausschließen, dass auf Grund der Erwärmung des Klimas große Teile des westantarktischen Eisschildes abbrechen, ins Meer abfließen und durch Schmelzen zum Anstieg des Meeresspiegels beitragen. In der wissenschaftlichen Veröffentlichung von Lenton et al. [2] wird davon ausgegangen, dass bereits in diesem Jahrhundert ein Kipp-Punkt erreicht werden könnte, der zum verbreiteten Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes führt. In Verbindung damit ist ein sehr schneller Anstieg des Meeresspiegels - nämlich um mehr als 1 Meter pro Jahrhundert - wahrscheinlicher als im Hinblick auf das Schmelzen des Grönländischen Eisschildes [2].

² Der Wert stellt die im 4. Sachstandsbericht des IPCC angegebene untere Grenze für eine globale Erwärmung dar, die ein Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes auslösen kann [5].

Die Prozesse, die beim Abschmelzen großer Eismassen eine Rolle spielen, sind jedoch nicht ausreichend wissenschaftlich untersucht und können auch mit Klimamodellen bisher nicht adäquat simuliert werden. Deshalb existiert keine ausreichende Klarheit über die Temperaturzunahme (Kipp-Punkt), die zur Instabilität des Westantarktischen Eisschildes führen würde.

2.4 Störung der ozeanischen Zirkulation im Nordatlantik

Die Strömungen der Ozeane spielen eine wesentliche Rolle im Klimasystem. Sie beeinflussen durch Verdunstung sowie Wärmeabgabe und Wärmeaufnahme an der Oberfläche den gesamten Wasserkreislauf der Erde. Veränderungen der Meeresströmungen können deshalb das Klima erheblich beeinflussen.

Der Golfstrom ist eine ozeanische Strömung, deren Name im Zusammenhang mit Klimaänderungen immer wieder fällt. Allseits bekannt ist die Aussage, dass der Golfstrom versiegen könnte, wenn das Klima wärmer wird. Die Folge wäre eine starke Abnahme der Temperaturen in Europa, verursacht durch die fehlende Warmwasserzufuhr im Nordatlantik.

Die Aussage stimmt jedoch in dieser Form nicht. Der Golfstrom ist eine Strömung im Atlantischen Ozean mit warmen Wassermassen vor der nordamerikanischen Küste. In den Nordatlantik, also nach Europa, reicht nur ein Teil des atlantischen Zirkulationssystems, der sogenannte Nordatlantikstrom. Der Golfstrom selbst wird hauptsächlich von Winden angetrieben und droht nicht zu versiegen.

Der Nordatlantikstrom hingegen wird von Dichteunterschieden der Wassermassen angetrieben: Das relativ warme Wasser des Nordatlantikstroms fließt an der Oberfläche nach Norden, gelangt in kühlere Umgebung, verdunstet teilweise und kühlt sich langsam ab. Durch die Verdunstung steigt der Salzgehalt des Oberflächenwassers. Wasser ist umso schwerer, je salzhaltiger und/oder je kühler es ist. Im Nordmeer sinkt das kalte und sehr salzhaltige Wasser wegen seiner höheren Dichte in die Tiefsee ab und fließt dort in Richtung Süden. Aus den Tropen wiederum strömt warmes Oberflächenwasser in nördliche Richtung nach, so dass eine Zirkulation entsteht. Diese Zirkulation wird auch thermohaline Zirkulation genannt (griechisch: *thermos* für Wärme und *halas* für Salz). Der Wärmetransport des Nordatlantikstroms nach Norden sorgt dafür, dass in West- und Nordeuropa vergleichsweise mildes Klima herrscht, milder als in anderen Regionen gleicher geografischer Breite.

Durch die Klimaerwärmung sind folgende Prozesse möglich: das Oberflächenwasser im Nordatlantik kühlt sich auf seinem Weg in Richtung Norden nicht mehr so stark ab, die Niederschläge nehmen zu und durch Schmelzen von Eismassen des grönländischen Eispanzers sowie weiterer Gletscher strömt Süßwasser in großer Menge in den Nordatlantik. Die Folge ist, dass das salzhaltige Meerwasser verdünnt und erwärmt wird. Dadurch könnte das Absinken der kal-

ten, schwereren Wassermassen im Nordpolarmeer verringert und die thermohaline Zirkulation abgeschwächt oder sogar völlig zum Erliegen gebracht werden.

Während der letzten Eiszeit kam die thermohaline Zirkulation offenbar mehrfach zum Erliegen. Folgende Ursache kommt dafür in Betracht: Durch Schneefälle wuchs das nordamerikanische Kontinentaleis immer mehr an, bis Teile instabil wurden und ins Meer rutschten. Große Eismassen gelangten dadurch in den Atlantik, schmolzen und verdünnten das Meerwasser. Die Tiefenwasserbildung brach ab und in den mittleren Breiten erfolgte eine plötzliche Abkühlung [4].

Versiegt der Nordatlantikstrom in näherer Zukunft, kommt es in Nordwesteuropa zu einer Abkühlung. Diese Abkühlung erfolgt jedoch in einer Zeit, in der sich das Klima bereits erwärmt hat. Deshalb würde ein Versiegen des Nordatlantikstroms nach heutigen Erkenntnissen die Erwärmung in Nordwesteuropa abmildern und im Extremfall zu einer Abkühlung führen. Modellrechnungen ergeben, dass diese Abkühlung (während der Phase zunehmender atmosphärischer Treibhausgaskonzentrationen) einen Rückgang der europäischen Temperaturen auf maximal vorindustrielles Niveau bewirken könnte. Erst in späteren Jahrhunderten würde eine stärkere Abkühlung erfolgen, wenn der Treibhausgasgehalt der Atmosphäre wieder zurückgeht [8], [8a], [8b].

Neben einer möglichen Abkühlung hätte ein Versiegen des Nordatlantikstroms jedoch noch schwerwiegendere Folgen. So könnte es unter anderem zu einer weiteren Erwärmung der Wassermassen in der Tiefsee und deshalb langfristig zu einem zusätzlichen Anstieg des globalen Meeresspiegels von bis zu 1 Meter kommen. Auch Auswirkungen auf marine Ökosysteme und die Fischereindustrie sind damit verbunden. Außerdem führen Änderungen der ozeanischen Zirkulation zu kurzfristigen Meeresspiegelschwankungen, die an einigen Küsten des Nordatlantiks die Größenordnung von 1 Meter erreichen könnten [8a], [8b].

Die Wissenschaftler setzen Klimamodelle ein, um das Risiko einer Abschwächung oder des Abbruchs der thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik zu untersuchen. Aus diesen Modellsimulationen geht hervor, dass ein Abreißen der Strömung sowie eine deutliche Abkühlung in diesem Jahrhundert sehr unwahrscheinlich sind [4], [5]. Allerdings müssen die Modellergebnisse vorsichtig interpretiert werden, denn viele Prozesse wie beispielsweise die Eisdynamik von Gletscherzungen (Prozesse, die zur Bewegung / zum Gleiten von Gletscherzungen führen) können Wissenschaftler noch nicht zuverlässig beschreiben.

Die Klimageschichte zeigt plötzliche Wechsel, die mit Klimamodellen bisher nicht ausreichend reproduziert werden konnten. Professor Rahmstorf vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung fasst deshalb zusammen: „Es gibt keine Anzeichen dafür, dass schon in wenigen Jahren ein drastischer Klimawechsel droht, aber die wechselvolle und ungenügend verstandene Klimageschichte ist vielleicht eine Warnung, dass man nichts völlig ausschließen kann“ [8].

2.5 Zunahme und mögliche Persistenz des El Niño-Phänomens

El Niño (spanisch: das Christkind) ist ein Phänomen im tropischen Pazifik, bei dem (beginnend um die Weihnachtszeit) die Oberflächentemperaturen des Ozeans in einem großen Gebiet ungewöhnlich erhöht sind. Im tropischen Pazifik beobachten die Wissenschaftler im Vergleich zu den anderen Ozeanen generell die stärksten Schwankungen der Wasseroberflächentemperaturen. Normalerweise weist der Pazifik längs des Äquators ein deutliches Temperaturgefälle auf: Im Ostpazifik liegen die Wasseroberflächentemperaturen bei etwa 20 Grad Celsius, während der Westpazifik Werte um 30 Grad Celsius erreicht. Über dem warmem Westpazifik erwärmt sich die Luft und steigt auf. Dabei bilden sich hoch reichende Wolken mit ergiebigen Niederschlägen, die unter anderem den tropischen Regenwäldern Indonesiens zugute kommen. Über dem kälteren Ostpazifik hingegen sinken großräumig Luftmassen ab und sorgen so für sehr trockene klimatische Bedingungen, wovon die küstennahen Wüsten Südamerikas zeugen [9].

Abweichend vom geschilderten Temperatur- und Niederschlagsregime tritt bei El Niño eine großräumige Erwärmung des oberen Ozeans im gesamten tropischen Pazifik auf, die im Mittel alle 4 Jahre wiederkehrt. Ursache dafür ist eine Schwächung oder ein Ausbleiben der Passatwinde, die unter normalen Bedingungen ganzjährig im Gebiet des tropischen Pazifiks wehen. Die Änderung der Meeresoberflächentemperaturen hat Folgen für die atmosphärische Zirkulation: In Regionen Südamerikas, in denen sonst Trockenheit herrscht, kann es zu starken Niederschlägen mit Überschwemmungen kommen, während in Indonesien und Australien Dürren auftreten, die teils verheerende Wald- und Buschbrände nach sich ziehen [9].

Wegen der hohen Wassertemperaturen und des geringen Nährstoffangebotes während El Niño-Episoden wandern Fischbestände ab. Dadurch ist die Fischereindustrie, besonders der Fischfang vor der Küste Perus, betroffen. In Südostasien kommt es durch die Trockenheit zu Missernten. In Kolumbien vermehren sich durch die warme Witterung Mückenarten, die Malaria übertragen, in stärkerem Maße als unter normalen Bedingungen. Eine Zunahme der Malariainfektionen ist die Folge. Dies sind nur einige Beispiele der negativen Auswirkungen von El Niño-Ereignissen [9].

Ergebnisse von Simulationen mit Klimamodellen deuten darauf hin, dass der Ausstoß von Treibhausgasen zu einer starken Erwärmung des Ostpazifiks und einer erheblich geringeren Erwärmung des Westpazifiks führt. Das würde bedeuten, dass künftig El Niño-Situationen häufiger auftreten, als das bisher der Fall war [9]. Zudem befürchten die Klimaforscher eine Verstärkung der Schwankungen von Jahr zu Jahr. Das bedeutet einerseits sehr starke El Niño-Ereignisse und andererseits eine Verstärkung des natürlichen Temperaturunterschiedes im tropischen Pazifik mit Ausbildung einer weit nach Westen reichenden Kaltwasserzunge (La Niña). Diese Temperaturverhältnisse führen zu erhöhten Nieder-

schlagen über dem westlichen Pazifik und Teilen Südasiens, während es im westlichen Südamerika ungewöhnlich trocken ist [9]. Sowohl El-Niño als auch La Niña- Ereignisse haben Auswirkungen auf die Zahl der extremen Wetterereignisse in Ländern Lateinamerikas und Südasiens.

2.6 Störung des Indischen Monsunregimes

Der Monsun ist ein System von regelmäßig wiederkehrenden, jahreszeitlich wechselnden Winden. Dieses Zirkulationssystem tritt in tropischen Regionen auf und ist das Ergebnis der unterschiedlich starken Aufheizung von großen Land- und Meeresflächen. Der Indische Sommermonsun ist eine Zirkulation mit Südwestwinden in Bodennähe, die durch die starke Aufheizung des Kontinents in den Sommermonaten entsteht. Der vom Meer über das Land wehende Sommermonsun nimmt über dem Indischen Ozean viel Feuchtigkeit auf und bringt hohe Niederschläge mit sich.

Der Wintermonsun weht aus Nordosten und ist das Resultat der starken Abkühlung des asiatischen Kontinents und des vergleichsweise wärmeren Meeres im Winter. Die Zeit des Wintermonsuns ist niederschlagsarm, weil der über das Festland zum Ozean wehende Wind über Land wenig Feuchtigkeit aufnimmt.

Der Monsun hat eine immense Bedeutung für das Leben der Menschen auf dem Indischen Subkontinent. Vom Einsetzen des Sommermonsuns, seiner Dauer und der Niederschlagsverteilung hängen landwirtschaftliche Erträge ab. Ein schwacher Sommermonsun ist häufig mit Dürren verbunden, Missernten und Hungersnöte sind die Folge. Stärkere Monsunniederschläge als gewöhnlich können wiederum zu schweren Überschwemmungen führen. Sowohl lang anhaltende Dürren als auch verheerende Überschwemmungen traten in der jüngeren Vergangenheit in Teilen Indiens und Bangladeshs wiederholt auf. Der Monsunregen, der einerseits die Lebensgrundlage der Menschen bildet, kann andererseits auch großen Schaden zufügen.

Die Frage ist nun, wie sich die Klimaerwärmung auf das Indische Monsunregime auswirkt. Durch höhere Konzentrationen an Treibhausgasen in der Atmosphäre steigt die Temperatur besonders über den Landflächen an. Das sommerliche Hitzetief³ ist somit über dem Kontinent stärker ausgeprägt, was zu einer Intensivierung des Indischen Sommermonsuns mit mehr Niederschlägen führt.

Es findet jedoch auch ein Prozess mit einer gegenläufigen Entwicklung statt. Die Luftverschmutzung über Indien und China nimmt immer mehr zu und die Atmosphäre enthält deshalb viele Aerosole (schwebende Teilchen). Aerosole

³ Hitzetiefs entstehen im Sommer über Land. Durch die starke Sonneneinstrahlung erwärmt sich der Boden, die warme Luft steigt in höhere Schichten der (unteren) Atmosphäre, und es bilden sich Wolken. Je nach Stärke der Aufheizung des Untergrundes können sehr hoch reichende Wolken entstehen. Auf diese Weise kommt es auch oft zur Bildung von Gewittern.

streuen und reflektieren die Sonnenstrahlung, so dass weniger Strahlung bis zum Erdboden gelangt. Darüber hinaus verändern Waldrodungen die Beschaffenheit der Erdoberfläche und resultieren in einer Erhöhung der Albedo. Dadurch erwärmt sich die Luft über dem Kontinent in geringerem Maße, und der Sommermonsun ist weniger stark ausgeprägt oder bildet sich im Extremfall gar nicht aus.

Ob sich die Abschwächung oder die Verstärkung des Monsunregimes künftig stärker durchsetzen wird, ist noch nicht ausreichend geklärt. Beide Prozesse haben erhebliche Konsequenzen für Millionen Menschen. In den letzten Jahren beobachteten die Wissenschaftler eine Abschwächung des Monsuns. Professor Hans-Joachim Schellnhuber, Direktor des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung, weist auf den ungünstigsten Fall hin, der eintreten könnte: danach käme es zunächst für einige Jahrzehnte zu einer starken Abschwächung und im Anschluss daran zu einer erheblichen Verstärkung des Monsuns. "Dies würde für viele Hundert Millionen Menschen erhebliche Anpassungsprobleme mit sich bringen", unterstreicht Professor Schellnhuber [3].

2.7 Instabilität der Sahel-Zone in Afrika

Auch in Afrika sind im Zusammenhang mit der Erwärmung des Klimas extreme Entwicklungen möglich. So droht dem gesamten südlichen Afrika, das bereits trockener geworden ist, ein immer größerer Wassermangel [7]. Allerdings sind die Projektionen unterschiedlicher Klimamodelle für diese Region uneinheitlich.

Die Ergebnisse einiger Klimamodelle deuten darauf hin, dass es auch eine Begrünung der Sahel-Zone geben könnte - das wäre ein Beispiel für einen Kipp-Punkt mit positiven Folgen. Für die Region südlich der Sahel-Zone droht die Trockenheit dagegen zuzunehmen. "Alte, traditionelle Kulturen wären dann vermutlich nicht mehr überlebensfähig", so Professor Schellnhuber [3]. Den Klimaforschern liegen auch Modellergebnisse vor, die zunächst eine Begrünung der Sahel-Zone ergeben, aber ab Mitte dieses Jahrhunderts dann eine große Dürre. Demnach sind sehr unterschiedliche Entwicklungen möglich, die mit erheblichen Folgen für die in dieser Region lebenden Menschen verbunden wären [3].

2.8 Austrocknung und Kollaps des Amazonas-Regenwaldes

Der Amazonas-Regenwald ist das größte tropische Regenwaldgebiet der Erde, und zugleich ist diese Region auch das größte Flusseinzugsgebiet. Die Fläche des Amazonas-Regenwaldes ist etwa so groß wie die Fläche der Vereinigten Staaten von Amerika und anderthalb mal so groß wie die Fläche der Europäi-

schen Union. Die tropischen Regenwälder werden auch als grüne Lunge des Planeten bezeichnet. Sie nehmen Kohlendioxid aus der Luft auf und geben Sauerstoff ab.

Tropische Regenwälder beherbergen einen ungeheuren Artenreichtum. Laut World Wide Fund For Nature (WWF) gibt es im Amazonas-Regenwald mehr als 400 Säugetierarten, 1200 verschiedene Vogelarten, 3000 Fischarten, über eine Million unterschiedliche Insektenarten und mindestens 40000 Pflanzenarten. Das sind etwa 10 Prozent der weltweiten biologischen Vielfalt [10].

Im brasilianischen Amazonas-Gebiet leben auch über 400 indigene Bevölkerungsgruppen, die ihrer traditionellen Lebensweise nachkommen [11].

Ein bedeutender Teil des Amazonas-Regenwaldes ist durch rücksichtslose Waldzerstörung bereits vernichtet worden oder ist bedroht. Ursachen der Waldzerstörung sind - meist illegale - Holzeinschläge, Ausbau von Infrastruktur (z.B. Straßenbau), Umwandlung der Wälder in Weideland und landwirtschaftlich genutzte Flächen (z.B. für Rinderzucht und Sojaanbau) sowie Ölförderung. Auf diese Weise wurden schon 17 Prozent der ursprünglichen Waldbedeckung im Amazonas-Gebiet vernichtet. Weitere 17 Prozent des Waldes sind bereits geschädigt [10].

Mit der Rodung des Waldes geht dessen wertvolle Kapazität zur Bindung von Kohlendioxid aus der Luft verloren. Darüber hinaus werden Brandrodungen durchgeführt, wodurch Kohlendioxid freigesetzt wird. Wird der Regenwald weiter vernichtet und schreitet die globale Erwärmung weiter fort, droht der Amazonas-Regenwald auszutrocknen.

Im Winter 2005 gab es bereits im Amazonas-Regenwald eine schwere Dürre. Vor allem die Seitenarme des größten Stroms der Welt zeigten historische Tiefststände und einige Nebenflüsse waren ganz ausgetrocknet [3], [7]. Eine globale Erwärmung zwischen 2 und 3 Grad Celsius, Rodungen und die intensive Ausbreitung von Straßen, Sojafeldern und Weideflächen für Rinder könnten schon bis 2050 zur Austrocknung von 40 Prozent des Amazonas-Regenwaldes führen [7]. Einige Klimamodelle ergeben einen vollständigen Zusammenbruch des Amazonas-Regenwaldes in diesem Jahrhundert. Dieser Fall würde die Region vor gewaltige Probleme stellen. Die globalen Folgen wären eine massive Zunahme der atmosphärischen Kohlendioxid-Konzentrationen und damit eine erhebliche Verstärkung der globalen Erwärmung.

2.9 Kollaps der borealen Wälder

Die borealen Wälder umfassen mit etwa 15 Millionen Quadratkilometern mehr als ein Drittel der weltweiten Waldfläche. Sie sind die dominante Waldform auf der Nordhalbkugel und erstrecken sich etwa zwischen dem 50. und dem 70. Breitengrad über Nordamerika, Europa und Asien [13]. Es handelt sich in der Hauptsache um Nadelwälder, wie die großen Taigawälder, die hoch im Norden

in die baumlose Tundra übergehen. Am südlichen Rand seines Erstreckungsgebietes geht der boreale Wald in den Wald der gemäßigten Breiten über, wie er auch in Deutschland anzutreffen ist. In dieser Übergangszone gibt es vermehrt Laubbäume wie Eichen oder Espen [13].

In Gebieten, in denen die Erwärmung des Klimas zu verstärkter Trockenheit und größerer Hitze im Sommer führt, sind die an die bisherigen klimatischen Bedingungen angepassten Wälder gefährdet: die Bäume werden anfälliger gegenüber Krankheiten und Parasiten, die Reproduktionsraten nehmen ab und Waldbrände treten häufiger auf. Es kann zur Ausweitung von Grasland kommen, wodurch die Bodenfeuchte noch weiter abnimmt. Als Kipp-Punkt, der zum Kollaps der borealen Wälder führt, geben Wissenschaftler eine globale Erwärmung von 3 Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau an. Dieser Wert ist jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet [2].

Etwa 90 Prozent des Papier- und Schnittholzbedarfs der Erde werden aus den borealen Wäldern gedeckt. Ähnlich wie in den tropischen Wäldern ist auch hier ein großer Teil der Forstwirtschaft nicht nachhaltig, sondern es werden Abholzungen durchgeführt [13]. Mit der Rodung kann der Wald weniger Kohlendioxid aus der Luft binden. Durch die Vernichtung des Waldes folgt auch eine Abnahme der Bodenfeuchte, und im Boden gebundener Kohlenstoff wird freigesetzt. Derartige Prozesse verstärken die Gefahr eines Zusammenbruchs der borealen Wälder.

2.10 Auftauen des Permafrostbodens unter Freisetzung von Methan und Kohlendioxid

Als Permafrost bezeichnet man Boden oder Sediment, dessen Temperatur mindestens zwei Jahre in Folge bei 0 Grad Celsius oder darunter liegt. Der Boden ist somit dauerhaft gefroren. Die Nordhemisphäre weist Permafrostböden in großen Teilen Russlands, Kanadas, Alaskas und in westlichen Teilen Chinas auf. In Permafrostböden sind große Kohlenstoffvorräte eingelagert, von denen Teile infolge der Klimaerwärmung in die Atmosphäre gelangen können.

2.10.1 Natürliche Tauprozesse im Frühjahr

Im Frühjahr tauen die oberen Bodenschichten des Permafrostbodens auf. Ist der Boden unter diesen Schichten gefroren, kann das Schmelzwasser nicht abfließen und bildet ausgedehnte Feuchtgebiete, in denen Vegetation, wie sie für Moorlandschaften typisch ist, auftritt. Die Wachstumsphase dieser Vegetation beträgt nur etwa 2 bis 3 Monate. Während der Wachstumsphase nehmen die Pflanzen über die Photosynthese Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf.

Nach dem Absterben der Vegetation zersetzen Mikroorganismen das organische Material und der eingelagerte Kohlenstoff gelangt teilweise (in Form von

Methan und Kohlendioxid) zurück in die Atmosphäre. Wegen der nasskalten Umgebung ist die biologische Abbaurate in arktischen Böden jedoch gering. Deshalb wird seit Ende der letzten Eiszeit - vor etwa 11 000 Jahren - Kohlenstoff in den arktischen Böden eingelagert. Dadurch entstanden beispielsweise in Nordsibirien Torfhorizonte von mehreren 100 Metern Mächtigkeit. Permafrostböden hoher Breitengrade enthalten etwa 25 Prozent des weltweiten Bodenkohlenstoffs. [12]

2.10.2 Freisetzung von Kohlenstoff infolge der Klimaerwärmung

Gemäß 4. Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change) stiegen die Oberflächentemperaturen des Permafrostbodens in der Arktis seit den 1980er Jahren (um bis zu 3 Grad Celsius). Die Schicht, die im Frühjahr und Sommer auftaut, wird in vielen Gebieten immer mächtiger und Teile dieser Schicht frieren im Winter nicht wieder ein. Die maximale Ausdehnung der Fläche mit saisonal gefrorenem Boden nahm in der Nordhemisphäre seit 1990 um etwa 7 Prozent ab [5].

Neben der zunehmenden Tiefe der auftauenden Bodenschichten führt die Klimaerwärmung auch zu einer verlängerten Auftauphase der oberen Schichten. Dadurch wird mehr organisches Material abgebaut und der Boden setzt größere Mengen Methan und Kohlendioxid frei.

Die Wissenschaftler rechnen damit, dass sich im Zeitraum der nächsten 100 Jahre beide Prozesse in den meisten subarktischen Landgebieten weiter fortsetzen und beschleunigen. Die südliche Grenze des Permafrostgebietes wird sich voraussichtlich um mehrere 100 Kilometer nach Norden verschieben. Es ist möglich, dass dabei große Mengen an Kohlenstoff, vorrangig in Form von Methan, aber auch als Kohlendioxid in die Atmosphäre freigesetzt werden.

Verlässliche Angaben über die künftig zu erwartenden Emissionen an Methan und Kohlenstoff aus diesem Reservoir gibt es noch nicht. Die Kohlenstoffvorräte in den Permafrostböden sind jedoch mit 25 Prozent des weltweiten Bodenkohlenstoffs erheblich, so dass ein großes Emissionspotenzial besteht [12].

Die Methan- und Kohlendioxidemissionen aus tauenden Permafrostböden kommen zu den anthropogenen Treibhausgasemissionen hinzu und verstärken die Klimaerwärmung. Dieser Prozess stellt eine wichtige positive Rückkopplung (verstärkende Wirkung) im Klimasystem dar.

Neben der Verstärkung des Treibhauseffektes wirkt sich das Tauen der Permafrostböden auch gravierend auf die Infrastruktur (beispielsweise Gefahren für Bahnstrecken, Rollbahnen auf Flughäfen, Öl- und Gasleitungen, Kernkraftwerke, Gebäude, Straßen), den Wasserhaushalt der Ökosysteme, Jagdgebiete und weitere Bereiche aus.

2.11 Schmelzen der Gletscher und Abnahme der Albedo im Himalaya

Im Himalaya gibt es eine Vielzahl von Gletschern. Sie bedecken eine Fläche von etwa 3 Millionen Hektar und bilden nach den polaren Eiskappen und Grönland den größten Eiskörper der Erde. Im Winter sammeln sich auf den Gletschern Schnee und Eis an. Im Sommer sind die Gletscher Quellen von Schmelzwasser und speisen die größten Flüsse Asiens, wie den Mekong, den Yangtse und den Ganges. Damit spielen sie für viele Hundert Millionen Menschen in Asien eine zentrale Rolle bei der Versorgung mit Wasser.

Der weltweite Rückzug der Gebirgsgletscher schließt auch die Gletscher im Himalaya ein. Allerdings in dieser Region mit besonders schwerwiegenden Folgen: falls das Schmelzen der Gletscher im Himalaya wie in bisherigem Maße anhält, ist auf längere Sicht die Wasserversorgung von mehreren hundert Millionen Menschen in China, Indien, Nepal, Pakistan und Bhutan hochgradig gefährdet. Zusätzlich wirkt der bereits beschriebene positive Rückkopplungsmechanismus im Zusammenhang mit dem Schmelzen von Schnee- und Eismassen. Eine Verringerung der mit Schnee und Eis bedeckten Fläche bedeutet eine Abnahme der Oberflächenalbedo (Abnahme der Reflektion der Sonnenstrahlung) und damit höhere Lufttemperaturen.

Ein verstärkender Effekt ist auch durch das gleichzeitige Eintreten eines anderen Kipp-Punktes möglich: Falls sich der indische Monsun abschwächen würde (siehe Kapitel 2.6), wären geringere Niederschläge die Folge und damit eine weitere Verringerung des Wasserdargebotes, die zum abnehmenden Schmelzwasser noch hinzu kommen würde. Für die Wasserversorgung in Indien würden sich damit zweifellos immense Probleme ergeben [3]. Geringere Niederschläge bedeuten außerdem weniger Schneefall auf Gletschern, verringerten Gletscherzuwachs und damit eine Verstärkung des Gletscherrückgangs.

2.12 Versauerung der Ozeane und Abnahme der Aufnahmekapazität für Kohlendioxid

Die Weltmeere sind der größte Speicher von Kohlenstoff. Im Ozean ist etwa 50-mal mehr Kohlendioxid gespeichert als in der Atmosphäre und 20-mal mehr als in der Biosphäre und den Böden. Gleichzeitig sind die Weltmeere die wichtigste Kohlendioxid-Senke, denn sie nehmen einen großen Teil des vom Menschen in die Atmosphäre emittierten Kohlendioxids auf. Insgesamt haben die Meere zwischen 1800 und 1995 etwa 48 Prozent der kumulierten (angesammelten) Kohlendioxid-Emissionen aus fossilen Energieträgern aufgenommen [14].

Mit steigender Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre erhöht sich der Eintrag von Kohlendioxid in die Ozeane. Dort bildet es mit Wasser Kohlensäure und Bicarbonat und bewirkt eine Versauerung des Meerwassers. Die Wissenschaftler haben diese Zunahme des Säuregehaltes der Ozeane durch Messungen

bereits nachgewiesen. Die Versauerung ist in erster Linie eine Folge der schnellen Aufnahme des Kohlendioxids im Meer. Bei einem langsamen Eintrag von Kohlendioxid ins Meer, wie er in der Erdgeschichte wiederholt stattfand, wird das Kohlendioxid bis in die Tiefsee hinunter gemischt, wo eine langsame Auflösung von kalkhaltigen Sedimenten der Versauerung entgegenwirkt [14]. Mit der gegenwärtig erfolgenden, beispiellosen Versauerung greift der Mensch erheblich in das chemische Gleichgewicht der Ozeane ein. Das kann für die Lebewesen in den Meeren nicht ohne Folgen bleiben. Bereits heute kommt es schon zu deutlich negativen Auswirkungen, wie der Gefährdung der Korallenriffe, die sich noch verstärken werden.

Viele Meereslebewesen, wie bestimmte Planktongruppen, Muscheln, Schnecken und Korallen, benötigen für den Aufbau ihrer Knochen- und Schalenstrukturen Kalk, den sie aus dem Meerwasser gewinnen. Saures Wasser behindert die Kalkbildung, was zur Schwächung des Knochen- und Schalenaufbaus bis hin zur Knochenauflösung dieser Lebewesen führen kann. Korallenriffe, die ohnehin durch aufgeheiztes Wasser unter Stress stehen, und alle davon abhängigen Arten sind in ihrer Existenz gefährdet. Es ist wissenschaftlich noch nicht geklärt, inwieweit sich die Schädigung der auf Kalk angewiesenen Meeresorganismen auf die gesamte Nahrungskette im Meer auswirkt und damit die gesamte Lebenswelt in den Ozeanen beeinträchtigt [14], [3].

Meereslebewesen bilden die Haupteiweißquelle für viele Millionen Menschen. Eine weitere ungebremste Versauerung der Ozeane, die unter Umständen die gesamte Nahrungskette im Meer stört, hätte deshalb ungeahnte Folgen [3].

2.13 Freisetzung von Methan aus Meeresböden

Im Meeresboden lagern Kohlenstoffmengen in Form von Methanhydraten, die in ihrer Größenordnung mit den weltweiten Kohlevorräten vergleichbar sind [14]. Durch die Erwärmung des Klimas besteht die Gefahr, dass aus diesen Methanhydraten das Treibhausgas Methan freigesetzt wird, in die Atmosphäre gelangt und die Erwärmung weiter verstärkt. Dieser Prozess ist besonders gravierend, da Methan ein erheblich stärkeres Treibhausgas als Kohlendioxid ist.

Methanhydrat besteht aus gefrorenem Wasser, in dessen Kristallgitter die Gasmoleküle des Methans eingeschlossen sind. Es sieht aus wie schmutziges Eis und ist brennbar. Eine Besonderheit besteht darin, dass große Methanmengen auf kleinstem Raum gespeichert sind: bei der Auflösung der Hydratform (Übergang in die Gasphase) nimmt das Volumen des Methans um das 170-fache zu [14].

Methanhydrate sind nur unter bestimmten Bedingungen stabil: hoher Druck und niedrige Temperatur. Derartige Bedingungen herrschen am Meeresboden ab etwa 500 Meter Wassertiefe. In polaren Gebieten mit sehr niedrigen Wassertemperaturen kommt Methanhydrat in geringerer Tiefe, ab etwa 250 Metern am Meeresboden vor [12, 14]. Auch in Permafrostböden gibt es Vorkommen von

Methanhydrat. In kontinentalen arktischen Regionen können innerhalb der Permafrostböden Methanhydrate in Tiefen von 100 bis etwa 2000 Metern unterhalb der Landoberfläche verbreitet sein [12].

Am Meeresboden kann die Dicke der Methanhydratschicht bis zu einige 100 Meter betragen. Mit zunehmender Bodentiefe steigt die Temperatur wegen der Erdwärme an, und das Methanhydrat wird instabil. Unterhalb dieser Stabilitätszone von einigen 100 Metern kann Methan wieder gasförmig im Sediment vorkommen [14].

Die genaue Größenordnung der Vorkommen von Methanhydrat ist nicht bekannt. Der WBGU hält Schätzungen von 500 bis 3000 Gigatonnen Methanhydrat für vertrauenswürdig [14]. Eine vergleichbare Menge an Methan befindet sich zudem gasförmig unterhalb der Hydrate. Um die Größenordnung dieser Mengen beurteilen zu können, hier zwei Zahlen zum Vergleich: gegenwärtig enthält die Atmosphäre 805 Gigatonnen Kohlenstoff, davon stammen 210 Gigatonnen aus anthropogenen Emissionen [14].

Die globale Erwärmung des Klimas kann sich auf folgende Weise auf die Stabilität der Methanhydratvorkommen auswirken. Durch die Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur steigen auch die Meeresoberflächentemperaturen. Falls diese Erwärmung im Laufe der Zeit auch die Tiefsee erreicht und Temperaturerhöhungen in der Methanhydratschicht hervorruft, verringert sich die Stabilitätszone des Hydrats. Dabei werden die Methanhydrate meist von unten her aufgetaut⁴ und es bildet sich Methangas unterhalb der Hydratschicht. Dieses Gas kann einerseits durch kleine Kanäle oder durchlässige Sedimentschichten die Hydratschicht durchdringen und aus dem Meeresboden entweichen. Wenn sich sehr viel Methangas bildet und die Stabilitätszone sehr dünn wird, kann dieses Gas andererseits auch die Methanhydratschicht sprengen und einen sogenannten "blowout" auslösen. Bei einem derartigen "blowout" werden schlagartig große Methanmengen freigesetzt. Die freigesprengten Methanhydratbrocken sind leichter als Wasser, steigen an die Meeresoberfläche und lösen sich dort auf [14]. In diesen Fällen reißt der Auftrieb an der Wasseroberfläche ab, weshalb manche Wissenschaftler das Verschwinden von Schiffen wie zum Beispiel im Bermuda-Dreieck mit solchen "blowouts" in Zusammenhang gebracht haben.

Eine Erhöhung der Meeresoberflächentemperaturen wird sich in der Regel nur langsam - im Laufe von einigen Jahrhunderten - bis zum Meeresboden durchsetzen. Ähnlich lange dauert es, bis sich die Sedimentschicht am Meeresboden bis in mehrere 100 Meter Tiefe erwärmt. Deshalb ist das Entweichen von Methan

4 Während im Ozean die Temperatur mit zunehmender Tiefe abnimmt, nimmt sie in der Methanhydratschicht wegen der Erdwärme wieder zu. Im Falle einer Erwärmung der Hydratschicht beginnt deshalb die Stabilitätszone von unten her zu schrumpfen (vgl. [14], Abb. 6.1-1, S. 94) und das Hydrat taut von unten her auf. Dadurch erhöht sich die Menge gasförmigen Methans unterhalb der Hydratschicht. Falls sich der Ozean so stark erwärmt, dass das Methanhydrat bereits an der oberen Grenze der Schicht instabil wird, löst sich das Hydrat von oben her vollständig auf.

in erster Linie eine langfristige Gefahr für das Klima. Über Jahrhunderte könnte kontinuierlich Methan freigesetzt werden, das die globale Erwärmung verstärkt und deren Eindämmung auf Dauer erschwert [14].

Eine kurzfristige Destabilisierung von Methanhydrat ist nur bei Hydratvorkommen in geringer Meerestiefe und in gut durchmischten Meeresgebieten möglich. Auch wenn sich Meeresströmungen ändern, kann das Konsequenzen für die Temperaturen am Meeresboden haben. Wenn sich zum Beispiel die Tiefenwasserbildung im Nordmeer abschwächt oder wenn das Absinken kalter Wassermassen ganz abreißt (siehe Kapitel 5), könnten die Temperaturen am Meeresboden in einigen Teilen des Nordatlantiks erheblich ansteigen und vorhandene Hydratvorkommen kurzfristig destabilisieren.

3. RISIKO UND UNSICHERHEITEN DES EINTRETENS VON KIPP-PUNKTEN

Viele Prozesse, die im Zusammenhang mit den Kipp-Punkten stehen, sind noch nicht ausreichend erforscht. Deshalb ist es auch schwierig zu bewerten, wann und in welchem Ausmaß Kipp-Punkte eintreten. So sind zum Beispiel dynamische Prozesse, die bei großen Eismassen eine Rolle spielen, nicht hinreichend bekannt und können auch mit Modellen nicht simuliert werden. Deshalb können die Wissenschaftler nicht beurteilen, unter welchen Bedingungen das Westantarktische Eisschild abzubrechen droht.

Ein anderes Beispiel ist die Freisetzung von Methangas aus Hydratschichten. Stabilität und Durchlässigkeit von Sedimentschichten im Meeresboden sind von sehr unterschiedlichen lokalen Gegebenheiten abhängig [14], die nicht ausreichend bekannt sind. Deshalb ist es sehr schwierig zu schätzen, wie viel Methangas bei einer Erwärmung des ozeanischen Tiefenwassers entweichen könnte.

Lenton et al. [2] versuchen, das Risiko und die Unsicherheiten des Eintretens einiger (nicht aller, in diesem Hintergrundpapier aufgeführter) Kipp-Punkte zu beurteilen. Die Autoren dieser wissenschaftlichen Veröffentlichung werteten dazu die Fachliteratur aus und führten eine Expertenbefragung durch. Im Mittelpunkt standen dabei die Fragen, wie sensitiv Prozesse, die mit Kipp-Punkten im Zusammenhang stehen, auf die globale Erwärmung reagieren und wie gut die diesen Prozessen zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen bekannt sind. Folgende Ergebnisse resultierten:

1. Hohe Sensitivität gegenüber globaler Erwärmung und vergleichsweise geringe Unsicherheit im Hinblick auf die physikalischen Mechanismen: Schmelzen des Grönländischen Eisschildes und Anstieg des Meeresspiegels sowie Schmelzen der Eismassen in der Arktis.

2. Mittlere Sensitivität gegenüber globaler Erwärmung und größte Unsicherheit im Hinblick auf die physikalischen Mechanismen: Instabilität des Westantarktischen Eisschildes, Kollaps der borealen Wälder, Austrocknung und Kollaps des Amazonas-Regenwaldes, Zunahme und mögliche Persistenz des El Niño-Phänomens sowie Instabilität der Sahelzone.
3. Vergleichsweise geringe Sensitivität gegenüber globaler Erwärmung und mittlere Unsicherheit im Hinblick auf die physikalischen Mechanismen: Störung der ozeanischen Zirkulation im Nordatlantik.

4. WAS MUSS GETAN WERDEN, UM DER GEFAHR DES EINTRETENS VON KIPP-PUNKTEN ZU BEGEGNEN?

In diesem Hintergrundpapier wurde erläutert, welche Gefahren von einer Reihe von Kipp-Punkten im Klimasystem ausgehen können. Nach gegenwärtigen Erkenntnissen können durch die globale Erwärmung bereits in diesem Jahrhundert Kipp-Punkte erreicht werden. Beispiele sind das Schmelzen von Eismassen in der Arktis und des Grönländischen Eisschildes. Weitere Prozesse wie Instabilität und Abbruch des Westantarktischen Eisschildes, Kollaps der borealen Wälder, Austrocknung und Kollaps des Amazonas-Regenwaldes, Zunahme und mögliche Persistenz des El Niño-Phänomens sowie Instabilität der Sahelzone haben prinzipiell das Potenzial, mit einem Kipp-Punkt in näherer Zukunft zu überraschen [2].

Wegen der starken Klimaänderungen, die Kipp-Punkte auslösen können und vor dem Hintergrund der diskutierten Unsicherheiten, ist politisches Handeln zwingend erforderlich. Zum einen müssen konsequente und anspruchsvolle Maßnahmen zur Minderung der Emissionen von Treibhausgasen durchgeführt werden, zum anderen sind Maßnahmen zur Anpassung an die unvermeidliche Klimaänderung notwendig.

4.1 Begründung der Minderungsmaßnahmen

Nach heutigem wissenschaftlichem Kenntnisstand können drastische Klimaänderungen verhindert werden, wenn es gelingt, den Temperaturanstieg auf 2 Grad Celsius gegenüber der vorindustriellen Zeit zu begrenzen [3], [6], [15]. Zwischen 1906 und 2005 nahm das globale Mittel der bodennahen Lufttemperatur bereits um 0,74 Grad Celsius zu. Deshalb darf die globale Mitteltemperatur um nicht mehr als weitere rund 1,2 Grad Celsius steigen.

Um dieses 2 Grad Celsius-Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 75 Prozent zu erreichen, müssen die Konzentrationen der Treibhausgase in der Atmosphäre bei 400 parts per million and volume (ppmv, das heißt, 400 Kohlendioxid-Moleküle auf eine Million Luftmoleküle) Kohlendioxid-Äquivalenten⁵ stabilisiert werden. Dazu ist der Zuwachs der globalen Treibhausgas-Emissionen bis 2020 zu stoppen. Anschließend müssen die weltweiten Emissionen bis zum Jahr 2050 um 50 Prozent gegenüber 1990 sinken - d.h. um 60 Prozent gegenüber den heutigen Werten - und sie dürfen dann auch langfristig dieses Niveau nicht überschreiten [6].

4.1.1 Klimaschutzmaßnahmen zur Einhaltung des 2 Grad Celsius-Zieles

Im 4. Sachstandsbericht fassten die Wissenschaftler des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen - IPCC - zusammen, mit welchen Maßnahmen und Techniken unterschiedliche Niveaus von Minderungen der Emissionen treibhauswirksamer Gase erreichbar sind [5].

Die Maßnahmen beschränken sich nicht nur auf die Minderung der Kohlendioxid-Emissionen, sondern umfassen alle sechs im Kyoto-Protokoll erfassten Gase (Kohlendioxid (CO₂), Distickstoffmonoxid (N₂O), Methan (CH₄), Schwefelhexafluorid (SF₆), teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (H-FKW) und vollfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW)). Es ist erforderlich, dass Minderungsmaßnahmen in allen Sektoren der Wirtschaft (zum Beispiel Energieversorgung, Verkehr, Gebäudebereich, Industrie, Land-, Forst- und Abfallwirtschaft) durchgeführt werden.

Ein großes Potenzial besteht bei der Reduzierung der energiebedingten Kohlendioxid-Emissionen. Das sind jene Emissionen, die bei der Bereitstellung von Strom und Wärme sowie bei der Verbrennung von Treibstoffen im Verkehr entstehen. Es geht besonders um:

- ▶ Effizienzsteigerungen und Einsparungen bei der Energienutzung, vor allem mit besserer Gebäudedämmung und sparsameren Geräten, Maschinen und Fahrzeugen
- ▶ Effizienzsteigerungen bei der Energieversorgung (vor allem mit modernen Kraftwerken und der Kraft-Wärme-Kopplung)
- ▶ Brennstoffwechsel durch Einsatz erneuerbarer Energien und Erdgas anstelle von Kohle und Öl

Der Weltklimarat zeigt, dass das 2 Grad Celsius-Ziel mit Techniken erreichbar ist, die heute kommerziell verfügbar sind oder deren Serienreife in den kommenden Jahrzehnten erwartet wird. Voraussetzung dafür ist, dass die Politik angemessene Anreize für Investitionen in die Entwicklung und Anwendung dieser Techniken setzt und die nötigen Rahmenbedingungen schafft [5], [6].

⁵ In den Kohlendioxid-Äquivalentkonzentrationen sind auch die weiteren, durch den Menschen verursachten Treibhausgase enthalten, indem sie gemäß ihrer Wirkung auf Kohlendioxid-Konzentrationen umgerechnet und zu den "reinen" Kohlendioxid-Emissionen addiert werden. Die Gesamtkonzentration der langlebigen Treibhausgase in der Atmosphäre betrug 2005 bereits etwa 455 Kohlendioxid-Äquivalentkonzentrationen.

4.2 Begründung der Anpassungsmaßnahmen

Anpassungsmaßnahmen helfen dem Menschen, die Folgen eines sich ändernden Klimas zu bewältigen - zum Beispiel verstärkte Niederschläge, höhere Temperaturen, Trockenheit und Wasserknappheit oder häufiger auftretende Stürme) - und zielen darauf ab, künftige Gefährdungen zu vermeiden. Anpassung zielt darauf ab, die Risiken und Schäden gegenwärtiger und künftiger negativer Auswirkungen kostenwirksam zu verringern oder potenzielle Vorteile zu nutzen. Beispiele für Anpassungsmaßnahmen umfassen unter anderem die effizientere Nutzung knapper Wasserressourcen, die Anpassung von Baunormen an künftige Klimabedingungen und Wetterextreme, den Bau von Infrastrukturen für den Hochwasserschutz und die Anhebung der Deiche gegen den Anstieg des Meeresspiegels, die Entwicklung trockenheitstoleranter Kulturpflanzen, die Nutzung sturm- und brandresistenter Baumarten und Forstwirtschaftspraktiken sowie die Aufstellung von Raumplänen und die Anlage von Korridoren zur Förderung der Artenmigration [16].

Die Anpassung beinhaltet sowohl nationale als auch regionale Strategien sowie praktische Maßnahmen auf allen politischen Ebenen oder von Privatpersonen. Anpassung kann vorgehend oder reaktiv sein, und sie betrifft sowohl natürliche als auch soziale Systeme [16].

Das Umweltbundesamt gründete 2006 das Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass). Das war ein wichtiger nationaler Schritt, um Strategien zur Anpassung an die Klimaänderung zu erarbeiten. KomPass hilft, die Risikowahrnehmung der Entscheidungsträger in Unternehmen und Verwaltung zu verbessern, die Anfälligkeit verschiedener Sektoren und Bereiche gegenüber Klimaänderungen besser zu beurteilen und systematisch Risikovorsorge gegenüber dem Klimawandel zu betreiben. KomPass wertet bestehende Forschungsergebnisse aus, organisiert Netzwerke zwischen Landes- und Bundesbehörden und unterstützt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit darin, bis Ende 2008 eine Nationale Strategie zur Anpassung an den Klimawandel zu erarbeiten und dessen Umsetzung zu realisieren.

Kipp-Punkte bergen die Gefahr drastischer, teilweise abrupter Klimaänderungen. Als Folge könnten Maßnahmen zur Anpassung nicht rechtzeitig ergriffen werden, oder mit sehr hohem Aufwand und extrem hohen Kosten verbunden sein. Deshalb müssen zwingend die anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen gemindert werden. Der Mensch macht mit dem anhaltenden Ausstoß von Treibhausgasen ein globales Experiment mit der Lufthülle seines Planeten, von dem er nicht genau weiß, wie es ausgehen wird. Bereits in diesem Jahrhundert können Kipp-Punkte im Klimasystem eintreten. Das ist Anlass zu schnellem und gezieltem Handeln.

LITERATUR UND WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN

- [1] Schellnhuber, H.-J., Held, H. (2002) in *Managing the Earth: the Eleventh Linacre Lectures*, eds.: Bridon, J. & Downing, T. (Oxford University Press, Oxford), S. 5 - 34
- [2] 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*. PNAS, vol. 105, no. 6, 1786 - 1793
www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0705414105
- [3] "Kipp-Punkte im Klimasystem." Interview mit Hans Joachim Schellnhuber, Direktor des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung
<http://www.germanwatch.org/rio/hjsint06.pdf>
- [4] Rahmstorf, Stefan: "Abrupte Klimawechsel"
(http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Other/rahmstorf_abrupteklimawechsel_2004.pdf)
- [5] *Klimaänderung 2007: Zusammenfassungen für Politische Entscheidungsträger*. Deutsche Übersetzung herausgegeben von ProClim - Forum for Climate and Global Change, vom Umweltbundesamt Österreich und von der Deutschen IPCC Koordinierungsstelle, 89 S.
- [6] UBA-Hintergrundpapier: "Klimaänderungen, deren Auswirkungen und was für den Klimaschutz zu tun ist"
<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/ipccsynthese.pdf>
- [7] Bals, C., Hamm, H.: "Die Welt am Scheideweg", *Natur + Kosmos* 11/2006, S. 20 - 26
- [8] Rahmstorf, Stefan: "Die Eiszeit kommt! - und andere Presseirrtümer"
<http://www.pik-potsdam.de/~stefan/eiszeitkommt.html>
- [8a] Rahmstorf, Stefan, 2000: „The Thermohaline Ocean Circulation: A System with Dangerous Thresholds?“ *Climatic Change* 46, S. 247 – 256
- [8b] Rahmstorf, Stefan, Zickfeld, Kirsten, 2005: „Thermohaline Circulation Changes: A Question of Risk Assessment“, *Climatic Change* 68, S. 241 – 247
- [9] *El Niño / La Niña*. Hintergrundinformation des Max-Planck-Instituts für Meteorologie
(<http://www.mpimet.mpg.de/presse/faq-s/das-el-nino-southern-oscillation-enso-phaenomen.html>)
- [10] "Amazonas und Klima", Hintergrundinformation des WWF, Oktober 2007
http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/HG_Amazonas_und_Klima.pdf

- [11] "Artenreichtum Amazonas" Hintergrundinformation von Greenpeace (http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/waelder/Artenreichtum_Amazonas.pdf)
- [12] UBA-Hintergrundpapier: "Klimagefahr durch tauenden Permafrost?" (<http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/veroeffentlichungen/permafrost.pdf>)
- [13] "Temperierte und boreale Wälder", Hintergrundinformation des WWF, Januar 2007 (www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/HG_Temperierte_und_boreale_Waelder_August_06.pdf)
- [14] "Die Zukunft der Meere - zu warm, zu hoch, zu sauer" Sondergutachten des Wissenschaftlichen Beirates der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen, 2006, Kapitel 4 http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006.pdf
- [15] "Die Zukunft in unseren Händen - 21 Thesen zur Klimaschutzpolitik des 21. Jahrhunderts und ihre Begründungen." Umweltbundesamt 2005, climate change 06/05 <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2962.pdf>
- [16] Grünbuch der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: "Anpassung an den Klimawandel in Europa - Optionen für Maßnahmen der EU", {SEK(2007)849}, 30 Seiten (http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/de/com/2007/com2007_0354de01.pdf)

