

Globale Klimaerwärmung

(Julia Hackenbruch)

ZUSAMMENFASSUNG

„Bodennahe Klimaänderungen haben in den letzten 100 Jahren, also im Jahrhundert der stark wachsenden Industrialisierung, der extrem ansteigenden Nutzung von fossilen Energien und der weltweiten Umgestaltung der Landoberflächen und der Bodennutzung eindeutig stattgefunden“ (21). Eine Zunahme der globalen Mitteltemperaturen in der unteren Atmosphäre und in den oberen Ozeanschichten durch den Einfluss des Menschen über die Zunahme der Konzentrationen bestimmter Spurengase ist nicht zu leugnen. Allerdings besteht für das chaotische Klimasystem immer die Schwierigkeit, die Schwankungen der atmosphärischen Größen nach natürlicher und anthropogen verursachter Variabilität zu trennen, denn vielfältige Wechselwirkungen im Klimasystem erschweren Erklärungen und Prognosen erheblich. Das Forschungsfeld der Klimafolgenforschung widmet sich den ökologischen und sozioökonomischen Folgen der Klimaänderungen für das Leben von Mensch, Tier, Pflanze und die Lebensbedingungen in den verschiedenen Lebensräumen der Erde. Der Klimawandel ist eines der drängendsten Probleme der heutigen Zeit. Deshalb bedarf es einer sachlichen wissenschaftlichen Diskussion und einer integrativen und nachhaltigen nationalen und internationalen Energie- und Klimaschutz-Politik, um die eingesetzte globale Klimaerwärmung zu bremsen und seinen Auswirkungen auf das System Erde gegenzusteuern.

KLIMASYSTEM UND ATMOSPHERE

Das Klima ist als „das statistische Verhalten der Atmosphäre, das für eine relativ große zeitliche Größenordnung charakteristisch ist“ definiert (12). Das globale Klimasystem, auch als Geobiosphäre bezeichnet, wird primär von der solaren Strahlung angetrieben und beinhaltet Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Lithosphäre und Biosphäre (einschließlich der Antroposphäre). Das Klimasystem zeichnet sich durch seine hohe Komplexität und chaotische Struktur aus. Aufgrund der Tatsache, dass die einzelnen Kompartimente sowohl interne als auch externe Wechselwirkungen aufweisen und die Einzelprozesse zusätzlich auf unterschiedlichen Zeitskalen ablaufen, sind Zusammenhänge und Folgewirkungen häufig nicht eindeutig identifizierbar und daher nur schwierig und mit großer Unsicherheit modellierbar und prognostizierbar (14, 27, 12). Ein wichtiges Charakteristikum des Klimasystems sind außerdem hysteretische Effekte (das Zurückbleiben einer Wirkung hinter dem jeweiligen Stand der sie bedingenden veränderlichen Kraft), d. h. die Trägheit, die vor allem auf die langsame Reaktion und ausgleichende Wirkung der Wassermassen der Ozeane auf atmosphärische Veränderungen zurückzuführen ist. So haben aktuell induzierte Veränderungen der Zusammensetzung der Atmosphäre erst nach mehreren Jahrzehnten spürbare Auswirkungen auf die terrestrischen und marinen Ökosysteme.

KLIMAREKONSTRUKTION UND KLIMAGESCHICHTE

Natürliche Klimavariabilität

„Seit die Erde existiert – also seit zirka 4,6 Milliarden Jahren ändert sich das Klima, und das in unterschiedlicher Art und aus unterschiedlichen Gründen.“ (28).

Die natürliche Klimavariabilität ist von drei Faktorengruppen bestimmt. Die erste umfasst extraterrestrische, astronomische Gründe. Dies sind regelmäßige Änderungen der Erdbahnparameter, die sogenannten Milankovich-Parameter, zu denen die Exzentrizität der Ellipse, die Schiefe der Ekliptik und die Präzession der Erde zählen, Variationen der Strahlungsleistung der Sonne und Meteoriteneinschläge. Die zweite Gruppe umfasst terrestrische, geophysikalische Gründe wie Kontinentalverschiebung, und Vulkanismus. Zum

dritten sind interne Rückkopplungen im Klimasystem zu nennen, z. B. die Kopplung von Meeresströmungen und Atmosphäre wie beim Golfstrom oder Wechselwirkung zwischen Biosphäre und Atmosphäre über die Vegetation. Ebenso gehören dazu klimatische Sondersituationen wie ENSO (El Nino / Southern Oscillation) oder NAO (North Atlantic Oscillation).

Eine bis zu mehrere Hunderttausende von Jahren zurückreichende Rekonstruktion der atmosphärischen Zustände ist mithilfe verschiedener paläoklimatischer Methoden möglich. Dazu gehören chemisch-physikalische Methoden (u. a. Isotopenverhältnisse), geologische Methoden (u.a. Sedimentanalysen, Stratigraphie), mineralische Methoden (Bodenschätze), geomorphologische Methoden und geobotanische Methoden (phänologische Daten, Pflanzenpollenspektren, Dendrochorologie) (12, 28).

Klimageschichte: historische Klimakurven

Grundsätzlich lassen sich im Erdklima zwei Zustände unterscheiden: ein akryogenes Warmklima ohne jegliche Eisbildung und die Eiszeitalter. Die Eiszeitalter dauern jeweils einige Jahrmlionen, dazwischen liegen erheblich längere wärmere akryogene Warmklimaepochen ohne Eisvorkommen an den Polen. Die Eiszeitalter gliedern sich ihrerseits in die Eiszeiten / Glaziale als kalte Epochen und relativ warme Zwischeneiszeiten / Interglaziale. Glaziale, deren Hauptcharakteristikum riesige Eisschilde sind, werden wiederum in Stadiale (relativ kalte Zeiten) und Interstadiale (relativ warme Zeiten) unterteilt. Seit der Entstehung der Erde vor etwa 4,6 Mrd. Jahren hat zunächst eine Abkühlung der Globaltemperatur bis auf das heutige Temperaturniveau von 15°C im globalen Mittel, das vor ca. 1-2 Mrd. erreicht wurde, stattgefunden.

Seit 11000 Jahren ist eine Warmzeit-Epoche (Holozän, Neo- oder Flandrinische Warmzeit) angebrochen, mit Temperaturen, die um vier bis fünf °C höher liegen als die der Stadiale und zwei bis drei °C niedriger liegen als die der Interstadiale innerhalb der vorhergehenden Eiszeit. Die aktuelle Warmzeit ist dabei relativ stabil ohne große Klimaschwankungen. Kleinere positive Schwankungen führten zum holozänen Klimaoptimum vor 7000 Jahren (Atlantikum), zum Mittelalterlichen Klimaoptimum mit Maxima der Temperatur um 900, 1100, 1400 n. Chr., das mit Temperaturen, die um ein bis zwei Grad höher lagen als die heutigen, die Besiedelung Grönlands und Islands und Weinbau bis nach England ermöglichte; Kühlere Epochen waren die so genannte „Kleine Eiszeit“ mit Tiefsttemperaturen um 1600/1650 und 1850. Seit der Industrialisierung hat anschließend ein markanter Anstieg der globalen Mitteltemperatur stattgefunden, der den Begriff des Klimawandels prägt. Die globale Erdoberflächentemperatur stieg im Zeitraum 1901 – 2000 um 0,6 °C, bei Betrachtung des Zeitraums 1906 – 2005 sogar um 0,74 °C. Allerdings ist der Erwärmungstrend zeitlich und regional zu differenzieren und weder einheitlich noch kontinuierlich. Seit 1979 lagen alle globalen Jahresmittel über dem Durchschnitt der Jahre 1961-1990, elf der zwölf Jahre 1995 – 2006 gehörten zu den zwölf wärmsten Jahren seit Beginn der Klimaaufzeichnungen um 1850. Die Erwärmung der unteren Atmosphäre zieht einen Anstieg des weltweiten Meeresspiegels um 17 cm im 20. Jahrhundert nach sich, der vor allem auf die thermische Expansion des oberen Ozeans infolge höherer Wassertemperaturen und das Rückschmelzen der kontinentalen Gletscher zurück zu führen ist. Ebenso wird eine Verringerung der Schneedecke auf Nordhemisphäre beobachtet (30, 19). Hinzu kommen weltweit gravierende Auswirkungen für die Ökosysteme.

KLIMAPROGNOSEN UND KLIMAMODELLIERUNG

Klimaszenarien

Klimaszenarien als „verschiedene Entwürfe von Zukunft, die die alle denkbar und plausibel, in sich konsistent, aber nicht notwendig wahrscheinlich sind“ (30) stellen ein wichtiges Instrument dar, um mögliche Entwicklungen bzw. Entwicklungskorridore des globalen

Klimas mit ausweisbaren Wahrscheinlichkeiten für ihren Eintritt zu simulieren. Solche Szenarien ermöglichen den Verantwortungsträgern in Politik und Wirtschaft, rechtzeitig Reaktionen planen zu können oder unerwünschte Folgen von vornherein zu vermeiden.

Die bekanntesten Klimaszenarien werden vom IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)(19) erstellt. Es handelt sich um mehrere Szenarien, denen unterschiedliche Annahmen in Bezug auf Bevölkerungsentwicklung, Entwicklung der Weltwirtschaft, Effizienz der Energienutzung, technologische Entwicklung etc. zugrunde liegen und für die daher vergleichsweise niedrige, mittlere oder hohe Anstiege der klimatisch wirksamen Substanzen angenommen werden. Denn die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen und das Angebot an fossiler Energie sind abhängig von Klimapolitik und technologischem Fortschritt. Daher ist die daran gekoppelte Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen nicht zu prognostizieren. Das Ergebnis der Modellierungen sind bedingte Vorhersagen, die sich auf bestimmte Annahmen stützen. Für die IPCC-Szenarien sind sehr genaue storyboards definiert, die zu vier Szenariengruppen führen: A1, A2, B1, B2. Es wird –je nach Szenario– eine globale Erwärmung von 1,1 – 6,4 °C prognostiziert beim Vergleich des Zeitraums 2090 - 2099 mit der Temperatursituation 1980-1999 (30, 19).

Klimamodelle

Computermodelle als Abbilder des Erdsystems beschreiben über mathematische Gleichungen die Wechselwirkung zwischen physikalischen und biogeochemischen Prozessen in Atmosphäre, Ozean, Meereis und Landoberflächen quantitativ / numerisch; es ergibt sich eine Verteilung der häufigsten, mittleren und extremen Wetter- und Witterungszustände für einen Ort oder Raum. Möglich wird so eine Rekonstruktion der Vergangenheit (Kontrolllauf) und Berechnungen für mögliche Klimaentwicklungen in den nächsten 100 Jahren (Szenariolauf). Die Frage nach Klimaentwicklung ist eng verknüpft mit der globalen Erwärmung als Folge menschlicher Aktivitäten, eine entscheidende Rolle spielen die Entwicklung der Konzentrationen atmosphärischer Treibhausgase und Aerosole und ihre nicht-linearen Wechselwirkungen. Ziel der Klimamodellierung ist eine verstärkte Risikowahrnehmung in Politik, Gesellschaft und Wirtschaft und die Möglichkeit zur Anpassung an den Klimawandel. Die Modelle liefern Grundlagendaten für Hydrologen, Biologen, Energietechniker, Medizinmeteorologen, Bauphysikern, Katastrophenschützer und Agrarwissenschaftler.

Für Berechnungen mit komplexen globalen Klimamodellen sind die Ergebnisse mögliche großskalige Veränderungen. In diese Globalmodelle, die eine Auflösung von ca. 200 km ermöglichen, werden regionale Klimamodelle mit hohen Auflösungen (10-50 km Gitterweite) eingebettet (Nesting). Die Methode ist ein dynamisches Downscaling, bei dem die Berechnungen auf kleinen Skalen von den berechneten großskaligen Verhältnissen angetrieben werden. Regionale Klimamodelle ermöglichen Detailuntersuchungen wie mit einer Lupe, sie schlagen also eine Brücke zwischen globalen Klimaänderungen und möglichen lokalen und regionalen Auswirkungen. Ein Beispiel ist das Modell REMO des Max-Planck-Instituts für Meteorologie. Drei globale Klimaszenarien (B1, A1B, A2) des IPCC wurden für mögliche Klimaänderungen von 2001 bis 2100 für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland und des Alpenraumes regionalisiert. Der zum Test der Güte des Modells durchgeführte Kontrolllauf mit einer Simulation der Vergangenheit und deren Vergleich mit unabhängigen Klimabeobachtungen von 1950 – 2000 ergab, dass REMO die Klimaentwicklung des vergangenen Jahrhunderts realitätsnah zeigt (16, 20, 22, 23, 7, 8, 30).

Unsicherheiten bei derartigen Klimaprognosen

Die Ergebnisse von Klimamodellen hängen entscheidend von den jeweiligen Eingabe-Annahmen über Entwicklung der Weltbevölkerung, Industrialisierung, Verbrauch fossiler Brennstoffe, Landnutzungswandel, Waldrodungen, etc. und dem damit verbundenen Klimagas-Konzentrationen ab. Außerdem können einige mögliche anthropogene

Einflussfaktoren nicht berücksichtigt werden, weil sie zu komplex sind und /oder physikalisch-chemisch zu wenig erforscht sind (z.B. Aerosole, Ozonchemie). Ebenso können natürliche Einflüsse nicht beschrieben werden, weil sie nicht vorhersagbar oder unzureichend bekannt sind (Vulkanismus, längerfristige Trends der Sonnenstrahlung, Stellung der Erde zur Sonne). So ergibt sich lediglich eine angenäherte Simulation des sehr komplexen realen Klimasystems; die Aussagekraft der Modelle ist außerdem umso geringer, je kleiner das betrachtete Gebiet ist. Es bleiben viele offene Forschungsfragen zum Klimawandel, z.B. zur Änderungen der Vegetation im zukünftigen Klima, zu Änderungen in der Masse des Inlandeises, zu vegetationsdynamischen Rückkopplungen oder zu Wechselwirkungen chemischer Prozesse in der Atmosphäre. Des Weiteren stellen Klimaszenarien oder –projektionen keine Vorhersagen für einen bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft dar, sondern sie stellen mögliche Entwicklungen bzw. Entwicklungskorridore inklusive einer bestimmten Schwankungsbreite der prognostizierten Werte dar. Die Auswertungen sind nur für längere Mittelungszeiträume, am besten für Zeitspannen von 30 Jahren, vergleichbar (16, 20, 22, 23, 7, 8, 30).

REMO - Ergebnisse für Europa

Die prognostizierte Klimaerwärmung in Europa erfolgt nicht gleichmäßig, es bestehen regionale und auch saisonale Unterschiede. Für den Mittelmeerraum wird ein Anstieg der Sommertemperaturen um mehr als 2,5 °C vorausgesagt, für Mitteleuropa eine Erwärmung um weniger als 1,5 °C, für Osteuropa eine Erwärmung um weniger als 1 °C. In den Wintermonaten ist ein Temperaturanstieg um etwa 1,5 °C bis 2 °C von Skandinavien bis zum Mittelmeer wahrscheinlich. Dabei wird der winterliche Temperaturanstieg bei Einfluss des Atlantiks (Großbritannien, Portugal, Teile von Spanien) aber geringer ausfallen. In Bezug auf den Niederschlag wird ein Trend zur Niederschlagsabnahme von bis zu 50 % im Mittelmeerraum in allen Jahreszeiten prognostiziert. Zudem soll es zu einer Abnahme der Niederschläge in den Sommermonaten (z. B. in Großbritannien um mehr als 30 %), und gleichzeitig höheren Niederschlägen in Winter und Herbst in weiten Teilen Europas kommen, bei einer gleichzeitigen Verlagerung des Azorenhochs nach Nordosten. Des Weiteren ist ein Rückgang der Schneehöhe in den Hochlagen der Alpen und den norwegischen Gebirgen um 30 – 50 % vorausgesagt (16, 20, 22, 23, 7, 8, 30).

REMO - Ergebnisse für Deutschland

Im Vergleich des Zeitraums 1950-2000 mit 2071-2100 werden sich im Jahresmittel laut der REMO-Daten im A1B-Szenario in Nord- und Mitteldeutschland die Temperaturen um 3-3,5 °C erhöhen, in Süddeutschland um 3,5-4 °C und im Alpenraum um bis zu 5 °C. Die geringste Temperaturerhöhung wird für die Nordsee mit Werten um 2,5-3 °C prognostiziert. Damit wird nach Süden hin eine zunehmende Temperaturzunahme erwartet.

Nach Szenario A1B werden weniger Sommerniederschläge in weiten Teilen Deutschlands (Süd-, Südwest-, Nordost-D: -30 %) und mehr Winterniederschläge in den Mittelgebirgen in Süden, Südwesten und Südosten (+30 %) fallen, woraus nur geringe Änderungen der mittleren Niederschlagssumme resultieren. Mögliche Folgen sind eine im Sommer eine erhöhte Waldbrandgefahr, Einbußen in der Landwirtschaft und Einschränkungen der Binnenschifffahrt. In Winter ergibt sich weniger Schneeanteil am Gesamtniederschlag und ein Rückgang der mittleren Schneehöhe um 80 % im Januar.

Regional differenziert wird eine Erwärmung an der Ostseeküste um 2,8 °C, an der Nordseeküste um 2,5°C prognostiziert, bei gleichzeitiger Abnahme der Sommerniederschläge um 25 % und Zunahme der Winterniederschläge um 30 %, was Auswirkungen auf den Tourismus haben wird. In den Alpen wird eine Wintererwärmung um bis zu 4 °C bis 2100 erwartet, sodass nur noch ein Sechstel des Gesamtniederschlags als Schnee (⇔ 1950 – 2000: Anteil von einem Drittel) fallen wird. Deutlich mehr Niederschlag wird in der Region um

Leipzig fallen, da eine veränderte Anströmrichtung der Luftmassen auf das Erzgebirge vorliegen wird. Die Region Freiburg verzeichnet einen Temperaturanstieg um mehr als drei Grad, mit trockeneren Wintern, da die Wolken an Vogesen und Ostflanke des Schwarzwaldes abregnen (16, 20, 22, 23, 7, 8, 30).

MÖGLICHE KONSEQUENZEN FÜR GEO- UND BIOSPHÄRE

Der globale Wandel bedeutet zahlreiche mit der Klimaerwärmung zusammenhängende Veränderungen im sozialen, ökologischen und ökonomischen Bereich (12).

Weil die Menschheit und die gesamte Biosphäre abhängig von günstigen Klimabedingungen sind, haben Klimaänderungen z. T. gravierende ökologische und sozioökonomische Folgen.

Arktis

In der Arktis in den vergangenen Jahrzehnten die Temperatur mehr als doppelt so schnell gestiegen wie in anderen Regionen der Erde; so hat im Zeitraum 1952 - 2004 die Oberflächentemperatur um 1,6 °C zugenommen, im weltweiten Durchschnitt waren es 0,4 °C Zunahme. In der Folge hat das Packeis seit 1987 im Sommer ein Fünftel seiner Fläche verloren, außerdem ist die Dicke des Meereises im Jahresdurchschnitt um 8%, im Sommer um durchschnittlich um 10 – 15% und in der Spitze um bis zu 40% zurückgegangen. Wird von einer in diesem Maße fortschreitenden Erwärmung ausgegangen, könnte das Nordpolarmeer im Spätsommer bis Mitte des Jahrhunderts, spätestens bis 2080, eisfrei sein. Allerdings weist die Meereisbedeckung der Arktis eine starke Variabilität auf, eine Simulation der letzten 50 Jahre zeigt keinen eindeutigen Trend, die Beobachtungen der letzten zehn Jahre hingegen stellen einen eindeutigen Rückgang dar. Die Gründe für Schwankungen der Meereisbedeckung sind noch nicht hinreichend erforscht und infolge dessen ist die Interpretation von Eisdicken und Eisbedeckungen mit großer Unsicherheit behaftet und steht in starker Abhängigkeit zur gewählten Zeitskala. Das Rückschmelzen des arktischen Eises ist zusätzlich ein selbstverstärkender Effekt, denn durch das Hervortreten von Land- und Wasserflächen statt Schnee- und Eisbedeckung wird die Albedo der Oberfläche erhöht, was eine höhere Strahlungsabsorption und damit Erwärmung nach sich zieht.

Eine zur Arktis gegenläufige Entwicklung wird in der Antarktis hingegen mit einer leichten Zunahme des Meereises infolge höherer Schneefallraten beobachtet.

Ökologische Folgen des Rückschmelzens sind eine Störung der Nahrungskette durch die Zerstörung von Flechten, die die Nahrungsgrundlage für Rentiere bilden, aufgrund häufigerer Niederschläge. Hinzu kommt der Rückgang der Eisbärpopulation infolge einer verkürzten Jagdsaison durch fehlende Eisflächen. Außerdem wandern einige Vogelarten und Insekten in vorher nicht von ihnen besiedelte Breiten ein.

Ökonomische Folgen sind das Fehlen einer stabilen Eisdecke als Voraussetzung für die Jagdaktivitäten der Inuit, die Gefährdung der Infrastruktur (Verkehrswege, Gebäude, Pipelines, Flughäfen) durch das Auftauen von Permafrostböden. Die Permafrostdegradation setzt zudem große Mengen klimawirksamen Methans und Kohlendioxids frei, indem die vorher durch den Frost konservierten organischen Rückstände durch das Auftauen beginnen zersetzt zu werden. Positive Folgen der Erwärmung sind eine verlängerte Schiffsaison, die Zunahme von Baumbewuchs durch eine verlängerte Vegetationsperiode und ergiebigerer Fischgründe. Der erleichterte Zugang zu arktischen Rohstoffen ist kritisch zu betrachten, da neue Umweltprobleme durch die Öl- und Gasgewinnung entstehen können (10, 1).

Alpengletscher

Auch in den Alpen verlief der Temperaturanstieg im 20. Jahrhundert doppelt so schnell wie im globalen Durchschnitt (15).

Methoden zur Bestimmung von Veränderungen an Gletschern sind geodätische Kartenvergleiche, glaziologische Massenbilanzbestimmungen und hydrologisch-meteorologische Methoden auf Basis von Schmelzwasser- und Abflussbestimmungen (13).

Die maximale Ausdehnung im Holozän besaßen die Alpengletscher um 1859 während der „Kleinen Eiszeit“. Von diesem Zeitpunkt an verloren sie bis 1975 rund 50% ihres Volumens, wobei dies zum Teil auf natürliche Klimaveränderungen zurückgeführt werden kann. Allein zwischen 1975 und 2000 sind dann aber 25 % des verbleibenden Gletschervolumens abgeschmolzen, mit durchschnittlichen jährlichen Verlusten von 2-3 % mit Extremwerten von bis zu 8 % im Hitzesommer 2003. Aufgrund der Geschwindigkeit des Abschmelzens kommt es nicht mehr zum Rückzug der Gletscherzunge in höhere Lagen, sondern viele Gletscher zerfallen vor Ort. Das vollständige Verschwinden vor allem kleiner Gletscher erscheint möglich (15).

Als Folge der globalen Erwärmung sind die Geo- und Ökosysteme der Alpen nicht mehr im Gleichgewicht.

Die Gefahr von Steinschlag, Berg- und Felsstürzen wächst, zum einen durch das Auftauen zuvor tief gefrorener Gesteinpakete an den Steilflanken und zum anderen durch das Fehlen der Gletschermasse als hangstabilisierendes Widerlager. Ein mit großen Eis- und Felsstürzen einhergehendes Risiko ist das von Flutwellen aus natürlichen oder künstlichen Seen. Des Weiteren werden infolge steigender Schmelzwassermengen auch Murgänge und Lawinen zunehmen. Gleichzeitig steigt auf kurze Sicht im Sommer die Hochwassergefahr, langfristig wird die zurückgehende Gletscherschmelze die Wassermenge in den Alpenflüssen verringern. Folgen werden Niedrigwasserstände z. B. in Rhein und Rhone, sinkende See- und Grundwasserspiegel und Engpässe bei Trink- und Brauchwasserversorgung für Mensch, Industrie und Landwirtschaft sein. Im Winter dagegen wird mehr direkter Abfluss in die Flüsse eingespeist werden und die Hochwassergefahr aufrecht erhalten, da bei höheren Temperaturen ein Teil des Niederschlags dann als Regen fallen wird (13, 15).

Meere und Küsten

Die Meere und Küsten nehmen eine besonders wichtige Rolle im globalen Klimasystem ein. Die thermische Trägheit der Ozeane trägt zur Trägheit und Persistenz des Klimasystems bei. Weltumspannende Zirkulationssysteme ermöglichen den Transport großer Mengen Wärme und Bewegungsenergie. Des Weiteren bilden die Meere große Stoffspeicher, vor allem als Kohlenstoffsinken. Außerdem bilden die Küsten einen wirtschaftliche Aktivräume (29).

Klimaprojektionen sagen bis Ende des Jahrhunderts einen **Meeresspiegelanstieg** um 10 -90 cm voraus. Grundsätzlich würde das Schmelzen aller kontinentalen Gletscher: Meeresspiegelerhöhung um einen halben Meter nach sich ziehen, das Schmelzen des grönländischen Eisschildes hätte Meeresspiegelanstieg von sieben Metern und aus dem völligen Abschmelzen des grönländischen Inlandeises und der Eiskappe der Antarktis würde ein Meeresspiegelanstieg um 70 Meter resultieren. Dabei ist immer zu berücksichtigen, dass das Schmelzen von Meereis nicht den Meeresspiegel erhöht, da zwischen seiner Masse und dem Wasser bereits jetzt ein isostatisches Gleichgewicht besteht. Der Anstieg geht vielmehr auf die Erwärmung des Meerwassers und dessen thermische Expansion, die zur Volumenvergrößerung und auf die Zufuhr von Schmelzwasser von kontinentalen Eismassen zurück.

Bei einem globalen Temperaturanstieg von 3°C würde der zunehmende Schneefall in der Antarktis nach dem 21. Jahrhundert nicht mehr ausreichen, den Anstieg des Meeresspiegels zu kompensieren, was aktuell noch weitgehend der Fall ist (1, 2).

Das norddeutsche **Wattenmeer** als besonders sensibles Ökosystem mit einer einzigartigen Flora und Fauna zeigt Veränderungen infolge der Klimaerwärmung und der dadurch kommenden höheren Wasserstände (3).

Biologische Vielfalt

Der Klimawandel stellt neben der direkten Zerstörung und Degradation von Lebensräumen die Hauptbedrohung für die globale biologische Vielfalt dar. Besondere Gefährdung geht von der Klimaänderung aus für: Korallenriffe infolge der Versauerung der Meere durch erhöhten CO₂-Eintrag und höhere Wassertemperaturen; Mangrovenwälder und Salzmarschen durch den Meeresspiegelanstieg; trockene und subhumide Ökosysteme durch zurückgehende Niederschläge; Tundren- und Gebirgsökosysteme durch Permafrostdegradation.

Es existieren Schätzungen, die 5 – 30 % der Arten in Deutschland als vom Klimawandel bedroht ansehen, weil viele Arten aus heute vorhandenen Schutzgebieten infolge der Änderungen der Lebensbedingungen abwandern und an ihren neuen Standorten schlechter geschützt wären.

In Bezug auf die Vegetation wird eine Verschiebung der Verbreitungsgebiete vieler Arten polwärts bzw. in höhere Lagen erwartet. Folge könnte das Verschwinden der alpinen Stufe in den Alpen sein, da die Areale von Hochlagenspezialisten durch nachrückende Konkurrenzarten eingeengt werden. Seit der Mitte des 20. Jahrhunderts wurde außerdem in Deutschland eine Verlängerung der Vegetationsperiode um zehn Tage beobachtet, was eine Verfrühung von Blühterminen und Veränderung der phänologischen Phasen nach sich zieht. Und auch die Fauna reagiert mit Veränderungen im Jahresrhythmus auf die Klimaänderungen. So verschieben sich der Brutbeginn und das Zugverhalten von Vögeln, das Laichen von Fischen und der Entwicklungszeitraum von Insekten. Außerdem ändern sich die Verbreitungsareale von Arten.

Anzustreben ist eine Integration von Klimaschutz und Naturschutz. So können effektive Naturschutzmaßnahmen z. B. im Hochwasser – und Küstenschutz als Beitrag zur Abschwächung der Klimaänderung dienen. Ferner entziehen Vegetation, Wälder, Moore, Böden und Ozeane der Atmosphäre Treibhausgase und fungieren so vor allem als CO₂-Senken. Allerdings sind bestimmte Klimaschutzmaßnahmen mit Blick auf die Biodiversität kritisch zu bewerten, da beispielsweise der Anbau von Biokraftstoffen die Abholzung von Wäldern oder die Entwässerung von Mooren induzieren kann. Das Pflanzen von gebietsfremden Bäumen als schnell wachsende Kohlenstoffspeicher kann die bestehenden Artenzusammensetzungen in den heimischen Ökosystemen verändern.

5, 6, 9, 24)

Folgen für den Menschen

Weltweit wird die Zunahme der Naturkatastrophenschäden für die Versicherungswirtschaft beobachtet, da die Häufung von Wetterkatastrophen wie Stürmen, Überschwemmungen, Unwettern, Hitzewellen, Waldbränden enorme wirtschaftliche Konsequenzen nach sich zieht. Schon eine relative kleine Verschiebung der klimatischen Mittelwerte hat bei einer gleich bleibenden Form der Wahrscheinlichkeitsverteilung (Gauß'sche Normalverteilung) große Wirkung für die Überschreitungswahrscheinlichkeit kritischer Schwellenwerte. Kommt dann noch eine Veränderung der Form der Wahrscheinlichkeitsverteilung durch eine höhere Variabilität des Klimas hinzu und die Verteilungskurve verbreitert sich, ist die Folge eine nochmals höhere Wahrscheinlichkeit für **extreme klimatische Situationen**. Drastisch formuliert heißt das, „was heute als Extremereignis gilt, wird schon bald zur Normalität“ (25).

Im **Hitzesommer 2003** führten im Vergleich mit dem Klimamittel 1961-1990 um 3,4 °C höhere Mitteltemperaturen zu Waldbränden, Dürreschäden in der Landwirtschaft, Ausfällen in der Flussschifffahrt und Engpässe bei der Stormversorgung.

Die extremen gemessenen Temperaturen mit den einhergehenden thermischen Belastungen für den Menschen führten zu 35000 Todesfällen in Europa. In Zukunft werden solche Sommer keine Ausnahme bleiben. Denn die thermischen Umweltbedingungen wirken sich am stärksten auf Befinden und Gesundheit des Menschen aus. Vor allem bei Temperaturen über 35 °C werden steigende Mortalitätsraten verzeichnet. Heißere Sommer sind auch unwetterträchtiger infolge konvektiver Prozesse und stärkeren Gegensätzen zwischen kontinentalen und maritimen Luftmassen. Dies fördert Gewitter, Hagel, Sturzfluten und Starkwinde. Weitere bioklimatische Beeinträchtigungen sind durch den Ozonabbau in der Stratosphäre und einer dadurch verursachten Zunahme der UV-Strahlung zu erwarten, ebenso wie durch hohe Ozonwerte in heißen Sommern mit Belastungen der Gesundheit der Bevölkerung, der Land- und Forstwirtschaft. Und auch der Problemkomplex Luftschadstoffe, Luftqualität und Luftreinhaltung wird an Bedeutung gewinnen (4, 18). Für die Zukunft sagen Klimamodelle wie REMO für Deutschland deutliche Steigerungen der sommerlichen Temperaturen und der Maximalwerte voraus (Abbildungen_REMO).

Bezüglich der **Lebensmittelsicherheit** steigt in der Landwirtschaft die Gefahr von Missernten und Dürreperioden im Zuge der Klimaerwärmung. Vor allem in heißen Regionen der Erde sind eine Reduktion der Pflanzenproduktivität und der Erntemengen und anschließende Hungersnöte möglich. Hinzu kommt der Verlust von Agrarland durch Bodenerosion und Desertifikation. Zusätzlich sinkt Haltbarkeit von Lebensmitteln bei hohen Temperaturen. Auch in Bezug auf die **Trinkwasserqualität** sind die chemischen und biologische Eigenschaften abhängig von der Wassertemperatur; bei niedrigen Wasserständen steigen die Konzentrationen eingeleiteter Chemikalien ins Wasser. Eine weitere Verknappung des Trinkwassers in trockenen Regionen ins zu erwarten (18).

AUSBLICK: KLIMA- UND ENERGIEPOLITIK

Die internationale Energiepolitik hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen und sieht sich großen Herausforderungen bei der Integration von Energiesicherheit und Klimaschutz gegenüber. Wichtige Etappen in der politischen Klimadebatte waren die Weltklimakonferenz 1979, der Erdgipfel in Rio de Janeiro 1992, die Erarbeitung des Kyoto-Protokolls 1997 und sein In-Kraft-Treten 2005, sowie die deutsche EU-Ratspräsidentschaft mit dem G8-Gipfel in Heiligendamm. Eine wichtige wissenschaftliche Instanz in der internationalen Klimadiskussion ist das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, gegründet 1988) als Institution der UNO und der World Meteorological Organisation (WMO), das alle fünf bis sechs Jahre Wissensstandsberichte zur Klimaänderung herausbringt. Darin werden die naturwissenschaftlichen Grundlagen (Working Group I: The Scientific Basis), die möglichen Folgen der Klimaänderung (Working Group II: Impacts of Climate Change) und die Möglichkeiten zur Vermeidung oder zumindest Anpassung an die Klimaänderung (Working Group III: Mitigation) dargelegt. Die Ergebnisse werden jeweils mit Wahrscheinlichkeitsangaben versehen, um den aktuellen Stand des Wissens, die Untermuerung der Aussagen durch Daten oder Modellierungen, Unsicherheiten und die mögliche Schwankungsbreite der prognostizierter Änderungen zu quantifizieren. Adressat der IPCC-Berichte sind Staat und politische Entscheidungsträger sowie die Gesellschaft (17, 26). Auf nationaler Ebene hat sich die Bundesrepublik zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 auf rund 20% des Wertes von 1990 zu senken. Dieses Ziel „müssen alle Industriestaaten ebenso erfüllen, um eine weltweite Halbierung der Treibhausgasemissionen zu erreichen, die von Nöten ist, um die globale Erwärmung seit der Industrialisierung auf 2 °C zu begrenzen. Dieser Wert gilt laut des IPCC als vom Erdsystem tolerierbar. Zugleich wird angestrebt, den Beitrag erneuerbarer Energien an der Gesamtenergieversorgung auf 50% zu steigern. Insgesamt könnten so bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Wert von 1990 780 Mio. t CO₂/Jahr vermieden werden durch den Ausbau der

Strom- und Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien, Effizienzsteigerungen im Wärmebereich, Kraft-Wärme-Kopplung, Einsparungen und Effizienzsteigerungen im Verkehrssektor und die Ausweitung von Biokraftstoffen (11).

Literatur

- (1) ALFRED-WEGENER-INSTITUT FÜR POLAR- UND KLIMAFORSCHUNG (Hrsg.) (2004): Klimaerwärmung trifft besonders die Arktis. Online unter: http://www.awi.de/de/aktuelles_und_presse/pressemitteilungen/detail/item/klimaerwaermung_trifft_besonders_die_arktis/ (Zugriff: 26.07.2008)
- (2) ALFRED-WEGENER-INSTITUT FÜR POLAR- UND KLIMAFORSCHUNG (Hrsg.) (2005): Grönland bald ohne Eis? Online unter: http://www.awi.de/de/aktuelles_und_presse/pressemitteilungen/detail/item/groenland_bald_ohne_eis/ (26.07.2008)
- (3) ALFRED-WEGENER-INSTITUT FÜR POLAR- UND KLIMAFORSCHUNG (Hrsg.) (2007): Norddeutsches Wattenmeer im Klimawandel. Online unter: http://www.awi.de/de/aktuelles_und_presse/pressemitteilungen/detail/item/norddeutsches_wattenmeer_im_klimawandel/ (Zugriff: 26.07.2008)
- (4) BERZ, G. (2004): Klimawandel: Kleine Erwärmung – dramatische Folgen. In: MÜNCHNER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT (Hrsg.): Wetterkatastrophen und Klimawandel. Sind wir noch zu retten? München. S. 98 – 105.
- (5) BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (Hrsg.) (o. J.): Klimawandel bedroht biologische Vielfalt online unter: http://www.bfn.de/0304_klima.html (Zugriff: 26.07.2008)
- (6) BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (Hrsg.) (2005): Das Klima wandelt sich - und die Natur? online unter: http://www.bmu.de/naturschutz_biologische_vielfalt/forschen_fuer_die_natur/klima/doc/35333.php (Zugriff: 26.07.2008)
- (7) BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (Hrsg.) (2006a): Workshop zu künftigen Klimaänderungen in Deutschland. Erhebliche Klimaänderungen in Deutschland zu erwarten. Presse-Information 26 / 2006. Online unter: <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2006/pdf/pd06-026.pdf> (Zugriff: 31.05.2008)
- (8) BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (Hrsg.) (2006b): Künftige Klimaänderungen in Deutschland – Regionale Projektionen für das 21. Jahrhundert. Hintergrundpapier. Online unter: <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Klimaaenderungsworkshop.pdf> (Zugriff: 31.05.2008)
- (9) BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (Hrsg.) (2006c): Biologische Vielfalt und Klimawandel. Gefahren, Chancen, Handlungsoptionen. BfN-Skripten 148. <http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/skript148.pdf> (Zugriff: 26.07.2008)
- (10) BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (Hrsg.) (2007): Ohne Eis kein Eisbär. Magazin zum Klimaschutz und zur biologischen Vielfalt. Online unter: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_eisbaer.pdf (Zugriff: 26.07.2008)
- (11) BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (Hrsg.) (2008): Leitstudie 2008. Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas. Online unter: <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2008.pdf> (Zugriff: 14.12.2008)
- (12) EMEIS, S. (2000): Meteorologie in Stichworten. Hirts Stichwortbücher. Stuttgart.
- (13) ESCHER-VETTER, H. (2004): Gletscher als Zeugen von Klimaänderungen. In: MÜNCHNER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT (Hrsg.): Wetterkatastrophen und Klimawandel. Sind wir noch zu retten? München. S. 114 – 121.
- (14) GLASER, R. (2007): Klimasystem. In: GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE, U., REUBER, P. (Hrsg.): Geographie. Physische Geographie und Humangeographie. München. S. 193-194.
- (15) HAEBERLI, W., MAISCH, M. (2008): Alpen ohne Eis? In: Geographische Rundschau 60, Heft 6. S. 14 – 21.
- (16) HAGEMANN, S., JAKOB, D. (o. J.): Regionale Auswirkungen des Klimawandels über Deutschland und dem Rhein-Einzugsgebiet. Online unter: http://www.zukunft-statt-braunkohle.de/documents/hagemann_pulheim.pdf (Zugriff: 31.05.2008)
- (17) HARMELING, S. (2008): Ebenen, Trends und Perspektiven internationaler Klimapolitik. Geographische Rundschau Jahrgang 60, Heft 1, S. 14-20
- (18) HÖPPE, P. (2004): Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Menschen. In: MÜNCHNER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT (Hrsg.): Wetterkatastrophen und Klimawandel. Sind wir noch zu retten? München. S. 156-165.

- (19) INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007): IPCC Fourth Assessment Report. Working Group I Report "The Physical Science Basis". Online unter: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm> (Zugriff: 19.07.2008).
- (20) JAKOB, D., GÖTTEL, H., LORENZ, P. (2007): Hochaufgelöste regionale Klimaszenarien für Deutschland, Österreich und die Schweiz. In: Mitteilungen DMG 1 / 2007, S. 10 – 12. online unter: http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/publikationen/pdf/dmg-mitteilungen/2007_1.pdf (Zugriff: 31.05.2008)
- (21) KRAUS, H. (2004): Die Atmosphäre der Erde. Heidelberg.
- (22) MAX-PLANCK-INSITUT FÜR METEOROLOGIE (Hrsg.) (2006): Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert. Online unter: <http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/grafik/presse/Klimaprojektionen2006.pdf> (Zugriff: 31.05.2008)
- (23) MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR METEOROLOGIE (Hrsg.) (2007): Wie wird das Klima in Europa in der Mitte des 21. Jahrhunderts aussehen? Online unter: <http://www.mpimet.mpg.de/presse/faqs/wie-wird-das-klima-in-europa-in-der-mitte-des-21-jahrhunderts-aussehen.html> (Zugriff: 29.11.2008)
- (24) MENZEL, A., ESTRELLA, N., FABIAN, P. (2004): Phänologie: Pflanzen in einer wärmeren Welt. In: MÜNCHNER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT (Hrsg.): Wetterkatastrophen und Klimawandel. Sind wir noch zu retten? München. S. 144 – 155.
- (25) MÜNCHNER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT (Hrsg.) (2004): Wetterkatastrophen und Klimawandel. Sind wir noch zu retten? München.
- (26) NEU, U. (2007): Klimadiskussion – der Treibhauseffekt in Medien und Politik. In: GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE, U., REUBER, P. (Hrsg.) : Geographie. Physische Geographie und Humangeographie. München. S. 976 – 983.
- (27) SCHÖNWIESE, C.-D. (2003): Klimatologie. Stuttgart.
- (28) SCHÖNWIESE, C.-D. (2007): Klimaänderungen. In: GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE, U., REUBER, P. (Hrsg.): Geographie. Physische Geographie und Humangeographie. München. S. 246 – 252.
- (29) VON STORCH, H., MONTOYA, M., GONÁLEZ-RUOCO, F.J., WOTH, K. (2004): Projektionen für Meere und Küsten. In: MÜNCHNER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT (Hrsg.): Wetterkatastrophen und Klimawandel. Sind wir noch zu retten? München. S. 106 – 113.
- (30) VON STORCH, H. (2007): Klimaszenarien. In: GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE, U., REUBER, P. (Hrsg.): Geographie. Physische Geographie und Humangeographie. München. S. 252 – 259.