

## 3 WASSER UND KLIMAWANDEL

Ohne Wasser kein Klima – ohne Wasser kein Leben. Denn das Wasser ist in Form des Niederschlags ein wesentliches Klimaelement, das zusammen mit der Temperatur der grundlegenden Beschreibung und Klassifikation des Klimas dient. Und über die im Klimasystem ablaufenden Prozesse ist der Niederschlag in Verbindung mit Verdunstung, Abfluss und Speicherung ein Teil des Wasserkreislaufs. Dies anhand von Beobachtungsdaten bzw. Rekonstruktionen für die Klimagegenwart und -vergangenheit genau zu erfassen sowie durch Modellierung zu verstehen und daraus Zukunftsprojektionen zu entwickeln, ist eine zentrale Aufgabe der interdisziplinären Klimaforschung. Hinzu kommt die ganze Problematik der sich daraus ergebenden ökologischen und sozioökonomischen Folgen, insbesondere Risiken. Denn Wasser in ausreichender Quantität und Qualität ist eine notwendige Lebensgrundlage für Mensch, Flora und Fauna. Schon zeigen sich Konfliktpotenziale durch Wasserknappheit und Dürren. Aber auch durch Überschwemmungen aufgrund von extremen Niederschlagsereignissen ist unser Planet gefährdet.

### 3.1 Veränderung des Wasserkreislaufs

#### 3.1.1 Globaler Wasserkreislauf und Klimaänderungen – eine Wechselbeziehung

STEPHAN J. LORENZ, DIETER KASANG & GERRIT LOHMANN

**GLOBAL WATER CYCLE AND CLIMATE CHANGE - INTERACTIONS:** *Water provides one of the most important links among the subsystems of the climate system because it connects them all. The residence time of water in the different reservoirs varies from days for atmospheric water to thousands of years for the polar ice and the oceans. The atmospheric water cycle connects different water reservoirs and has a high mobility. There is some evidence from paleoclimatic records and modelling studies for the recent global warming that climate change affects the global water budget which is linked to the availability of water, glaciers and ice sheets extent, sea level, and ocean circulation. We argue that the understanding of the involved mechanisms and feedbacks is essential for the prediction of the future water cycle with its large impact for the world population.*

Wasser kommt im Ozean, an Land und in der Atmosphäre in flüssiger, fester und gasförmiger Form vor. Heute befinden sich nach gängigen Schätzungen rund 97% der Gesamtmenge in Form von Salzwasser in den Ozeanen und ca. 2% in den Inlandeismassen auf Grönland und der Antarktis, die aus der viele Jahrtausende andauernden Speicherung des atmosphärischen Niederschlags entstanden sind. Dazu kommen 0,6% als Süßwasser im Grundwasser, in Seen und Flüssen. Der Anteil des in Form von Wasserdampf in der Atmosphäre vorhandenen Wassers ist noch einige Größenordnungen kleiner und trotzdem keinesfalls unbedeutend. Zwischen den Wasserreservoirs gibt es Austauschprozesse: Verdunstung und Niederschlag verbinden die flüssigen und gasförmigen bzw. festen Reservoirs, der Abfluss des Wassers von den Kontinenten über die Flusssysteme führt das Niederschlagswasser den Ozeanen zu. Von den Komponenten im Erdsystem, die das Klima der Erde bestimmen, ist die Atmosphäre diejenige mit der höchsten Mobilität. Mit seiner typischen Zeitskala von Tagen stellt der atmosphärische Wasserkreislauf die Verbindung zu den langsamer reagierenden Reservoirs Ozean und Eis her. Der atmosphärische hydrologische Kreislauf besteht aus dem

Transport von Wasserdampf sowie aus den Phasenumwandlungen zu flüssigen und festen Wasserpartikeln in den Wolken, die mit großen Energieumwandlungen und -transporten verbunden sind (s. Kap. 1.6).

Der hydrologische Zyklus und die damit verbundene Wasserverfügbarkeit ist besonders wichtig für die gesamte Natur einschließlich des Menschen. Der Wasserkreislauf bestimmt das Vorkommen von Vegetation und Wüsten. Änderungen des hydrologischen Kreislaufs haben unmittelbare Auswirkungen auf die Bevölkerung. Wasser wird je nach Region der Erde und je nach Menge als Bedrohung (z.B. Überschwemmungen) oder Wohltat (z.B. Niederschläge in Trockengebieten) erfahren.

Komplexe numerische Modelle des Klimageschehens auf der Erde, die nur mit Hilfe aufwändiger Großrechenanlagen betrieben werden können, sind ein geeignetes Mittel, um Veränderungen im hydrologischen Zyklus und seine Wechselwirkungen im Klimasystem zu untersuchen und zu verstehen. Ein allgemeines Zirkulationsmodell der Atmosphäre, wie z.B. das ECHAM, das am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg betrieben wird, beschreibt die klimarelevanten Prozesse mit ihren komplexen Wechselwirkungen auf einem globalen, dreidimen-

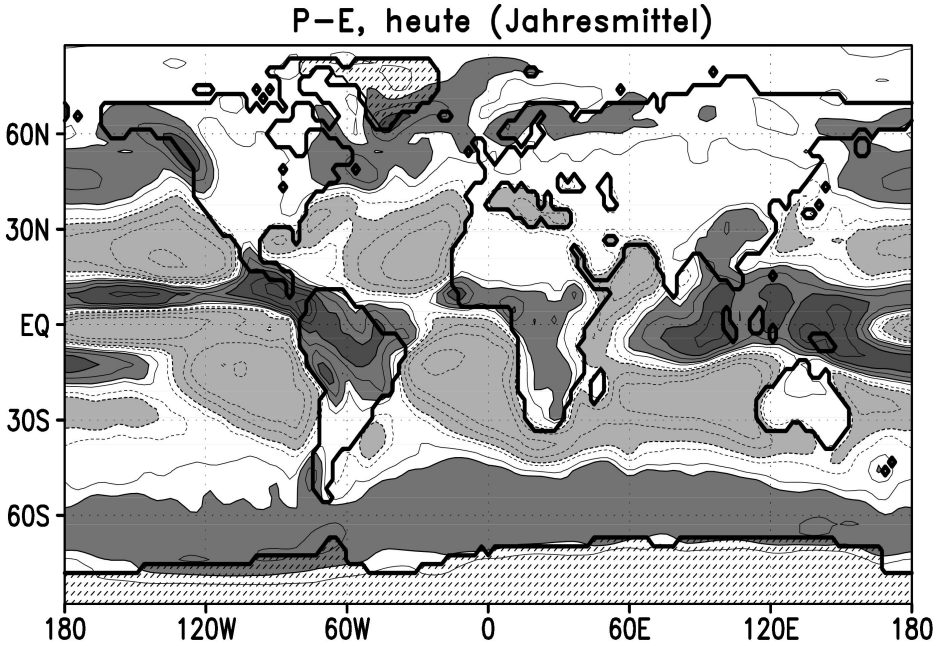


Abb. 3.3.1-1: Nettoniederschlag (Niederschlag  $P$  minus Verdunstung  $E$  in Millimetern pro Tag) im langjährigen Mittel, berechnet mit Hilfe des Zirkulationsmodells der Atmosphäre ECHAM 3. Die Umrisse der Kontinente sind in der Auflösung des Modells erkennbar, das grönländische und antarktische Inlandeis sind gestrichelt dargestellt. Gebiete mit überwiegender Niederschlag sind mit durchgezogenen Linien (+0,5; +1; +2; +3; +5; +7; +9 mm pro Tag) und dunklen bzw. mittleren Schattierungen (>+3 bzw. >+1 mm pro Tag) markiert; Gebiete mit überwiegender Verdunstung sind durch gepunktete Linien (-0,5; -1; -2; -3; -5 mm pro Tag; helle Schattierung bei <-1 mm pro Tag) gekennzeichnet

sionalen Rechengitter. Ergebnisse von Berechnungen des Klimas und seiner Wasserverteilung von heute und während der letzten Eiszeit mit diesem Modell werden in den beiden folgenden Abschnitten behandelt. Für die Beurteilung der zukünftigen Klimaentwicklung werden Zirkulationsmodelle für Atmosphäre und Ozean heutzutage meist gekoppelt betrieben (so wurde das ECHAM-Modell u.a. an das OPYC-Ozeanmodell angekoppelt). Die Ergebnisse dieses und anderer Klimamodelle fließen in die Sachstandsberichte des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2001), des Klimabeirats der UNO, ein. Die mit diesem Modell prognostizierte Wasserverteilung am Ende des 21. Jahrhunderts wird im Abschnitt zur zukünftigen Klimaentwicklung vorgestellt. In diesem Abschnitt wird auch auf mögliche Einflüsse des Treibhausklimas auf das Inlandeis von Grönland und der Antarktis eingegangen. Ein Ausblick findet sich im letzten Abschnitt dieses Kapitels.

### Heutige Wasserverteilung

Die heutige Verteilung von Wasser auf der Erdoberfläche ist im Wesentlichen durch die großräumige Zirkulation der Atmosphäre vorgegeben. Sie bestimmt, wieviel Süßwasser aus dem Ozean verdunstet, wo der Wasserdampf

zu Wolken kondensiert und wieviel davon auf dem Weg über die Kontinente als Niederschlag fällt. Die Abb. 3.1.1-1 zeigt die weltweite Verteilung des Nettoniederschlags (Niederschlag minus Verdunstung) für das heutige Klima, berechnet mit Hilfe des ECHAM-Zirkulationsmodells der Atmosphäre. In dieser Verteilung spiegelt sich die atmosphärische Zirkulation wider: In der inner-tropischen Konvergenzzone führt intensives Aufsteigen der von der starken Sonneneinstrahlung erwärmten Luft (Konvektion) zu starken Niederschlägen. In den Subtropen, in denen hoher Luftdruck und daher absinkende, trockene Luftmassen vorherrschen, überwiegt dagegen die Verdunstung. Die stärkste Verdunstung findet in den subtropischen Ozeangebieten statt, die daher die wich-

Tab. 3.1.1-1: Eisschilde und Gletscher: Fläche, Volumen und der äquivalente Meeresspiegelanstieg im Falle des Abschmelzens (nach IPCC 2001, Tab. 11.3)

	Antarktischer Eisschild	Grönländischer Eisschild	Übrige Gletscher
Fläche ( $10^6 \text{ km}^2$ )	12,37	1,71	0,67
Volumen ( $10^6 \text{ km}^3$ )	25,71	2,85	0,18
Meeresspiegel (m)	61,1	7,2	0,51

tigste Quellen des atmosphärischen Wasserdampfes darstellen (s. Kap. 1.6). Wegen des Verlustes von Süßwasser hat das Meerwasser dort auch einen relativ hohen Oberflächensalzgehalt, während über den subtropischen Kontinenten die großen Wüsten der Erde (Sahara, Gobi, Australische Wüste, usw.) liegen, da dort der ohnehin geringe Niederschlag wieder verdunstet. In den höheren Breiten überwiegt wiederum der Niederschlag gegenüber der Verdunstung; dessen Menge wird zu den Polen hin mit abnehmender Temperatur jedoch schnell kleiner, weil kalte Luftmassen erheblich weniger Wasserdampf aufnehmen können als warme.

Aus Niederschlag, Verdunstung und Temperatur erklärt sich auch die Verteilung von Eis auf der Erde. In den Polargebieten fällt der Niederschlag meist als Schnee. Wenn er nicht im Sommer vollständig schmilzt, kann das zum Aufbau von Eisschilden führen bzw. den Eisverlust durch Eisschmelzen und Kalben von Eisbergen ausgleichen. Die beiden größten Eisschilde der Erde mit einem Volumen von 25,71 bzw. 2,85 Mio. km<sup>3</sup> befinden sich in der Antarktis bzw. auf Grönland. Ihr Abschmelzen würde einem Anstieg des Meeresspiegels um 61,1 m bzw. 7,2 m entsprechen. Demgegenüber beträgt das Volumen aller anderen Gletscher der Erde nur 0,18 Mio. km<sup>3</sup>, was einem Meeresspiegelanstieg von 0,51 m entspricht (Tab. 3.1.1-1).

Tab. 3.1.1-2: Meeresspiegeldifferenz (Absenkung gegenüber heute) in Metern durch die zusätzliche Wasserspeicherung in den Eisschilden während der letzten Eiszeit vor 21.000 Jahren (nach PELTIER 1998)

Meeresspiegeldifferenz (m)	
Nordamerika	60,4
Eurasien	29,8
Antarktis	21,7
Grönland	5,8
<b>Summe</b>	<b>117,8</b>

### Der Wasserkreislauf während der letzten Eiszeit

Der Wasserkreislauf und die Wasserverteilung haben sich während des erdgeschichtlichen Klimawandels erheblich verändert. Der Wasserkreislauf bestimmt auf sehr langen Zeitskalen sogar die unterschiedliche Verteilung der Inlandeisschilde. Während der jüngeren Erdgeschichte der letzten ca. 2 Mio. Jahre (Quartär) hat es mehrere Wechsel von Eiszeiten und Warmzeiten mit markanten Änderungen der globalen Wasserverteilung gegeben, was durch eine große Anzahl von indirekten Informationen, sogenannten Proxy-Daten, aus Klimaarchiven beeindruckend dokumentiert ist (CROWLEY & NORTH 1990). Das Inlandeis bildet eine sich sehr langsam verändernde

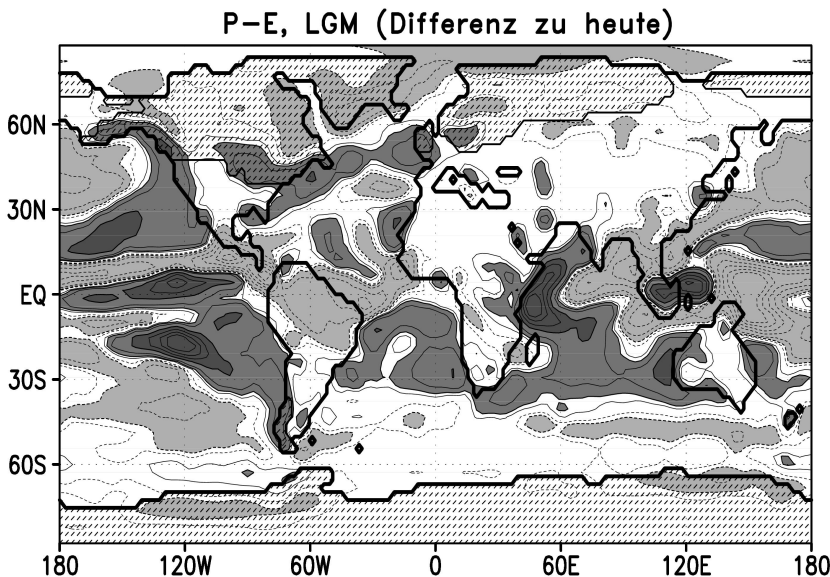


Abb. 3.1.1-2: Änderung des Nettoniederschlags (Jahresmittel des Niederschlags P minus Verdunstung E in Millimetern pro Tag) während der letzten Eiszeit (LGM vor ca. 20.000 Jahren) im Vergleich zum heutigen Klima, berechnet mit Hilfe des Zirkulationsmodells der Atmosphäre ECHAM 3 (LOHMANN & LORENZ 2000). Die Eisschilde während der Eiszeit sind schräggestrichelt markiert; die geänderte Verteilung von Land und Meer ist erkennbar. Feuchtere Gebiete im Vergleich zu heute (Abb. 3.1.1-1) sind mit durchgezogenen Linien (+0,25; +0,5; +1; +2; usw. mm pro Tag) und dunklen bzw. mittleren Schattierungen (>+2 bzw. >+0,5 mm pro Tag) markiert; trockenere Gebiete sind durch gepunktete Linien (-0,25; -0,5; -1; 2; usw.; helle Schattierung bei <-0,5 mm pro Tag) gekennzeichnet

Klimakomponente, die einerseits vom Klima abhängt, andererseits aber auch wieder auf das Klima zurückwirkt, z.B. durch ihre Oberflächeneigenschaft, das Sonnenlicht stark zu reflektieren. Da die Menge des Wassers im System Erde konstant ist, bestimmt die Wassermenge, die in den Inlandeisschilden und Gletschern gebunden ist, den globalen Meeresspiegel, denn die Atmosphäre, die Flusssysteme, Seen und Böden sind für die globale Wasserspeicherung relativ unbedeutend. Auf dem Höhepunkt der letzten Vereisung vor etwa 20.000 Jahren, dem Letzten Glazialen Maximum (LGM), war so viel Wasser auf den Inlandeisschilden der Nordhalbkugel in Form von Eis gebunden, dass der Meeresspiegel um etwa 120 m tiefer als heute lag. So war z.B. die Beringstraße zwischen Sibirien und Alaska damals eine Landverbindung, die von prähistorischen Menschen bei der Einwanderung nach Amerika benutzt werden konnte (PELTIER 1998). In Tab. 3.1.1-2 sind die Anteile der verschiedenen Eisschilder an der zusätzlichen Wasserspeicherung während der letzten Eiszeit in Form von Änderung des Meeresspiegels eingetragen.

Abb. 3.1.1-2 zeigt die Veränderung des Netto-niederschlags auf dem Höhepunkt der letzten Eiszeit vor 20.000 Jahren im Vergleich zu heute, wiederum berechnet mit dem Zirkulationsmodell ECHAM. Die großen Inlandeisschilder sind dort ersichtlich (der Laurentische Eisschild über Nordamerika, der Fennoskandische Eisschild über Nordeuropa sowie kleinere Eisschilder über Sibirien und Südamerika), und man kann auch die geänderte Verteilung von Land und Meer erkennen, die durch den gesunkenen Meeresspiegel bewirkt wurde. Die Temperaturen waren besonders auf den Eisschildern und in deren Nähe um mehr als 20 °C niedriger als heute. Die eiszeitlichen Luft- und Wassertemperaturen in den Tropen waren dagegen nur einige Grad niedriger. Die Quantifizierung dieser Abkühlung stellt die Wissenschaft zur Zeit noch vor methodische Probleme bei der Rekonstruktion von dafür relevanten Klimainformationen aus Proxydaten (Mix et al. 2001). Relativ klar ist aber, dass es damals im globalen Mittel um etwa 4 °C kälter war als heute. Durch diese Abkühlung fällt der Nettoniederschlag überwiegend geringer aus (vgl. gepunktete Linien in Abb. 3.1.1-2). Dies ist auch in den hohen Breiten auf den Eisschildern und äquatorwärts davon sowie in einigen niederschlagsreichen Gebieten der Tropen ersichtlich. In Teilen des tropischen Indischen und Pazifischen Ozeans sind die Gebiete mit überwiegender Verdunstung im Glazial kleiner gewesen.

Der Vergleich zwischen den Verhältnissen der Gegenwart und denen der letzten Eiszeit zeigt eine deutliche, klimatisch bedingte Verschiebung der Wasserverteilung. Auf dem Höhepunkt der letzten Eiszeit war das Eisvolumen um 50 Mio. km<sup>3</sup> größer als heute. Zwi-

schen etwa 20.000 und 7.000 Jahren vor heute schmolzen die Inlandeisschilder auf das heutige Gesamtvolumen zurück, mit stark unterschiedlichen Schmelzraten während der verschiedenen Abschmelzphasen und einem äquivalenten Meeresspiegelanstieg von teilweise mehr als 15 m pro 1.000 Jahre. Als wichtigste Ursachen für diesen folgenreichen Prozess werden u. a. Veränderungen der Erdbahnparameter sowie im Kohlenstoffkreislauf angenommen, deren direkte Wirkung durch verschiedene Rückkopplungsprozesse im Klimasystem verstärkt wurde.

## Zukünftige Entwicklung

Wie wird die Verteilung von Wasser in seiner festen und flüssigen Form in der Zukunft aussehen? Muss mit einer gravierenden Abkühlung des Klimas durch eine neue Eiszeit gerechnet werden, oder wird der Ausstoß von Treibhausgasen durch die Verbrennung fossiler Energieträger zu einer starken Erwärmung führen? Für die Beantwortung dieser Fragen muss zwischen der natürlichen und der menschengemachten (anthropogenen) Klimaänderung genau unterschieden werden.

Für die natürliche Klimaentwicklung während des Quartärs sind die Parameter der Erdbahn von großer Bedeutung. Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts wurde ihr Einfluss auf die saisonale Verteilung der Sonneneinstrahlung von dem serbischen Mathematiker MILUTIN MILANKOVITCH (1941) berechnet und seit ca. 30 Jahren als astronomische Theorie der Eiszeiten diskutiert. Orbital bedingte Schwankungen der Sonneneinstrahlung haben danach den entscheidenden Anstoß für den Wechsel von Warm- und Kaltzeiten gegeben. Auch die langsame Abkühlung vom warmen Holozän (mit seinem Höhepunkt vor ca. 6.000 Jahren) bis heute, die allerdings durch den Temperaturanstieg der letzten 100 Jahre kompensiert bzw. übertroffen wird (LORENZ & LOHMANN 2004), könnte dadurch bedingt sein. Für die weitere Klimaentwicklung gehen neue Studien, die den langfristigen natürlichen Klimaverlauf ohne Berücksichtigung des anthropogenen Treibhauseffekts untersuchen, allerdings von relativ geringen Änderungen der Erdbahnparameter aus, so dass die gegenwärtige Warmzeit erst nach etwa 50.000 Jahren von einer neuen Eiszeit abgelöst werden könnte (BERGER & LOUTRE 2002). Für die nähere Zukunft wird die Zusammensetzung der Atmosphäre, insbesondere der anthropogene Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen, einen wesentlich stärkeren Einfluss auf unser Klima haben als die Variabilität der Sonneneinstrahlung durch die Erdbahnparameter. Vor allem ist mit einem starken Anstieg von Kohlendioxid zu rechnen: Sein Anteil ist von einem vorindustriellen Wert von rund 280 ppm (>parts per million<, Volumenanteil in Millionstel) auf gegenwärtig 370 ppm gestiegen und wird am Ende des 21. Jahrhunderts nach den durch das IPCC

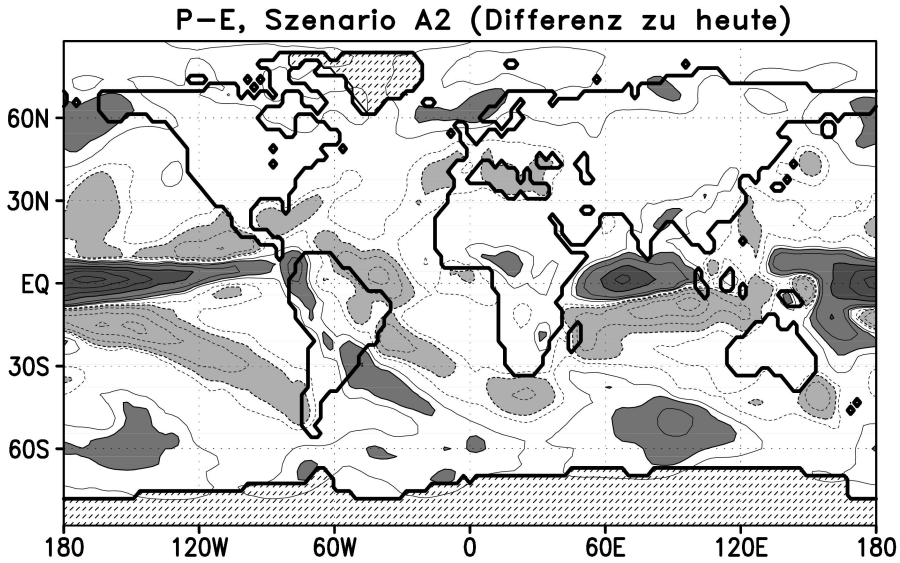


Abb. 3.1.1-3: Änderung des Nettoniederschlags (Niederschlag P minus Verdunstung E in Millimetern pro Tag, Schattierungen und Isolinien wie in Abb. 3.1.1-2) in einem Klimaszenario (Szenario A2, IPCC 2001, Box 9.1) für das Jahr 2085 (Mittel der Jahre 2071–2100) gegenüber heute (Mittel der Jahre 1961–1990), berechnet vom Zirkulationsmodell der Atmosphäre ECHAM 4 gekoppelt mit dem OPYC Ozeanmodell (STENDEL et al. 2004)

bewerteten Szenarienrechnungen zwischen 550 und 950 ppm liegen. Damit verbunden ist in den nächsten 100 Jahren nach Modellprognosen eine Erwärmung um 1,4 bis 5,8 °C (IPCC 2001). Eine Temperaturveränderung in dieser Größenordnung ist in der jüngeren geologischen Vergangenheit nur durch Veränderungen der Erdbahnparameter angestoßen worden, jedoch auf Zeitskalen von Tausenden von Jahren.

Diese Klimaveränderungen werden sich notwendig auch auf den atmosphärischen Wasserhaushalt und bei einer weiteren Erwärmung nach dem Jahr 2100 auch auf die globale Wasserverteilung auswirken. Nach Modellexperimenten werden sich bei einer Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur um 2,3° C bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts die Verdunstung und der Niederschlag um jeweils 5,2% erhöhen bzw. im globalen Mittel von 900 auf 950 mm pro Jahr ansteigen (WETHERALD & MANABE 2002, s. auch Kap. 1.5, Abb. 1.5-2). Zum Vergleich: In Hamburg beträgt der Niederschlag etwa 770 mm pro Jahr. Die Verdunstung wird dabei stärker in den niederen als in den hohen Breiten zunehmen, der Niederschlag vor allem am Äquator und in den hohen Breiten. Solche Tendenzen werden von verschiedenen Modellrechnungen im Detail sehr unterschiedlich dargestellt. Großräumig zeigen sich bei den vom IPCC berücksichtigten Berechnungen für den Niederschlag jedoch weitgehende Übereinstimmungen (IPCC 2001, 9.3.2). Auch das Hamburger ECHAM-Modell zeigt einen bis über 1 mm pro Tag stärkeren Nettoniederschlag über den Polargebieten und einen besonders starken Zu-

wachs (bis 5 mm pro Tag) im äquatorialen Pazifischen und Indischen Ozean (Abb. 3.1.1-3). In den Subtropen bis zum mediterranen Raum ist dagegen eine stärkere Verdunstung als heute zu erkennen. Ähnliche Ergebnisse erhalten auch WETHERALD & MANABE (2002), die sich auf mehrere Modellrechnungen (Ensemble-Integration) stützen. Betrachtet man die Entwicklung von der letzten Eiszeit bis in die nähere Zukunft, bestätigt sich der Einfluss der Temperatur auf den Wasserkreislauf: Verdunstung und Niederschlag verstärken sich mit steigenden Temperaturen (Abb. 3.1.1-2 und 3.1.1-3). Die Temperaturentwicklung und der Wasserkreislauf sind eng miteinander gekoppelt: Da gleichzeitig damit gerechnet wird, dass in den höheren Breiten die Temperatur besonders stark zunehmen wird, kann ein großer Teil der Niederschläge statt in Form von Schnee als Regen fallen. Dadurch kommt es zu positiven Rückkopplungsprozessen: Die Verringerung der Schneedecke und Verlängerung der jährlichen Schmelzperiode erhöhen die Temperatur zusätzlich.

Während schon für die letzten Jahrzehnte eine Abnahme der nordhemisphärischen Schneemasse und des arktischen Meereises beobachtet wurde, ist die Wirkung der globalen Temperaturerhöhung auf die großen Eisschilde Grönlands und der Antarktis zumindest gegenwärtig und für die nächsten 100 Jahre ungewiss (vgl. Kap. 1.5). Ob in den letzten Jahrzehnten die Masse des Grönlandeisschildes zu- oder abgenommen hat, ist höchst umstritten (CHYLEK et al. 2004). Auch für das 21. Jahrhundert wird allenfalls eine geringe Abnahme der Eismasse prognostiziert, mit einem

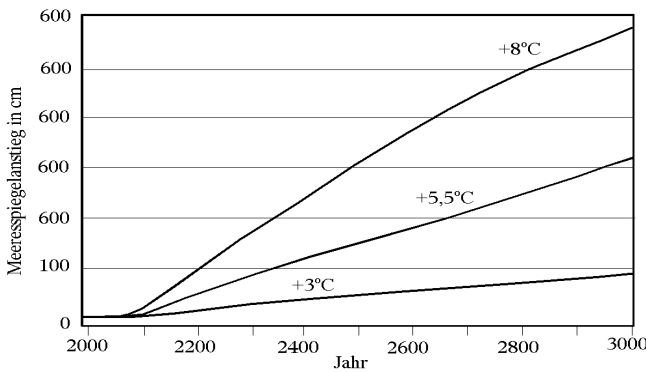


Abb. 3.1.1-4: Reaktion des Grönland-eisschildes auf drei Klimaszenarien während des dritten Jahrtausends in cm Meeresspiegelanstieg. Die Modellberechnungen gehen von einem Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen bis 2130 und einer Stabilisierung danach aus (nach IPCC 2001, Abb. 11.16)

Beitrag zum Meeresspiegelanstieg von 6 cm bis zum Ende des Jahrhunderts (IPCC 2001, 11.5.1.1).

Anders wird der grönländische Eisschild wahrscheinlich in den kommenden Jahrhunderten auf den anthropogenen Treibhauseffekt reagieren. Eine länger anhaltende Erhöhung der jährlichen Durchschnittstemperatur um ca. 3°C über den gegenwärtigen Wert ist nach Modellrechnungen die Grenze, bei deren Überschreiten der Eisschild mehr Masse durch Schmelzvorgänge verliert, als er durch Schneefall hinzugewinnt. Falls sich die Temperatur um 8°C erhöht, wird das Eis in etwa 1.500 Jahren abgeschmolzen sein. Langfristig wird es aber auch bei einer Temperaturerhöhung um 3°C, falls diese über 1.000 Jahre oder länger anhält, zu einem totalen Abschmelzen des grönländischen Eises kommen (GREGORY et al. 2004). In diesem Fall käme es zu einer Umverteilung der Wasserressourcen der Erde aus dem festen in den flüssigen Zustand, die einem Anstieg des Meeresspiegels um ca. 7 m entsprechen würde. Auch nach einer möglichen, langfristigen Rückkehr des globalen Klimas auf vorindustrielle Verhältnisse wäre der Verlust des grönländischen Eises irreversibel. Ohne Eisschild würde sich das grönländische Klima durch die Erniedrigung der Oberfläche und die Verringerung der Reflexion der Sonnenstrahlung gravierend ändern und deutlich wärmer als heute bleiben (GREGORY et al. 2004).

Anders als auf Grönland gibt es in der Antarktis auch im Sommer der Südhalbkugel, bei Temperaturen deutlich unter dem Gefrierpunkt, mit Ausnahme einiger Randgebiete keine wesentlichen Abschmelzvorgänge. Der antarktische Eisschild verliert Eis ganz überwiegend durch Kalben von Eisbergen ins Meer. Auf eine künftige Erwärmung wird der antarktische Eisschild wahrscheinlich mit einer positiven Massenbilanz reagieren, da eine weltweite Temperaturerhöhung den globalen Wasserkreislauf verstärkt, so dass über der Antarktis mehr Schnee fallen wird (Abb. 3.1.1-3). Allerdings könnte der besonders instabile westantarktische Eisschild durch eine globale Erwärmung gefährdet sein. Damit ist im 21. Jahrhundert zwar nicht zu

rechnen. Über mehrere Jahrhunderte gesehen kann eine fortgesetzte Erwärmung der Atmosphäre und des angrenzenden Ozeans jedoch ein merkbares Abschmelzen zur Folge haben. Bei einem vollständigen Abschmelzen des westantarktischen Eisschildes würde der Meeresspiegel um 4–6 m steigen.

### Schlussbemerkung

Ein verändertes Verhältnis von Niederschlag und Verdunstung könnte schon im 21. Jahrhundert in einigen Regionen der Erde empfindliche Konsequenzen haben. So ist eine Ausdehnung der subtropischen Trockengebiete, z. B. im mediterranen Raum, wahrscheinlich. Andererseits werden mehr Niederschläge in den höheren Breiten fallen. Allgemein muss mit einer Zunahme von Niederschlagsextremen mit der Gefahr von Dürren und Hochwasser gerechnet werden (vgl. Kap. 3.1.10). Eine größere Umverteilung des globalen Wassers vom festen in den flüssigen Zustand bleibt langfristig nicht ohne Folgen für das Leben auf der Erde und hat Rückwirkungen auf das Klima. Ein Meeresspiegelanstieg von mehreren Metern, wie er durch das Abschmelzen von Teilen der grönländischen und der westantarktischen Eismasse während der folgenden Jahrhunderte im Bereich des Möglichen liegt, könnte ganze Inselgruppen verschwinden lassen und große Teile der besonders dicht besiedelten Tieflandgebiete auf allen Kontinenten überschwemmen. Außerdem würde das Abschmelzen des Grönlandeises eine gewaltige Süßwasserzufuhr in den Nordatlantik zur Folge haben und die nordatlantische ozeanische Tiefenzirkulation schwächen. Diese durch Temperatur- und Salzgehaltsunterschiede verursachte Umwälzpumpe sorgt dafür, dass das warme Wasser des Golfstroms als Nordatlantikstrom bis an die Norwegische Küste vordringt und damit Nordwesteuropa ein vergleichsweise mildes Klima beschert. Eine Schwächung oder gar ein Abreißen der Tiefenzirkulation im Nordatlantik könnte für Nordwesteuropa ein kälteres und trockeneres Klima zur Folge haben ♦