



### 3.1.1 Globaler Wasserkreislauf und Klimaänderungen – eine Wechselbeziehung

STEPHAN J. LORENZ, DIETER KASANG & GERRIT LOHMANN

*Global water cycle and climate change - interactions: Water is the most important links between all subsystems of the climate system. The residence time of water in the different reservoirs varies from several days for the atmosphere to thousands of years for the polar ice caps and the oceans. There is some evidence from paleoclimatic records and modelling studies for the recent global warming that climate change affects the global water budget, e.g. availability of water; extent of glaciers and ice sheets, sea level, and ocean circulation. We argue that the understanding of the processes and feedbacks is essential for the prediction of the future water cycle with its large impact on humankind.*

Wasser kommt im Ozean, an Land und in der Atmosphäre flüssig, fest und gasförmig vor. Heute befinden sich nach gängigen Schätzungen rund 97% der Gesamtmenge in Form von Salzwasser in den Ozeanen und ca. 2% lagern in den Inlandeismassen auf Grönland und der Antarktis, entstanden aus der viele Jahrtausende andauernden Speicherung des atmosphärischen Niederschlags. 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 aber trotzdem keinesfalls unbedeutend. Zwischen den Wasserreservoiren 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 und Wochen stellt der atmosphärische Wasserkreislauf die Verbindung zu den langsamer reagierenden Reservoiren Ozean und Eis her. Der atmosphärische hydrologische Kreislauf besteht aus dem Transport von Wasserdampf sowie aus den Phasenumwandlungen zu den Tröpfchen und Kristallen

in den Wolken, die mit großen Energieumwandlungen und -transporten verbunden sind (s. Kap. 1.6).

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

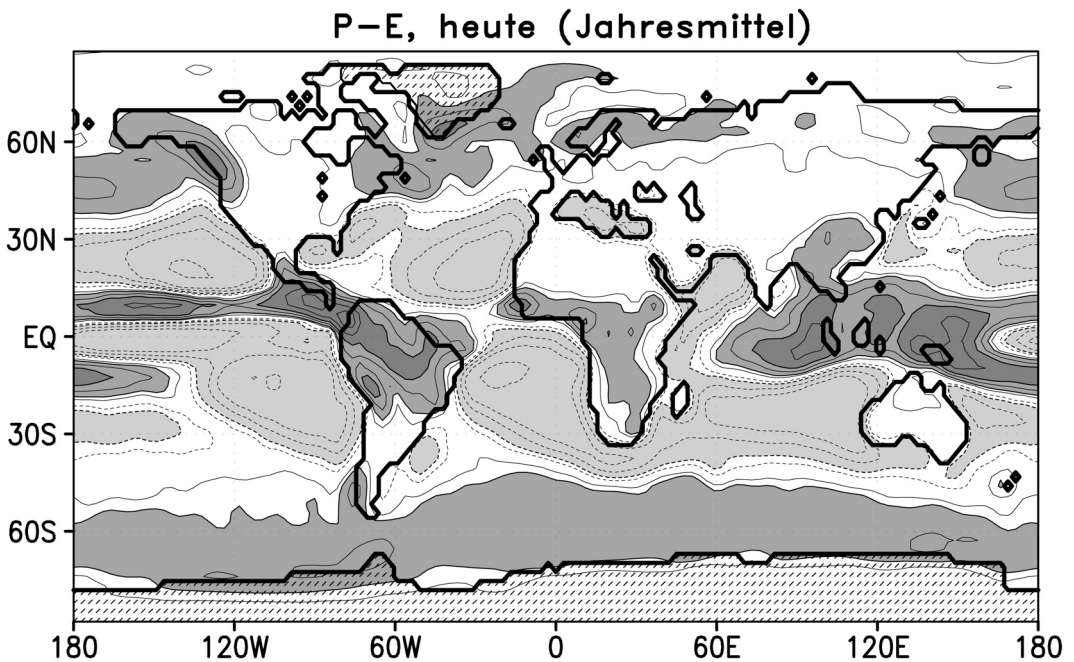
Komplexe numerische Modelle des Klimageschehens auf der Erde, die nur mit Hilfe aufwändiger Großrechenanlagen betrieben werden können, sind ein geeignetes Mittel, um Veränderungen im hydrologischen Zyklus und seine Wechselwirkungen im Klimasystem zu untersuchen und zu verstehen. Ein allgemeines Zirkulationsmodell 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, dreidimensionalen 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 an Ozeanmodelle gekoppelt). Die Ergebnisse dieses und anderer Klimamodelle fließen in die Sachstandsberichte des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2001 und 2007), 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 Beitrags.

### Heutige Wasserverteilung

Die heutige Verteilung von Wasser auf der Erdoberfläche ist im wesentlichen durch die großräumige Zirkulation der Atmosphäre vorgegeben. Sie bestimmt, wieviel Süßwasser, wo aus dem Ozean verdunstet, wo der Wasserdampf zu Wolken kondensiert und wieviel davon auf dem Weg über die Kontinente als Nieder-

schlag fällt. *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 innertropischen 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 wichtigsten Quellen des atmosphärischen Wasserdampfes darstellen (s. Kap. 1.6). Wegen des Verlustes von Süßwasser hat das oberflächennahe Meerwasser dort auch einen relativ hohen Salzgehalt, 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



**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. 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 Schattierungen bei <-1 mm pro Tag) gekennzeichnet.

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 24,7 bzw. 2,9 Mio. km<sup>3</sup> befinden sich in der Antarktis bzw. auf Grönland. Ihr Abschmelzen würde einem Anstieg des Meeresspiegels um 56,6 m bzw. 7,3 m entsprechen. Demgegenüber beträgt das Volumen aller anderen Gletscher der Erde nur 0,13 Mio. km<sup>3</sup>, was einem Meeresspiegelanstieg von 0,4 m entspricht (Tab. 3.1.1-1).

### Der Wasserkreislauf während der letzten Eiszeit

Der Wasserkreislauf und die Wasserverteilung haben sich bei erdgeschichtlichen Klimaänderungen 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 Klimarchiven beeindruckend dokumentiert ist (CROWLEY & NORTH 1990). Das Inlandeis bildet eine sich sehr langsam verändernde 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 Ma-

ximum (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 Eisschilde an der zusätzlichen Wasserspeicherung während der letzten Eiszeit in Form von Änderung des Meeresspiegels eingetragen.

Abb. 3.1.1-2 zeigt die Veränderung des Nettoniederschlags auf dem Höhepunkt der letzten Eiszeit vor 20.000 Jahren im Vergleich zu heute, wiederum berechnet mit dem Zirkulationsmodell ECHAM. Die großen Inlandeisschilde sind dort ersichtlich (der Laurentische Eisschild über Nordamerika, der Fennoskandische Eisschild über Nordeuropa sowie kleinere Eisschilde 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 Eisschilden 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 Eisschilden 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

**Tab. 3.1.1-1:** Eisschilde und Gletscher: Fläche, Volumen und der äquivalente Meeresspiegelanstieg im Falle des Abschmelzens (nach IPCC 2007).

	Antarktischer Eisschild	Grönländischer Eisschild	Übrige Gletscher
Fläche (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )	12,3	1,7	0,5
Volumen (10 <sup>6</sup> km <sup>3</sup> )	24,7	2,9	0,13
Meeresspiegel (m)	56,6	7,3	0,4

**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>

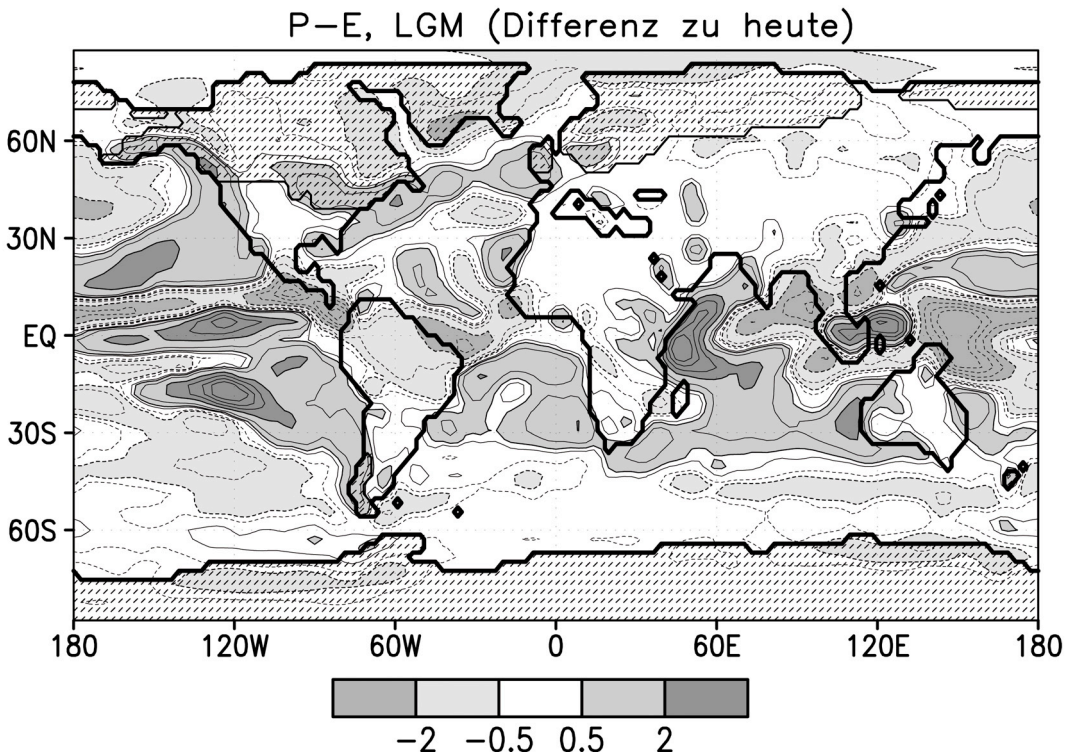
deutliche, klimatisch bedingte Verschiebung der Wasserverteilung. Auf dem Höhepunkt der letzten Eiszeit war das Eisvolumen um 50 Mio. km<sup>3</sup> größer als heute. Zwischen etwa 20.000 und 7.000 Jahren vor heute schmolzen die Inlandeisschilde auf das heutige Gesamtvolumen zurück, mit stark unterschiedlichen 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 genauer zwischen der natürlichen und der menschengemachten (anthropogenen) Klimaänderung unterschieden werden.

Für die natürlichen Klimaänderungen während des Quartärs haben die Parameter der Erdbahn den entscheidenden Anstoß gegeben. Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts wurde ihr Einfluss auf die saisonale Verteilung der Sonneneinstrahlung von dem serbischen Mathematiker Milutin Milankovitch (1941) berechnet und seit langem schon als astronomische Theorie der Eiszeiten diskutiert (IPCC 2007, Box 6.1). Die Unterschiede in der Sonneneinstrahlung durch die Schwankungen der Erdbahnparameter sind jedoch zu schwach, um das ganze Ausmaß der Temperaturunterschiede zwischen Kalt- und Warmzeiten zu erklären. Sie wurden



**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 (Lohmann & Lorenz 2000). Die Eisschilde während der Eiszeit sind gestrichelt 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.

durch Rückkopplungsprozesse verstärkt, die vor allem durch Änderung der Eis-Albedo und der Konzentration der Treibhausgase zustande kamen (Hansen et al. 2008). Auch für Klimaänderungen der letzten 10.000 Jahre, des Holozän, spielten die Schwankungen der Sonneneinstrahlung eine Rolle. Daten und Modellstudien (z.B. IMBRIE & IMBRIE 1980) legen eine langsame Abkühlung vom warmen Holozän (vor 6.000 Jahren) bis heute nahe, die allerdings durch den Temperaturanstieg der letzten 100 Jahre kompensiert wurde (LORENZ & LOHMANN 2004).

Unter natürlichen Treibhausgasbedingungen ist die weitere Klimaentwicklung wegen relativ geringer Änderungen der Erdbahnparameter durch eine lange Warmzeit gekennzeichnet, die nicht vor 30.000 Jahren von einer neuen Eiszeit abgelöst werden wird (IPCC 2007, BFAQ 6.1). Bleibt der jetzige Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre über viele Tausend Jahre erhalten oder steigt sogar noch weiter an, könnte die nächste Kaltzeit aber auch ausfallen und das seit 2,6 Mio. Jahren andauernde Eiszeitalter stark ändern. Die Menschheit hätte dann möglicherweise eine neue Klimaepoche eingeleitet, das »Anthropozän« (ZALASIEWICZ et al. 2008). Für die nähere Zukunft jedenfalls wird die Zusammensetzung der Atmosphäre, insbesondere der anthropogene Anstieg der Treibhausgase, einen wesentlich stärkeren Einfluss auf unser Klima haben als die Variabilität der Sonneneinstrahlung durch die Erdbahnparameter. Nach Wasserdampf ist Kohlendioxid das wichtigste strahlungsaktive und dadurch auf die Temperatur wirkende Gas in der Atmosphäre. Sein Anteil in der Atmosphäre ist seit Beginn der Industrialisierung durch die Verbrennung fossiler Energieträger von 280 ppm (»parts per million«, Volumenanteil in Millionstel) auf gegenwärtig 390 ppm gestiegen. Dagegen hat dieser Anteil während der letzten 740.000 Jahren 300 ppm nie überschritten (IPCC 2007, 6.4.1). Er wird am Ende des 21. Jahrhunderts nach den Szenarienrechnungen des IPCC zwischen 500 und 1000 ppm liegen. Diese durch den Menschen verursachte Steigerung hat die in den letzten 100 Jahren beobachtete globale Erwärmung von fast 0,8°C wesentlich mit verursacht und könnte in den nächsten 100 Jahren eine Erwärmung von 1,8 bis 4,0°C zur Folge haben (IPCC 2007, 10 Executive Summary). 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 Mo-

dellxperimenten 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). Zum Vergleich: In der Stadt Hamburg beträgt der Niederschlag etwa 770 mm pro Jahr. Die Verdunstung wird laut Modellstudien 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 2007, 10.3.2.3). Auch das Hamburger ECHAM-Modell zeigt bis über 1 mm pro Tag stärkeren Nettoniederschlag über den Polargebieten und besonders starken Zuwachs (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). 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 Tauperiode erhöhen die Temperatur zusätzlich.

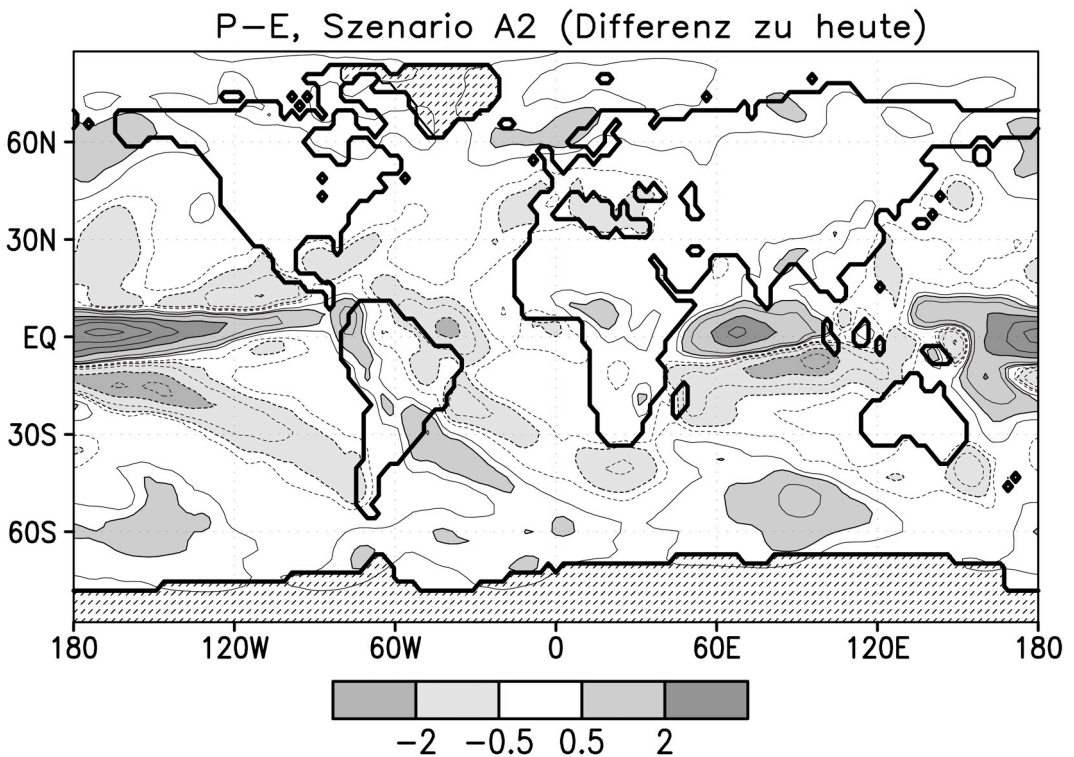
Auch das in Eis gebundene Wasser zeigt bereits deutlich die Wirkung der globalen Erwärmung. Besonders gravierend ist das Abschmelzen des arktischen Meereises, dessen Ausdehnung im Sommer 2007 und 2008 um 37% unter dem Mittel von 1980–1999 lag (WANG & OVERLAND 2009). Aber auch für die großen Eisschilde Grönlands und der Antarktis wurde in jüngster Zeit eine Massenabnahme nachgewiesen. So haben Satellitenmessungen von Schwereanomalien des deutsch-amerikanischen GRACE-Projekts zwischen 2002 und 2009 einen Massenverlust des grönländischen Eisschildes um 230 Gt/Jahr und für den antarktischen Eisschild um 143 Gt/Jahr ergeben, der in beiden Fällen zudem noch eine deutliche Beschleunigung zeigt (VELICOGNA 2009). Allerdings sind die Zeitreihen der GRACE-Messungen

noch sehr kurz und Trendeinschätzungen daher sehr unsicher. Modellberechnungen für das 21. Jahrhundert ergeben kein nennenswertes Abschmelzen der großen Eisschilde, wobei allerdings dynamische Prozesse, d.h. eine beschleunigte Bewegung des Eises in Richtung Ozean durch den Zerfall von Schelfeis und die Bildung von Schmelzwasser unter dem Eiskörper, nicht adäquat erfasst werden. Der IPCC-Bericht von 2007 diskutiert zwar diese Möglichkeiten, verzichtet aber auf eine quantitative Abschätzung (IPCC 2007, 10.6.4).

Anders werden die Eisschilde 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, wie sie gegen Ende des 21. Jahrhunderts nach dem A1B-Szenario wahrscheinlich ist, ist nach Modellrechnungen die Grenze, bei deren Überschreiten z.B. Teile des grönländischen Eisschild langfristig abschmelzen werden (IPCC 2007, 10.7.4.3). So könnte nach gut 1.000 Jahren das Eisvolumen auf 40% der heutigen Masse zusammengeschrumpfen sein und nach 3.000 Jahren auf einen Bruchteil

der heutigen Masse. 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 bis zu 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. Die Rückkopplungen des Klimasystems mit dem grönländischen Eisschild sind Gegenstand der Forschung und bislang noch nicht ausreichend verstanden.

Wie erwähnt zeigen die Messungen von Schwe-reanomalien auch beim antarktischen Eisschild in den letzten Jahren Massenverluste, an denen nicht nur die West- sondern auch die Ostantarktis beteiligt ist (CHEN et al. 2009). Der antarktische Eisschild verliert Eis ganz überwiegend durch Kalben von Eisbergen ins Meer. Auf eine künftige Erwärmung wird der antarktische Eisschild möglicherweise mit einer positiven Massen-



**Abb. 3.1.1-3:** Änderung des Nettoniederschlag (Niederschlag P minus Verdunstung E in Millimetern pro Tag) 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 gekoppelt mit dem OPGC Ozeanmodell (STENDEL et al. 2004).

bilanz reagieren, da eine weltweite Temperaturerhöhung den globalen Wasserkreislauf verstärkt, so dass über der Antarktis mehr Schnee fallen könnte (IPCC 2007, 10.6.4 und Table 10.6). 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. Interessant sind in diesem Zusammenhang Studien über die Verhältnisse in der letzten Zwischenzeit vor 130.000 Jahren, dem Eem, als die Temperaturen ungefähr so hoch waren, wie sie für das Ende des 21. Jahrhunderts erwartet werden. Der Meeresspiegel lag um 2 bis 3 m über dem heutigen Niveau. Neben Grönland hat aller Wahrscheinlichkeit nach auch die Westantarktis dazu beigetragen (OVERPECK et al. 2006).

### Schlussbemerkung

Ein verändertes Verhältnis von Niederschlag und Verdunstung könnte schon im 21. Jahrhundert in einigen Regionen der Erde merkbare 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. 3.1.13). Vor allem aber bleibt eine größere Umverteilung des globalen Wassers vom festen in den flüssigen Zustand 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 abschwächen. Diese durch Temperatur- und Dichteunterschiede verursachte Umwälzpumpe sorgt dafür, dass das warme Wasser des Golfstroms als Nordatlantikstrom bis an die Norwegische Küste vordringt und damit Nordwesteuropa ein warmes Klima beschert.

### Literatur

- CHEN J.L. et al. (2009): Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements, *Nature Geoscience* 2, 859-862.
- CROWLEY T. J. & G. R. NORTH (1990): *Paleoclimatology*. Oxford University Press.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007, Working Group I: The Science of Climate Change*.
- HANSEN J. et al. (2008): Target Atmospheric CO<sub>2</sub>: Where Should Humanity Aim? - [http://www.columbia.edu/~jeh1/2008/TargetCO2\\_20080407.pdf](http://www.columbia.edu/~jeh1/2008/TargetCO2_20080407.pdf)
- LOHMANN G. & S. LORENZ (2000): On the hydrological cycle under paleoclimatic conditions as derived from AGCM Simulations, *Journal of Geophysical Research*, 105 (D13), 17,417-17,436.
- LORENZ S. J. & G. LOHMANN (2004): Acceleration technique for Milankovitch type forcing in a coupled at-

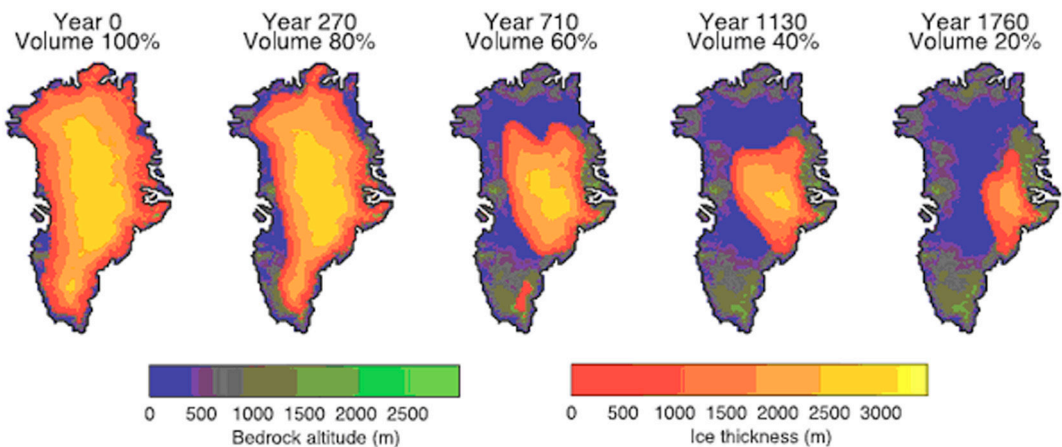


Abb. 3.1.1-4: Änderung der Höhe der Felsoberfläche (blau bis grün) und der Eismasse (rot bis gelb) bei einer Vervierfachung der vorindustriellen CO<sub>2</sub>-Konzentration. (IPCC 2007, Figure 10.38).

- mosphere-ocean circulation model: method and application for the Holocene, *Climate Dynamics* 23, 727–743.
- MILANKOVITCH M. (1941): *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Königlich serbische Akademie, Sektion der Naturwissenschaften und der Mathematik, Spezielle Ausgabe Nr. 132, Belgrad, 633 pp.
- MIX A. C., E. BARD & R. SCHNEIDER (2001): Environmental processes of the ice age: land, oceans, glaciers (EPILOG). *Quaternary Science Reviews*, 20, 627–657.
- OVERPECK J.T., B.L. OTTO-BLIESNER, G.H. MILLER, D.R. MUHS, R.B. ALLEY & J.T. KIEHL (2006): Paleoclimatic Evidence for Future Ice-Sheet Instability and Rapid Sea-Level Rise, *Science* 311, 1747–1750.
- PELTIER W. R. (1998): Postglacial variations in the level of the sea: implications for climate dynamics and solid-earth geophysics, *Reviews of Geophysics*, 36, 603–689.
- STENDEL M., T. SMITH, E. ROECKNER & U. CUBASCH (2004): ECHAM4\_OPYC\_SRES\_A2: 110 years coupled A2 run 6h values, doi: 10.1594/WDCC/EH4\_OPYC\_SRES\_A2.
- VELICOGNA I. (2009): Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE, *Geophysical Research Letters* 36, doi:10.1029/2009GL040222.
- WANG M. & J.E. OVERLAND (2009): A sea ice free summer Arctic within 30 years? *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07502, doi: 10.1029/2009GL037820.
- WETHERALD R.T. & S. MANABE (2002): Simulation of hydrologic changes associated with global warming, *Journal of Geophysical Research* 107 (D19), 4379, doi:10.1029/2001JD001195
- ZALASIEWICZ J. et al. (2008): Are we now living in the Anthropocene?, *GSA TODAY*, 18/2, 4–8.

Dr. Stephan J. Lorenz  
Max Planck Institut für Meteorologie  
Bundesstrasse 53 - 20146 Hamburg  
stephan.lorenz@zmaw.de

Dr. Dieter Kasang  
Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)  
Bundesstrasse 53 - 20146 Hamburg  
dieter.kasang@zmaw.de

Prof. Dr. Gerrit Lohmann  
Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research  
Bussestr. 24 - 27570 Bremerhaven  
Gerrit.Lohmann@awi.de