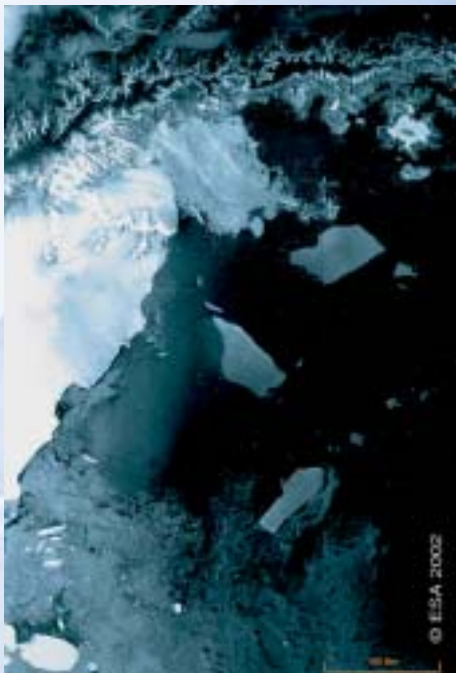




Numerische Klimamodelle – Was können sie, wo müssen sie verbessert werden?

Teil I: Das Klimasystem der Erde



Zerfall des Larsen B Schelfeises



Savanne in der zentralen Sahara

1 Das Klimasystem

H. GRÄBL

1 Leben und Spurenstoffe als Klimafaktoren

Das Klima der Erde wird anders als das der erdähnlichen Planeten Mars und Venus vom Leben auf ihr (mit)bestimmt. Eine herausragende weitere Besonderheit ist die Dominanz von kleinen Beimengungen der Erdatmosphäre für die Strahlungsbilanz. So erreicht die Masse aller fünf wichtigen Treibhausgase, des flüssigen Wassers und des Eises in Wolken sowie der Aerosolteilchen zusammen nur drei Promille der Gesamtmasse der Erdatmosphäre. Beachtet man weiterhin, dass das wichtigste Treibhausgas, der Wasserdampf, wegen der starken Temperaturabhängigkeit seines Dampfdruckes bei Sättigung auf eine Temperaturänderung, z. B. durch eine atmosphärische Konzentrationszunahme der langlebigen Treibhausgase, kräftig reagieren muss, dann sind gar nur etwa 0,3 Promille aller Moleküle der Erdatmosphäre eigentlich klimabestimmend. Wieviel Sonnenenergie bei welchen Wellenlängen die Erdoberfläche erreicht, und wieviel Wärmestrahlung aus welchen Teilen der Erdatmosphäre in den Weltraum entweicht, um die langfristig ausgeglichene Energiebilanz herzustellen, wird von Wasserdampf, Wolkenwasser, Wolkeneis, Kohlendioxid (CO₂), Ozon (O₃), Lachgas (N₂O), Methan (CH₄) und Aerosolpartikeln bestimmt. Damit sind auch der Pansen aller Wiederkäuer als Methanquelle, die Lachgasproduktion durch Bodenbakterien und die Emission von Dimethylsulfid ((CH₃)₂S) durch einige Meeresalgen klimarelevant.

2 Das Klimasystem

In den vergangenen Jahren hat es sich eingebürgert, vom Klimasystem zu reden, weil man die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Teilen (Systemkomponenten) der Erde als die besonders wichtigen Klimaprozesse, wie z. B. Tiefenwasserbildung im Atlantik sowohl um Grönland als auch in der südlichen Weddell-See, erkannt hat. Die starke Vernetzung der Prozesse in und zwischen Luft, Wasser, Leben, Boden und Gestein, also in und zwischen Atmo-, Hydro-, Bio-, Pedo- und Lithosphäre, zwingt uns allerdings auch alle Systemkomponenten gemeinsam zu betrachten. Vereinfachungen sind nur möglich, wenn man die Zeitskala einengt. Die Modellbildung ist jedoch noch sehr oft behindert, weil vollständige Datensätze zum Test der Modelle fehlen. Erst mit den Satellitendaten ist die globale Überdeckung und die mesoskalige Auflösung zur Norm geworden, so dass Daten der Fernerkundung für das Verständnis der Klimaprozesse und für Modelltests zusehends wichtiger geworden sind. Da Modelle die Synthese unseres Wissens darstellen, ist wesentlicher wissenschaftlicher Fortschritt fast immer mit der Falsifizierung bisheriger Modelle durch neue Datensätze verbunden, weil danach verbesserte

Modelle wieder mit der Beobachtung wenigstens grob übereinstimmen, und dann zur wichtigsten ihrer Aufgaben, der Vorhersage, verwendet werden können.

Im Folgenden werden einige der typischen Modellstudien kurz vorgestellt um zu zeigen, mit kurzen Zeitskalen beginnend, wieviele Teile des Klimasystems für welche Aufgaben zeitabhängig beschrieben werden müssen. Dabei wird besonders auf den Niederschlag geachtet, weil dieser Klimaparameter für das Leben so wichtig ist.

3 Planetarische Grenzschicht über See

Die Wechselwirkung zwischen Meeresoberfläche und planetarischer Grenzschicht kann bereits mit einem Modell der Grobstrukturanalyse (Large-Eddy-Simulation (LES)) behandelt werden, wobei in nur wenigen Stunden Simulationszeit und bei einem Modellgebiet von etwa 10 km die Oberflächentemperatur und die Rauigkeit fest vorgegeben werden können. Dennoch können damit Parameterisierungen der bewölkten planetarischen Grenzschicht für großskalige Zirkulationsmodelle abgeleitet werden, sofern das LES-Modell ausreichend mit Daten von aufwändigen Feldexperimenten in der planetarischen Grenzschicht getestet worden ist.

4 Land-Seewind-Zirkulation

Soll der Klimaprozess Land-Seewind-Zirkulation numerisch nachgebildet werden, wächst die Integrationszeit auf Tage und neben einer Landnutzungsklassifizierung mit Bodenmodell ist ein ausreichend großes Seegebiet einzubeziehen. Aber auch die freie Troposphäre ist mit zu berücksichtigen und an den Rändern muss die mittlere Strömung vorgegeben werden. Ohne eine Parameterisierung der Vorgänge in Wolken einschließlich Strahlungswirkung und Niederschlag ist Realitätsnähe allerdings nicht zu erreichen. Feldexperimente zum vollständigen Test eines solchen Modells gibt es jedoch noch nicht. Nur Teilaspekte, wie die Lage der Seewindfront, können mit Satellitendaten oder Beobachtungen an einzelnen Stationen validiert werden.

5 Regionaler Niederschlag und seine Änderung

Soll die zukünftige Niederschlagsverteilung in einer größeren Region abgeschätzt werden, sind zunächst zeitabhängig von einer globalen Analyse oder einem gekoppelten Atmosphäre/Ozean/Land-Modell für einen Zeitabschnitt aus der Vergangenheit (z. B. ein Jahrzehnt), die Strömung am Rand und die Oberflächentemperatur der

Seegebiete vorzugeben. Getestet werden kann nur über den Landgebieten mit ausreichend dichtem in-situ Niederschlagsmessnetz. Nach dem Test muss in einem zweiten Modelllauf das Regionalmodell mit den Ergebnissen eines globalen gekoppelten Atmosphäre/Ozean/Ozean/Land-Modelles „gefüttert“ werden und als Ergebnis erhält man die gewünschte zukünftige, regional höher aufgelöste Niederschlagsverteilung im inneren Modellgebiet. Diese gilt allerdings nur für ein bestimmtes Szenario zukünftigen menschlichen Verhaltens und Fehler in der allgemeinen Zirkulation des gekoppelten Modells werden auch auf die regionale durchschlagen. Die regionale Niederschlagsverteilung ist wegen erhöhter räumlicher Auflösung nur besser in Gebieten mit Land/See-Kontrasten und ausgeprägter Topographie (siehe dazu Abb. 1-1). Man bedenke, dass eine korrekte Wiedergabe der Niederschlagsmenge und -verteilung mindestens eine korrekte Aufwärtsbewegung in der Atmosphäre und damit Bewölkung am richtigen Ort voraussetzt.

6 Globale Niederschlagsverteilung

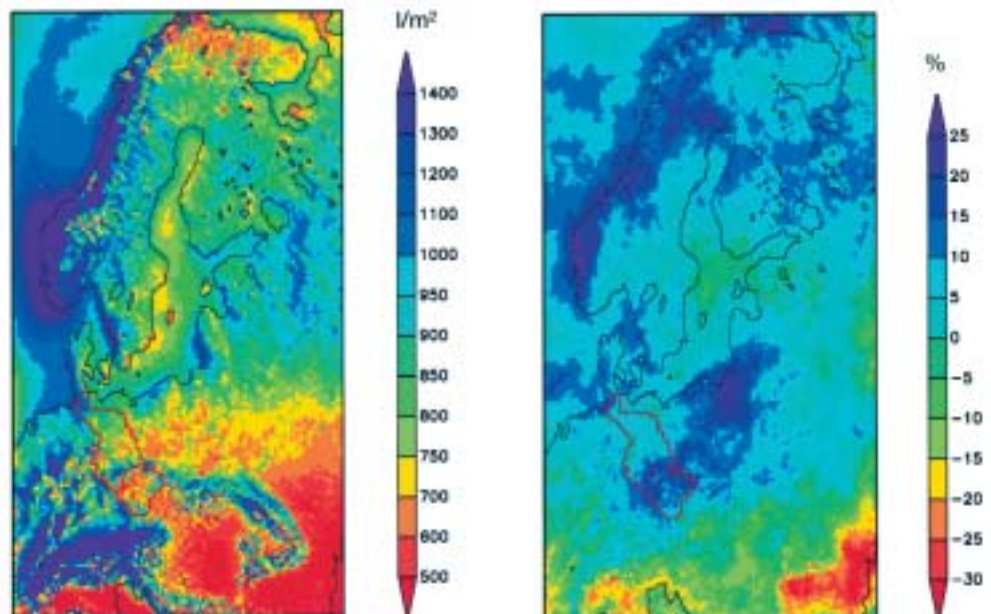
Soll die globale Niederschlagsverteilung einschließlich Variabilität und eventuellen Veränderungen im 20. Jahrhundert nachgebildet werden, ist zunächst ein gekoppeltes Atmosphäre/Ozean/Land-Modell notwendig, das ohne Korrektur der Flüsse an der Ozeanoberfläche über Jahrhunderte in Kontrollläufen getestet stabiles Klima mit typischer Variabilität von Jahr zu Jahr und Jahrzehnt zu Jahrzehnt zeigt. Danach ist die zeitabhängig zunehmende Störung durch erhöhten Treibhauseffekt, Ozonverdünnung in der Stratosphäre, Zunahme der Lufttrübung in und im Lee von industriellen Ballungsgebieten sowie in tropischen Savannen mit Vegetationsbränden und durch Landnutzungsänderungen vorzugeben. Alle diese Störungen im Klimasystem sind bisher noch nicht gemeinsam vorgegeben worden und auch die in Abb. 1-2 und 1-3 vor-

gestellte mittlere globale Niederschlagsverteilung bzw. der Nettofrischwasserfluss sind erst in diesem Jahr zu Stande gekommen. Außerdem ist sie über den Ozeanen mit den Hauptniederschlagsgebieten in den Tropen und über dem Golfstrom bzw. dem Kuroshio noch nicht ausreichend durch mit in-situ Daten getestete Fernerkundungsalgorithmen erhärtet. Die Berechnung von Niederschlagsänderungen über See wie in Abb. 1-1 gezeigt, muss also noch getestet werden. Erste Verbesserungen sind von KLEPP et al. (2002) vorgeschlagen worden. Bei allen bisher beschriebenen Modellversuchen ist die Zeitskala kurz genug gewesen, um die Eisgebiete und die Biome konstant halten zu können und auch Schwankungen der Erdbahn um die Sonne konnten unbeachtet bleiben.

7 Austrocknung der Sahara

Soll der Übergang der Sahara von einer Trockensavanne in ein hyperarides Gebiet verstanden werden, so müssen sowohl die Vegetation interaktiv mit der Atmosphäre gekoppelt sein, d.h. die Vegetation muss sich ändern dürfen und dadurch wieder selbst Klima ändern, als auch die Schwankungen der Erdbahnparameter beachtet werden. Für solche Jahrtausende überstreichende Simulationen sind die gegenwärtigen Superrechner noch viel zu langsam, um eine hohe räumliche Auflösung von 100 km und besser zu garantieren. Daher werden dafür Modelle mittlerer Komplexität verwendet, deren Module mit höher auflösenden getestet wurden. CLAUSSEN et al. (1999) haben mit einem solchen Modell zeigen können, dass die Sahara etwa 5400 Jahre vor heute abrupt austrocknete, weil auf der nördlichen Erdhälfte wegen systematisch verminderter Bestrahlung durch die Sonne im Sommer schwächere Monsune auftraten (siehe auch Claußen in Heft II dieser Trilogie) und die Rückkopplung der Vegetation den Übergang nach einigen besonders trockenen Jahren erzwang.

Abb. 1-1: Mittlere jährliche Niederschlagsverteilung der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts im mittel- und nordeuropäischen Raum (links), berechnet mit dem regionalen Zirkulationsmodell REMO, sowie die für das Jahrzehnt 2020-2029 folgende Niederschlagsänderung in Prozent bei Vorgabe des B2-Szenarios (IPCC 2001). REMO wird angetrieben vom globalen gekoppelten Modell ECHAM4/OPYC und hat eine horizontale Auflösung von 18 km. Nach: JACOB und BÜLOW (2002).



8 Eiszeitzyklen

Sollen die Eiszeitzyklen verstanden werden, ist auf jeden Fall neben den Schwankungen der Erdbahnparameter auch ein Anwachsen und Abschmelzen von Inlandeisgebieten zu beachten. Bei den langen Zeitskalen von Hunderttausenden von Jahren ist klar, dass nur räumlich grob auflösende Modelle mit höheren Zeitschritten zum Erfolg führen können. Solche Modelle mittlerer Komplexität sind entwickelt worden und sowohl in diesem Heft (Beitrag Herterich) als auch in Heft II wird davon berichtet werden. Zum Test der Modelle stehen nur an einigen Orten oft nur grob zeitlich auflösende und nur grob zeitlich absolut einzuordnende Paläodaten aus Eisbohrkernen und Tiefseesedimenten zur Verfügung. Damit ist es allerdings gelungen, die Bedeutung der Erdbahnparameter für diese langfristigen Klimaveränderungen nachzuweisen; den Mechanismus für die Dominanz des 100.000-jährigen Zyklus seit etwa 800.000 Jahren hat man jedoch noch nicht klären können.

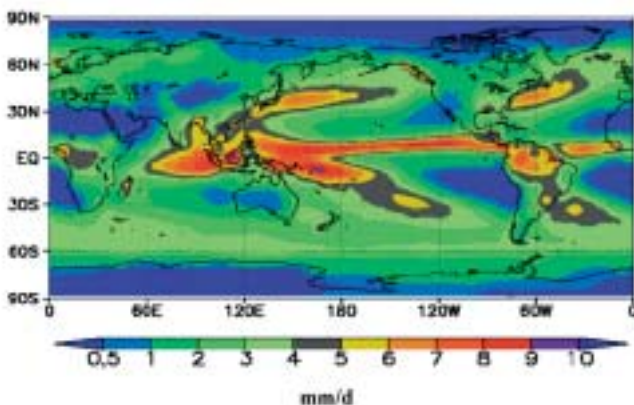


Abb. 1-2: 20-jähriges Mittel des Niederschlages (1981–2000), abgeleitet aus direkten Messungen über Land (Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie des DWD in Offenbach) und Satellitendaten (geostationäre und polar umlaufende) durch das „Global Precipitation Climatology Project (GPCP)“ des Globalen Energie- und Wasserkreislauf-Experimentes (GEWEX) im Weltklimaforschungsprogramm; siehe auch www.gewex.com.

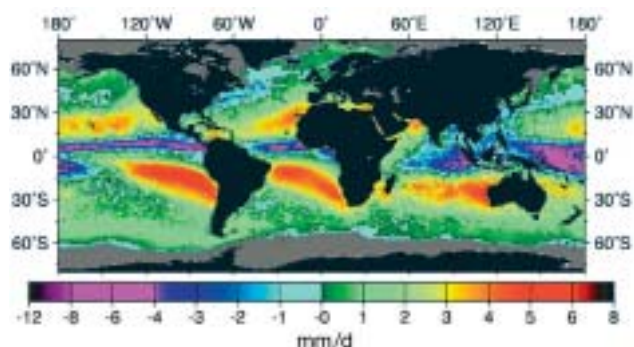


Abb. 1-3: Mittlerer Netto-Süßwasserfluss der Jahre 1992/93 über dem Ozean, abgeleitet aus Satellitendaten, die sowohl den Niederschlag wie die Verdunstung bestimmen lassen; zu Details der Klimatologie „Hamburg Ocean Atmosphere Parameters from Satellites (HOAPS)“ siehe auch <http://www.mpimet.mpg.de/Depts/Physik/HOAP>

9 Ausblick auf dieses Heft

In diesem Heft wird nach dieser Einführung (Kapitel 1) in einem Beitrag von Bakan und Raschke (Kapitel 2) der natürliche Treibhauseffekt als ein Grundphänomen von Planetenatmosphären vorgestellt. Mit einem Beitrag über die Rolle der Wolken für das Klima der Erde von Raschke und Quante spricht Kapitel 3 ein zentrales Gebiet heutiger Klimaforschung an, in dem es noch vieles zu verstehen gilt. Danach beschreibt in Kapitel 4 Andreas Hense die Klimavariabilität durch die interne Wechselwirkung der Klimasystemkomponenten, d. h. die Schwankungen von Jahr zu Jahr oder auch von Jahrzehnt zu Jahrzehnt, die nicht durch Vulkanausbrüche oder veränderte Abstrahlung von der Sonne verursacht werden. In Kapitel 5 stellt Klaus Herterich vor, wie weit das Verständnis des Einflusses der Bahnparameter der Erde (Umlauf um die Sonne) vorangekommen ist, wie stark also die Milankowitsch-Theorie durch Paläoklimadaten bestätigt worden ist und ob man das schon modellieren kann.

In Kapitel 6 beschreibt Ulrich Cubasch wie weit wir den Einfluss der Schwankungen der Sonnenstrahlung auf das Klima der Erde verstehen. Ob wir z. B. die „Kleine Eiszeit“ von etwa 1400 bis 1850 n. Chr. damit erklären können. Im abschließenden Kapitel 7 stellt Hans Graf vor, wie stark Vulkane das globale Klima beeinflussen, was durch die beiden starken Ausbrüche im ausgehenden 20. Jahrhundert mit der Möglichkeit zu ausführlicher Beobachtung erheblich erleichtert wurde.

Literatur

- CLAUSSEN, M., C. KUBATZKI, V. BOROVKIN, A. GANOPOLSKI, P. HOELZMANN, H.J. PACHUR, 1999: Simulation of an abrupt change in Saharan vegetation at the end of the mid-Holocene. *Geoph. Res. Letters* **24**, 2037-2040.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis; Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of IPCC; Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- JACOB, D., K. BÜLOW, 2002: Private Mitteilung.
- KLEPP, C., S. BAKAN, H. GRASSL, 2003: Improvements of satellite-derived freshwater cyclonic rainfall over the North Atlantic, *J. of Climate*, im Druck.
- JOST, V., S. BAKAN, K. FENNIG, 2002: HOAPS new satellite-derived flux climatology; *Met. Z.* **11**, 61-70.
- WMO (World Meteorological Organisation), 1984: Report of the WMO meeting of experts on potential climatic effects of ozone and other minor trace gases; WMO Global Ozone and Monitoring Project, Report No. **14**, WMO, Geneva.