



PARTNERSCHAFT
ERDSYSTEM-
FORSCHUNG



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



Inhalt

Erdsystemforschung – ein neuer Ansatz in den Wissenschaften von der Erde.....	3
Wissenschaftliche Kernfragen der Erdsystemforschung.....	7
Implementierungsstrategien	8
Erdsystembeobachtung	9
Experimentelle Erforschung von Prozessen im Erdsystem	9
Modellierung des Erdsystems	11
Beitrag zu internationalen Programmen	12
Infrastruktur	14
Ausblick	15

Impressum

Herausgeber und Copyright

Max-Planck-Institut für Biogeochemie
Hans Knöll Str. 10
D-07745 Jena, Germany

Max-Planck-Institut für Chemie
Joh.-Joachim-Becher-Weg 27,
D-55128 Mainz, Germany

Max-Planck-Institut für Meteorologie
Bundesstraße 53
D-20146 Hamburg, Germany

Text und Abbildungen

Prof. Dr. Meinrat O. Andreae
Prof. Dr. Martin Claußen
Prof. Dr. Martin Heimann
Prof. Dr. Jos Lelieveld
Prof. Dr. Jochem Marotzke

Design

Norbert P. Noreiks

Beratung

Dallas Murphy

Erdsystemforschung – ein neuer Ansatz in den Wissenschaften von der Erde

In den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts hat sich eine fundamentale Wende im Denkansatz der Wissenschaften von der Erde vollzogen. Bis dahin hatten die einzelnen Komponenten des Erdsystems im Vordergrund wissenschaftlichen Interesses gestanden und waren von getrennten Disziplinen erforscht worden: die Ozeane von der Meereskunde, die Atmosphäre von der Meteorologie und Klimaforschung, die feste Erde von Geologie, Geochemie und Geophysik, und so weiter. Auch die vom Menschen verursachten Umweltprobleme wurden isoliert betrachtet, z.B. Luftbelastung, Wasserverschmutzung, Ozonloch, Klimawandel.

Mit dem dramatischen Anwachsen des Einflusses menschlicher Aktivitäten auf die Umwelt entstand der Begriff „Globaler Wandel“, der ausdrückt, dass sich unsere Umwelt im globalen Maßstab verändert und gleichzeitig quer durch alle Erdsystemkomponenten und wissenschaftliche Disziplinen erstreckt. Jede Änderung in einer einzelnen Komponente kann das ganze System beeinflussen, und Fernwirkungen und Rückkopplungen sind zentrale Eigenschaften des Erdsystems. Verändert man zum Beispiel die Zusammensetzung der Atmosphäre durch Zugabe von Kohlendioxid (CO_2), so erwärmt sich das Klima, der Meeresspiegel wird höher, Gletscher schmelzen ab und Pflanzen wachsen schneller. Diese Änderungen wiederum beeinflussen die Zusammensetzung der Atmosphäre, wodurch vielfache Rückkopplungen und Querverbindungen entstehen (Abb. 1).

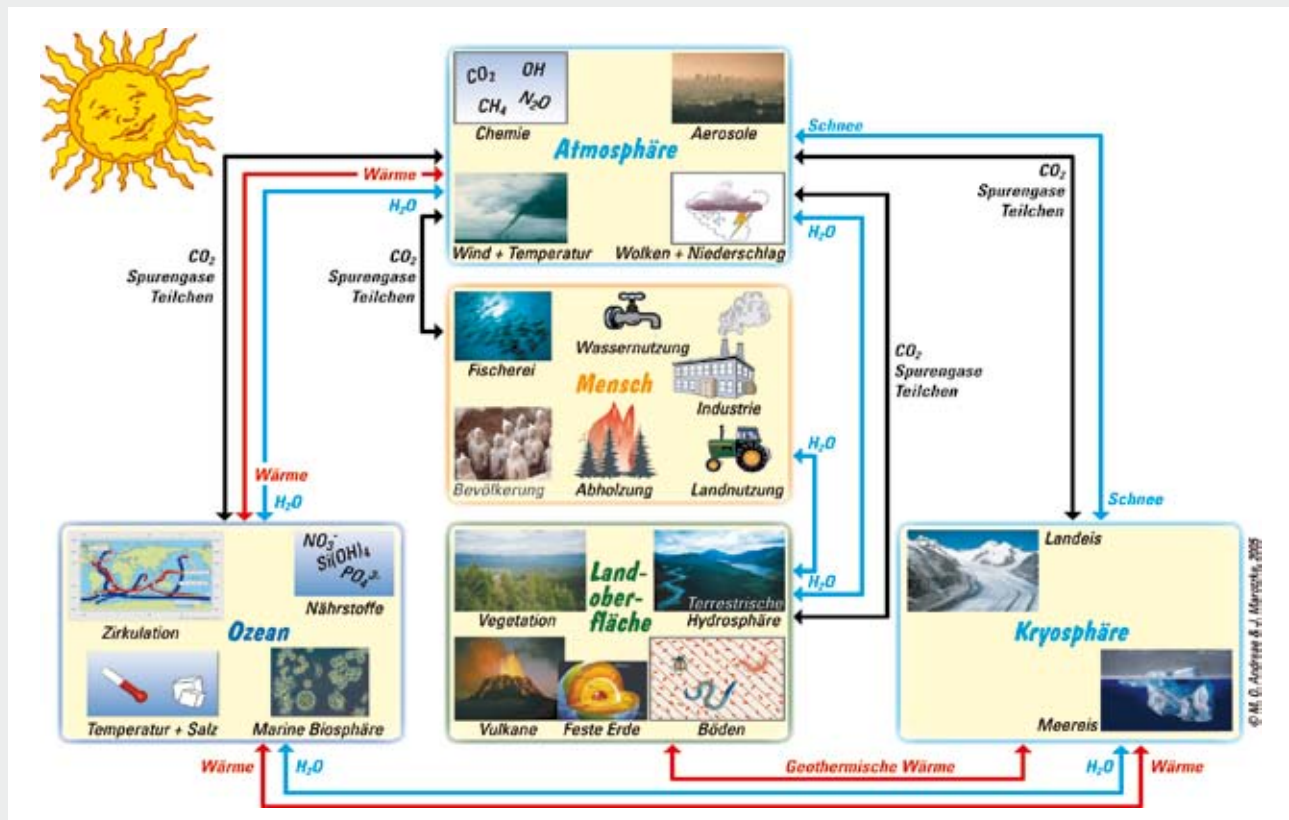


Abb. 1. Das Erdsystem und seine Wechselwirkungen.



Antarktische Eiskerne, die in gewissem Sinn die Geschichte der Luftzusammensetzung und der Temperatur aufzeichnen, sind eine Art „Rosettastein“ des Erdsystems (Abb. 2). Über 400.000 Jahre hinweg steigen und fallen im strengen Gleichschritt die Temperatur der Erde und die Konzentrationen der Spurengase Methan (CH_4) und Kohlendioxid, obwohl diese Gase von ganz unterschiedlichen biologischen Prozessen reguliert werden. Jedoch kann weder eine extern angetriebene Temperaturänderung die Fluktuationen der biogenen Spurengase erklären, noch reichen deren Variationen aus, um die Klimaänderungen zu bewirken. Dies führt zu der Hypothese, dass die Biosphäre und ihre geophysikalische und geochemische Umwelt ein untrennbares System mit vielfachen und komplexen Rückkopplungen bilden und als Ganzes untersucht werden müssen. Davor glaubten Geowissenschaftler, dass sich biologische Prozesse dem Primat des physikalisch-geologischen Klimasystems unterordnen und sich durch Evolution den externen physikalischen Gegebenheiten anpassen. Während es nach wie vor unumgänglich ist, die Prozesse innerhalb der Komponenten des Erdsystems zu erforschen – etwa die Zirkulation der Ozeane, die Zusammensetzung der Atmosphäre und die sie regelnden Mechanismen – kommt immer stärker die Notwendigkeit hinzu, die Beziehungen zwischen den Komponenten zu untersuchen. Wie zum Beispiel können wir Ozean-Atmosphären-Wechselwirkungen im Kontext von Mantelkonvektion, Vulkanismus und anderen langzeitlichen Prozessen verstehen? Darüber hinaus erfordert der durchgreifende Einfluss des Menschen auf seine Umwelt, auch die Menschen in den Systemansatz einzubeziehen.

Erfolgreiche Erdsystemforschung erfordert die Kombination dreier verschiedener methodischer Ansätze. Messungen und Experimente „vor Ort“ sind notwendig, vor allem um Prozesse innerhalb der Kom-

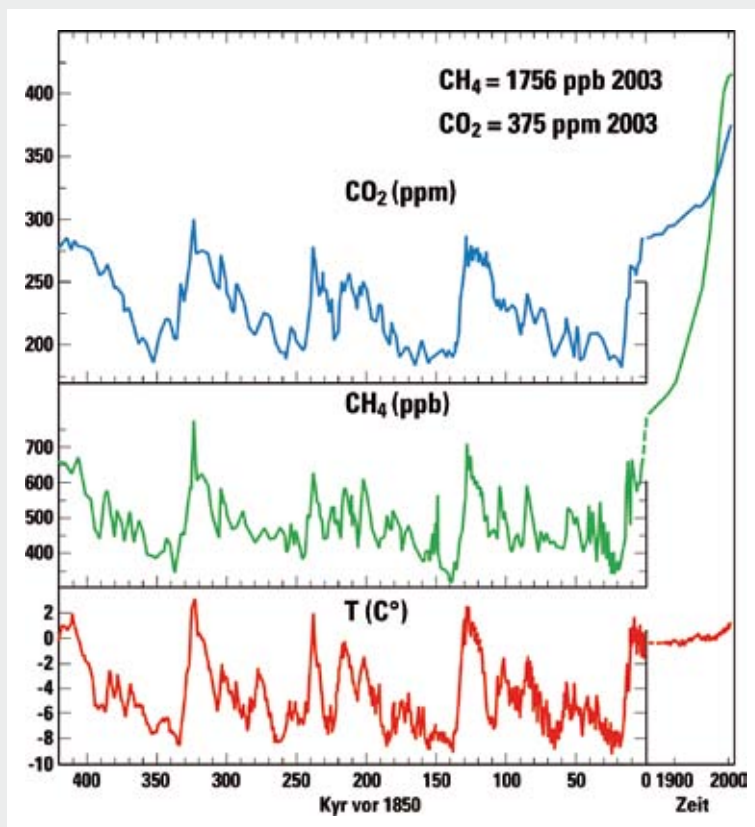


Abb. 2 (aus Hansen, *Clim. Change*, 68, 269-279, 2005). Verlauf von atmosphärischem Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Temperaturänderungen, gewonnen aus antarktischen Eisbohrkernen durch Petit et al. (*Nature*, 399, 429-436, 1999) und von in-situ und anderen Daten aus dem letzten Jahrhundert. Die mittlere Temperatur der Jahre 1880-1899 definiert den Temperaturnullpunkt. Diese Kurven zeigen das verwickelte und unerklärte Wechselspiel zwischen Variationen in physikalischen Klimaparametern und der Zusammensetzung der Atmosphäre.

Partnerschaft Erdsystemforschung

ponenten zu untersuchen, wie etwa chemische Reaktionen in der Atmosphäre, Einflüsse auf die Ozeanzirkulation, Gasaustausch zwischen Pflanzen und Luft, Niederschlagsbildung in Wolken, oder Ausstoß von Lava, Gasen und Staub durch Vulkane. Hierbei ergänzen sich Beobachtungen, meist in der Form von Feldmesskampagnen, und kontrollierte experimentelle Eingriffe, im Labor oder im Feld.



Abb. 3. Die Terrakotta-Armee von Xian (China) dient als Allegorie des Wechselspiels zwischen der menschlichen Bevölkerung und dem natürlichen Erdsystem.

Zweitens ist es notwendig, die Erde auf großen Zeit- und Raumskalen zu untersuchen, um regionale, globale und langfristige Vorgänge und Änderungen zu verstehen. Die Nutzung und Analyse von Daten aus der Fernerkundung ist zur Erfassung großskaliger Phänomene unersetzlich. Die langen Zeitskalen und die starke natürliche Variabilität im Erdsystem erfordern langfristige Messungen an ausgewählten Standorten und die Untersuchung von natürlichen „Archiven“ wie zum Beispiel Eisbohrkernen oder Sedimentprofilen.

Das dritte Standbein der Erdsystemforschung ist die numerische Modellierung. Sie ist das fundamentale theoretische Werkzeug zur Erforschung der Zusammenhänge im Erdsystem. Modellierung ist die einzige „Sprache“, in der sich die komplexen Prozesse im System Erde und seinen Komponenten qualitativ und quantitativ ausdrücken lassen. Aufgrund der vielfachen Wechselwirkungen und Rückkopplungen im Erdsystem entzieht sich die Analyse der Auswirkungen von „Störungen“ (z. B. Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen, Landnutzungsänderung oder Brandrodung) oft einer linearen und intuitiven Analyse, und häufig treten scheinbar paradoxe Effekte auf. Diese vielfachen Wechselwirkungen lassen sich nur mit Hilfe von Modelle adäquat untersuchen. Wir erwarten in absehbarer Zeit allerdings kein „Supermodell“, das das ganze Erdsystem repräsentieren kann. Vielmehr werden Modelle unterschiedlicher Komplexität entwickelt, sowie Teilmodelle, die modular verknüpft werden können.



Abb. 4. Dieses Bild vom „SeaWiFS“-Satelliten zeigt viele heutige Forschungsgegenstände von atmosphärischen und Erdsystemwissenschaftlern – Wolken, aus der Sahara stammenden Staub in der Luft und industrielle Luftverschmutzung.



Abb. 5. Der Kegel des Mauna Ulu. Vulkane verkörpern die Wechselwirkung zwischen der festen Erde sowie Atmosphäre und Ozean.

Wissenschaftliche Kernfragen der Erdsystemforschung

Wir stellen im Folgenden ausgewählte Kernfragen und Themen vor, die gegenwärtig und in der absehbaren Zukunft von der „Partnerschaft Erdsystemforschung“ der Max-Planck-Institute und ihrer Partner untersucht werden.

1) Wie ist das Erdsystem organisiert?

- Systemanalyse unserer globalen Umwelt
- Rückkopplungen und Fernwirkungen
- Bifurkationen, nichtlineares Verhalten, abrupte Änderungen, kritische Schwellen
- Wechselwirkungen Biosphäre-Klima
- Die Rolle der Biodiversität
- Flüsse von Energie, Substanzen, und Information im Erdsystem
- Kurz- und langfristige Wechselwirkungen Erdinneres-Ozean-Atmosphäre

2) Welche Prozesse regulieren die Verteilung und Verfügbarkeit von Wasser?

- Wechselwirkungen zwischen Aerosolen, Wolken und dem Wasserhaushalt
- Klima und Wasserhaushalt in Zukunftsszenarien

3) Welche Wege führen zu brauchbaren Modellen des Erdsystems?

- Theoretische Grundlagen für neue Modellansätze
- Spektrum aus Modellen unterschiedlicher Komplexität
- Modulare Strukturen in Erdsystemmodellen

4) Wie können Erdsystemmodelle und deren Komponenten evaluiert werden?

- Beobachtungsstrategien
- Paläo-Wissenschaften
- Datenassimilation
- Andere Planeten

5) Welche Regionen und Komponenten reagieren besonders empfindlich auf den Globalen Wandel?

- Welche Rolle spielen die Tropen im Erdsystem?
- Rolle der aggressiven sozioökonomischen Entwicklung in den tropischen Regionen (Megacities)
- Wie stabil sind die borealen und arktischen Zonen?
- Die Oxidationskapazität der Atmosphäre
- Atmosphärische Zirkulationsdynamik, Monsun, Wasserkreislauf
- Die thermohaline Zirkulation und Tiefenwasserbildung im Nordatlantik
- Öffnen und Schließen von Meeresspassagen

6) Gibt es Möglichkeiten, das Erdsystem langfristig zu „steuern“?



Implementierungsstrategien

Die hier diskutierte Forschungsproblematik überschreitet die Möglichkeiten eines einzelnen Max-Planck-Instituts bei weitem. Andererseits existieren aber drei Max-Planck-Institute, die zentral der Erforschung von Komponenten des Erdsystems gewidmet sind (MPI für Chemie in Mainz – MPI-C, MPI für Meteorologie in Hamburg – MPI-M, und MPI für Biogeochemie in Jena – MPI-BGC). An einer Anzahl von weiteren Instituten gibt es Abteilungen und Gruppen, in denen ebenfalls erdsystemrelevante Forschung betrieben wird (MPI für Kernphysik in Heidelberg, MPI für terrestrische Mikrobiologie in Marburg, MPI für marine Mikrobiologie in Bremen, MPI für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau). Ausgehend von den Instituten in Mainz, Hamburg und Jena sind die beteiligten Institute und Gruppen dabei, ihre Forschungsarbeiten in den Zusammenhang der Erdsystemforschung zu stellen und ihr Vorgehen abzustimmen. Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), das Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ) sowie die Universitäten an den Standorten der Max-Planck-Institute sind ebenfalls an diesem Forschungsverbund beteiligt.

Die hier beschriebenen Arbeiten sind eng mit internationalen Großforschungsvorhaben verknüpft, insbesondere mit dem Internationalen Geosphäre-Biosphäre Programm (IGBP) und dem Weltklimaforschungsprogramm (WCRP). Im Folgenden werden bestehende und im Aufbau begriffene Kooperationsvorhaben im Rahmen der Partnerschaft „Erdsystemforschung“ kurz beschrieben. Ergänzend werden auch Arbeiten erwähnt, die im Wesentlichen an Einzelinstituten durchgeführt werden, aber einen wichtigen Beitrag zum Gesamtansatz darstellen.

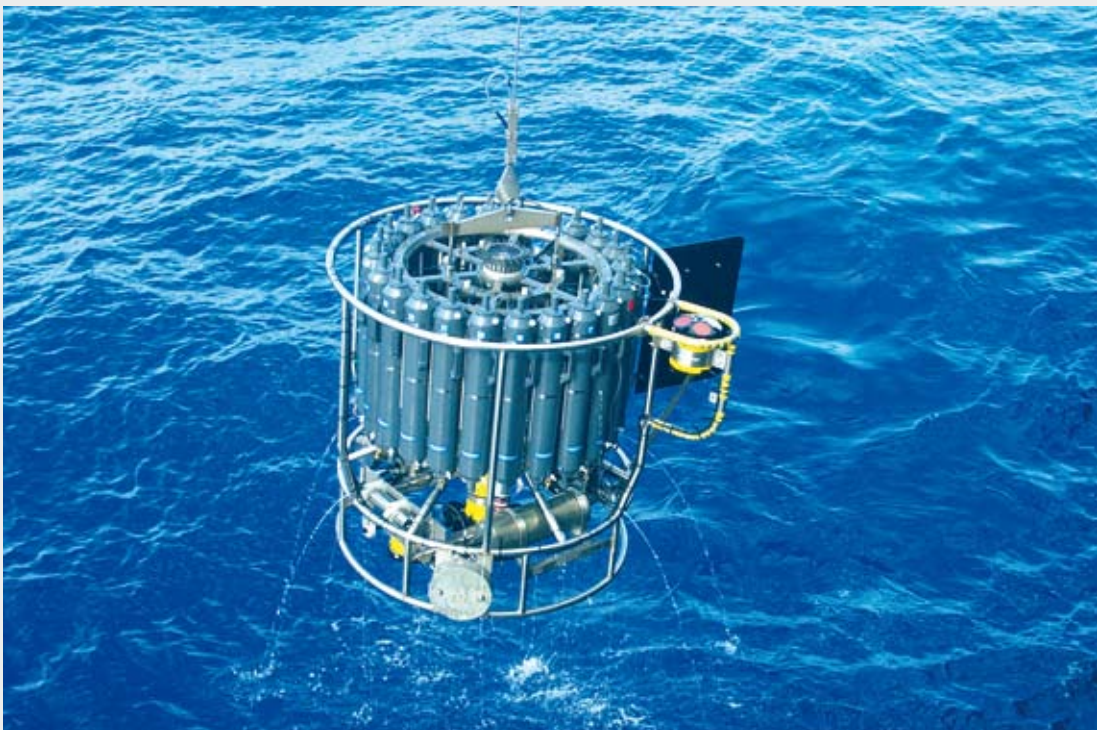


Abb. 6. Hochauflösende Erdsystemmodelle benötigen eine Vielzahl von fernerkundeten und in-situ-Daten zur Evaluation. Hier wird gerade eine Sonde geborgen, die in einem Projekt zur dauerhaften Vermessung der thermohalinen Zirkulation bei 26.5°N im Atlantik zum Einsatz kommt.

Erdsystembeobachtung

- 1) Gemeinsame Feldmesskampagnen in kritischen Regionen der Erde
 - Zusammenarbeit MPI-C/MPI-BGC bei der Untersuchung von Spurenstoffflüssen im Amazonasbecken, in Europa und in Sibirien
 - Gemeinsamer Aufbau und Betrieb eines Messturms zur Untersuchung des Kohlenstoffkreislaufes und anderer Stoffflüsse in Sibirien (MPI-BGC, MPI-C)
 - Untersuchungen mit dem neuen Forschungsflugzeug HALO in ausgewählten Erdregionen, z.B. China, Nordatlantik, Tropen, Sibirien (erwartet ab 2008, alle Partner)
- 2) Erdsystembeobachtung durch Satelliten-Fernerkundung
 - Aufbau einer Arbeitsgruppe, später Abteilung, am MPI-C
 - Zusammenarbeit bei der Nutzung von Daten aus der Fernerkundung
 - Erstellung globaler Klimatologien, z.B. Niederschläge und Energieflüsse über dem Ozean (MPI-M)
 - Einrichtung regionaler und kontinentaler Inventuren
- 3) Wechselwirkungen zwischen Erdinnerem, Ozean und Atmosphäre (MPI-C, Universität Mainz, MPI-M, MPI Sonnensystemforschung)
 - Kurzfristige Effekte, z.B. durch Ausstoß von vulkanischer Asche und Gasen
 - Langfristige Austauschprozesse (z.B. Einfluss von hydrothermalen Prozessen auf die Wasserchemie, Veränderung der Ozeanzirkulation durch plattentektonisch bedingte Änderung der Kontinent-Ozeanconfiguration, Einfluss der Gesteinsverwitterung auf den CO₂-Haushalt)

Experimentelle Erforschung von Prozessen im Erdsystem

- 1) Ökophysiologische und biogeochemische Untersuchungen zu Stoffflüssen im Erdsystem (MPI-BGC, MPI-C)
- 2) Chemische Prozesse in der Atmosphäre (MPI-C, MPI-M, MPI-BGC)
- 3) Wechselwirkung von Aerosolen und Wolkenpartikeln (MPI-M, MPI-C)
- 4) Biodiversität (MPI-BGC)

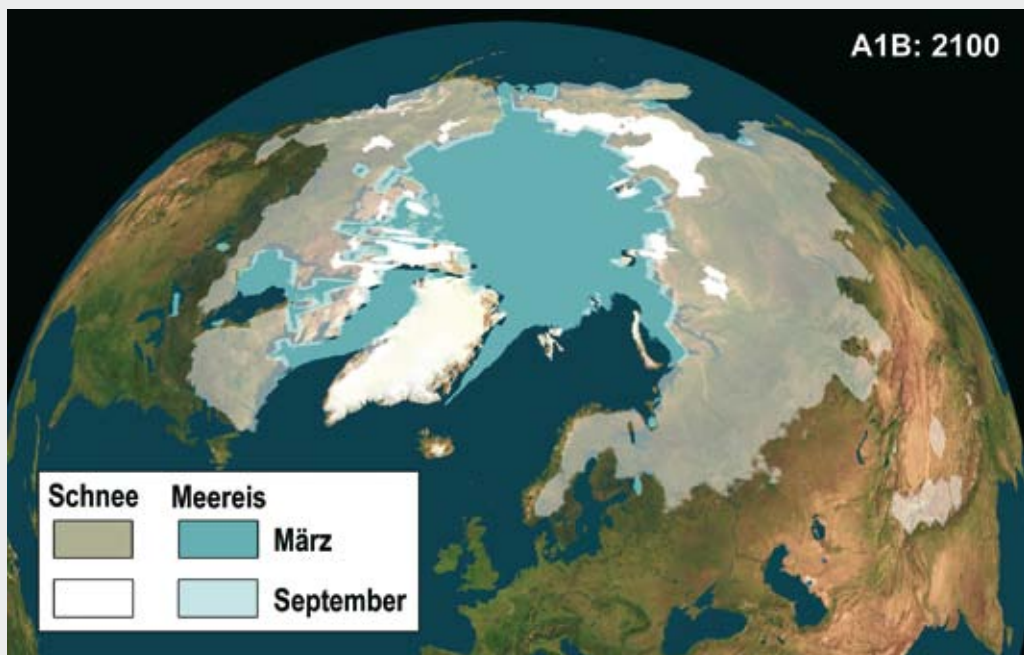


Abb. 7. Ergebnisse des „moderaten“ IPCC-Szenarios A1B, berechnet mit dem Klimamodell des MPI-M. Dargestellt sind Meereis und Schneebedeckung in September und März, im Jahr 2004 und im Jahr 2100. Nach diesem Szenario wird die Arktis zum Ende dieses Jahrhunderts im Sommer fast vollständig eisfrei sein.



Abb. 8. Ellesmere Island in der kanadischen Arktis, aufgenommen am 31. Juli 2000 durch den „ASTER“-Satelliten. Großes Bild: Dobbin Bay ist am unteren Ende der Gletscher zu erkennen. Der Ausschnitt (kleines Bild) der „schwimmenden Zunge“ des Eugenie-Gletschers zeigt Risse an der Oberfläche und verbreitetes Kalben von Eisbergen.



Modellierung des Erdsystems

- 1) Entwicklung eines „Erdsystemmodells“; d. h. die Kopplung und Weiterentwicklung vorhandener Modelle mit neuen numerischen Methoden. Komponentenmodelle umfassen:
 - Untere und mittlere Atmosphäre (MPI-M, MPI-C)
 - Ozean-, Meereis- und Landeismodelle (MPI-M)
 - Marine und terrestrische Biogeochemie (alle Partner)
 - Vegetation und Landoberfläche (alle Partner)
 - Erdsystemmodelle mittlerer Komplexität, EMICs (PIK, MPIs)
 - Geodynamisch-geochemische Konvektion im Erdinneren (MPI-Sonnensystem, MPI-C)
- 2) Regionale Modellierung des Wasserkreislaufs (MPI-M)
- 3) Assimilation von Satelliten- und anderen Daten zur Verbesserung von Wetter- und Klimavorhersagen (MPI-M, MPI-C)



Beitrag zu internationalen Programmen

Die Partnerschaft „Erdsystemforschung“ ist in die internationale Forschergemeinschaft in diesem wissenschaftlichen Gebiet eng integriert. Die bestehenden Großprogramme World Climate Research Programme (WCRP), International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), International Human Dimensions Programme (IHDP) und Diversitas sind in der „Earth System Science Partnership“ (ESSP) zusammengeschlossen. Direktoren und wissenschaftliche Mitarbeiter aus den Instituten der Partnerschaft „Erdsystemforschung“ arbeiten in diesen Programmen als Chairmen, Mitglieder der Scientific Steering Committees und Chairmen von Kernprojekten mit. Dadurch nehmen sie gestaltenden Einfluss auf die internationale Entwicklung dieser Programme. Weiterhin spielen sie eine leitende Rolle bei einer großen Anzahl von europäischen Forschungsprojekten. Sie leisten ebenfalls wichtige Beiträge zu den periodischen Stellungnahmen des Zwischenstaatlichen Ausschusses zur Klimaveränderung (IPCC).



Abb. 9. Im Jena-Experiment in der Saaleaue werden die Wechselwirkungen zwischen Pflanzendiversität und Ökosystemprozessen auf mehr als 80 Plots mit Mischungen von einer bis 60 Arten und einer bis vier funktionellen Gruppen untersucht.



Abb. 10. Messturm im Nationalpark Hainich (Nordthüringen), an welchem kontinuierlich die vertikalen Austauschflüsse von CO_2 und Wasserdampf zwischen Atmosphäre und Landvegetation bestimmt werden.

Abb. 11. Hohe Türme können für großräumige und langzeitliche Messungen von CO_2 und anderen Spurenstoffen benutzt werden. Im Bild zu sehen ist der Turm ZOTTO (Zotino Tall Tower Observatory), ein im Bau befindlicher neuer 300 m hoher Beobachtungsmast in Zentralsibirien (nahe 60°Nord , 90°Ost), der in Kooperation zwischen drei MPI's und des Russian Institute of Forest, Krasnoyarsk entsteht (Photo: Y. Kisilyakhov).



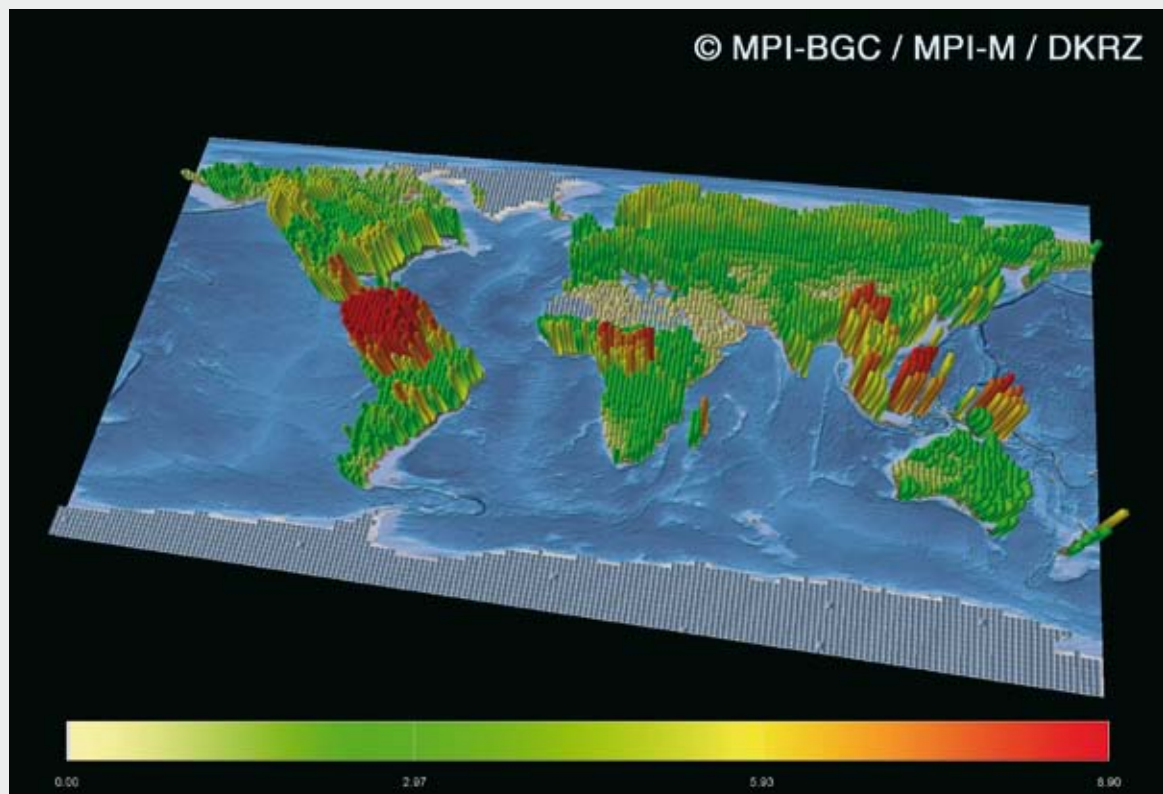
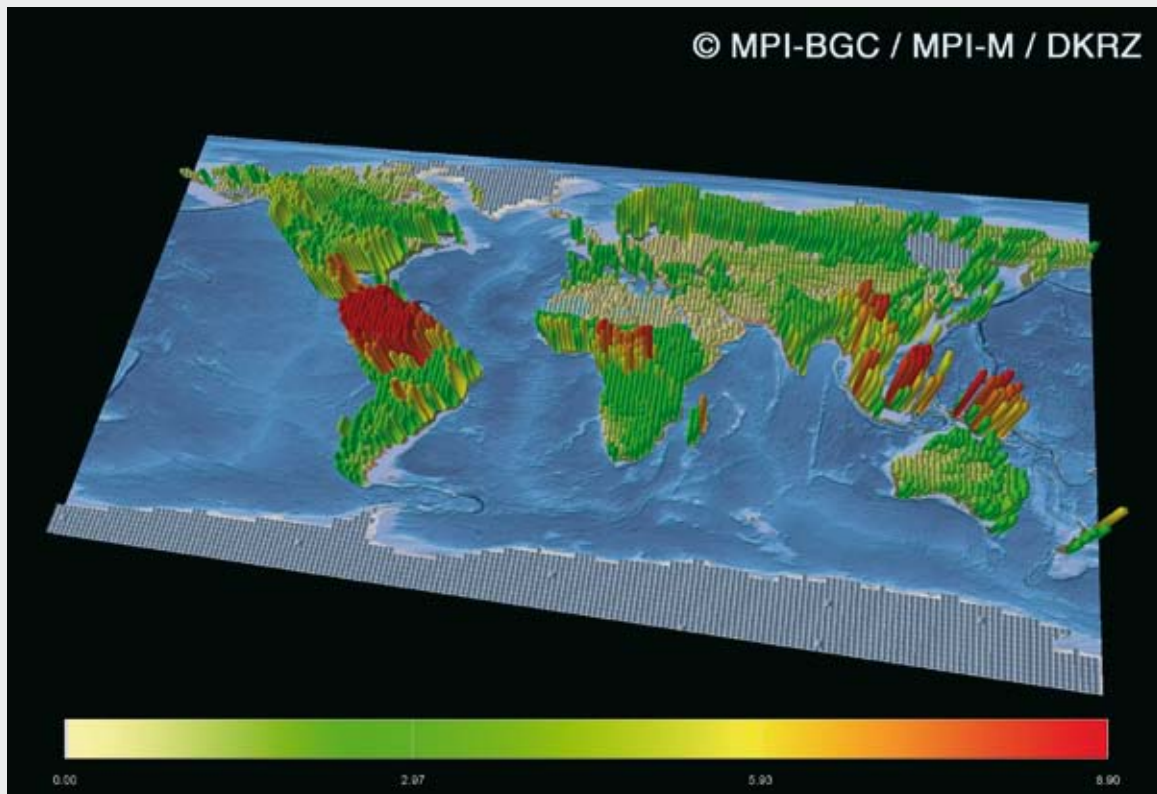


Abb. 12. Simulierte Vegetationsintensität (Blattfläche pro m^2 Boden) im Januar (oben) und Juli (unten). Besonders auffällig sind die sommerliche Aktivität in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre, die südwinterliche Aktivität in Australien, sowie das Nadelabwerfen der sibirischen Lärchenwälder im Winter.



Infrastruktur

Neben der „normalen“ Infrastruktur an den beteiligten MPIs und am PIK schaffen bestehende und in der Vorbereitung befindliche umfassendere Infrastrukturkomponenten wichtige Voraussetzungen für eine Erforschung des Erdsystems. Das Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ) und die an den anderen Instituten vorhandenen Rechenkapazitäten ermöglichen den Einsatz von aktuellen Modellkomponenten (Klima, Chemie, Kohlenstoffkreislauf, Vegetation usw.) der in der Entwicklung befindlichen Erdsystemmodelle (COSMOS, MESSy). Diese Modelle werden der internationalen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellt. Ein 300 m hoher Turm wird in Sibirien errichtet, um die atmosphärische Zusammensetzung zu untersuchen. Das Forschungsflugzeug HALO, mit wesentlicher finanzieller und wissenschaftlicher Beteiligung der Institute der Partnerschaft „Erdsystemforschung“, wird die fortschrittlichste Flugzeug-Messplattform in Europa für das nächste Jahrzehnt darstellen.

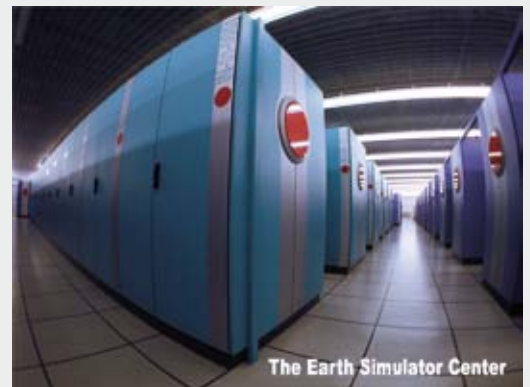


Abb. 13. Supercomputer sind unverzichtbar in der Erdsystemmodellierung. Das Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ) verfügt über einen der leistungsfähigsten Rechner für die Erdsystemforschung in Europa (links), der allerdings vom Erdsimulator in Japan (rechts) um den Faktor 25 in der Rechenleistung übertroffen wird.



Abb. 14. Vision des geplanten Forschungsflugzeugs HALO (High-Altitude Long-range).

Ausblick

Langfristiges Ziel dieser Forschung ist es, ein Verständnis des Erdsystems zu entwickeln, das es uns erlaubt, die Veränderungen in der Welt um uns herum zu begreifen und informiert zu handeln. Nur so lässt sich herausfinden, welche politischen und wirtschaftlichen Maßnahmen zum Schutz des Erdsystems dringend und kritisch sind, und wie die natürlichen Ressourcen unseres Planeten optimal und nachhaltig genutzt werden können. Ein solides wissenschaftliches Verständnis der Zusammenhänge im Erdsystem ist auch die grundlegende Voraussetzung dafür, um Politik und Gesellschaft von schwierigen und einschneidenden Maßnahmen zu überzeugen, wie es etwa eine drastische Reduzierung der CO₂-Emissionen wäre. Gleichzeitig müssen technologische und ökonomische Alternativen entwickelt werden, wozu die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen gesucht werden wird. Diese Alternativen werden ebenfalls Auswirkungen auf das Erdsystem haben, die wir nur mit Hilfe von Erdsystemmodellen erforschen können.



© 2006