

3.4 NEUE THEMEN

Das gemeinschaftliche Ozeanmodell

Als Teil des innerhalb von MARCOPOLI finanzierten Aufwuchsprogramms wurde ein "Community Ocean Model" (COM) vorgeschlagen, dessen Hauptziel es ist, der Nutzergemeinde ein Ozeanmodell der zweiten Generation zu liefern, bei dem viele Mängel der traditionellen numerischen Modelle beseitigt wurden. Die wesentlichen Verbesserungen, die wir in den ersten beiden Jahren des Projekts in Angriff genommen haben, sind eine physikalischere Behandlung der Randbedingungen und eine bessere Auflösung der Küstenlinien sowie von örtlich interessanten Gebieten, ohne ‚Nesting-Probleme‘ von strukturierten Gittern. Dies konnte durch Anwendung der Finite-Elemente-Formulierung auf die Bewegungsgleichungen in primitiven Variablen geleistet werden.

Eine Vollversion des Modells (FEOM-1) wurde für verschiedene Computerstrukturen entwickelt und optimiert. Sie nutzt eine Finite-Elemente-Diskretisierung mit Tetraedern und wurde auf den globalen Ozean angewandt. Zwei regionale Versionen wurden im Detail verfolgt, die eine konzentrierte sich auf die thermohaline Zirkulation im Nordatlantik und die andere auf den Süßwasserhaushalt sowie die Meereisprozesse im Südozean. Der thermodynamische Teil des Meereismodells wurde vom dynamisch-thermodynamischen Standard-Meereismodell des AWI abgeleitet, das bereits bei mehreren Modellkoppelungsprojekten verwendet wurde. Der dynamische Teil wurde in finite Elemente diskretisiert und bietet zwei Ansätze der Eis-Rheologie an: den visko-plastischen und den elastisch-visko-plastischen. Das Meer-

3.4 ADDITIONAL FUNDING

The Community Ocean Model

As part of the "Growth Programme" funded within MARCOPOLI a "Community Ocean Model" (COM) was proposed. The primary goal is to provide to the user community a second generation ocean model, which overcomes many of the shortcomings of traditional numerical models. The major improvements tackled in the first two years of the project are a more physical treatment of the boundary conditions, better resolution of coastlines and local areas of interest while avoiding nesting of structured computational grids. These achievements could be reached by applying a finite element formulation to the 'primitive equations' of motion.

A full version of the model (FEOM-1) was developed and optimized for different computer architectures. It uses a tetrahedral finite-element discretisation and has been applied to the global ocean. Two regional versions have been studied in detail; one focusing on the thermohaline circulation of the North Atlantic and the other one on the fresh water budget and sea-ice processes in the Southern Ocean. The thermodynamic part of the sea-ice model is derived from the standard dynamic-thermodynamic AWI sea-ice model that has been used in several model coupling projects before. The dynamic part is discretized in finite elements and features two alternative rheologies: the viscous-plastic and the elastic-viscous-plastic approach. The sea-ice model can also be run in a stand-alone configuration.

eismodell kann auch in einer Einzelkonfiguration betrieben werden.

Diese Version wird zur Assimilation von Satellitendaten der Eisströmungsfelder im Arktischen Becken mit einer mittleren Auflösung von 1/4 deg eingesetzt. Die Finite-Elemente-Diskretisierung kann Küstenlinie und Topographie in einer glatten Weise darstellen, was ein wesentlicher Vorteil gegenüber den Standardansätzen mit finiten Differenzen ist. Sie ist jedoch aufgrund der unstrukturierten Gitter rechentechnisch aufwändiger. Um die Vorteile besser nutzen zu können, testen wir zur Zeit verschiedene Typen finiter Elemente, die eine Reduzierung der CPU-Last erlauben.

Zur Bestimmung der Ozeanzirkulation aus Temperatur- und Salzgehaltmessungen wurde ein stationäres, inverses Ozeanzirkulationsmodell entwickelt, das auf dem dynamischen FEOM-Kern basiert. Das Modell wurde mit abweichender Anpassung (3D-VAR) auf verschiedene Datensätze erfolgreich angewandt. Das inverse Modell wurde auch genutzt, um die Langzeitvariabilität der Nordatlantikzirkulation zu bewerten. Es ergab sich, dass dominante Zirkulationsmuster eng mit dem der Nordatlantischen Oszillationsindex (NAO) mit einem zeitlichen Abstand von einem Jahr verbunden sind.

Effiziente Kalman-Filter spielen bei der Datenassimilation eine wichtige Rolle. Ein systematischer und konsistenter Vergleich wurde für verschiedene Arten von Kalman-Filtern mit Fehler-Kovarianzen von reduziertem Rang (d.h. Ensemble Kalman-Filter EnKF, Singular Evolutive Extended Kalman-Filter SEEK und Singular Evolutive Interpolated Kalman-Filter SEIK) durchgeführt. Zudem wurden die entsprechenden Algorithmen implementiert. Die resultierende Software mit parallelisierten Kalman-Filtern (PDAF) kann

This version is employed for data assimilation of satellite-derived ice drift fields in the Arctic basin with a mean horizontal resolution of 1/4 degree. The finite element discretisation allows the coastline and topography to be represented in a smooth way which is an essential advantage over the standard finite-difference approaches. Yet it is more expensive technically due to the unstructured character of grids. To really exploit the advantages, work is now being done to test several types of finite elements, which allow a reduction of the CPU load.

For the purpose of estimating the ocean circulation from measurements of temperature and salinity, a stationary inverse ocean circulation model was designed based on the FEOM dynamic core. The model was successfully applied with variational assimilation (3D-VAR) to several data bases. The inverse model was also used to estimate long term variability of the North Atlantic circulation. It is found that dominant circulation patterns are closely related to the North Atlantic Oscillation (NAO) index lagged by one year.

Efficient Kalman filters play an important role in the field of data assimilation. A systematic and consistent comparison was performed for different kinds of Kalman filters with error spaces of reduced rank (i.e. Ensemble Kalman filter EnKF, Singular Evolutive Extended Kalman-filter SEEK and the Singular Evolutive Interpolated Kalman-Filter SEIK). Furthermore corresponding algorithms were implemented and the resulting framework of parallel Kalman filters is ready to be used for data assimilation. First applications were carried out for the North Atlantic with assimilation of satellite altimetry. It was shown in this context that localizing the error covariance turned out superior to a global approximation.

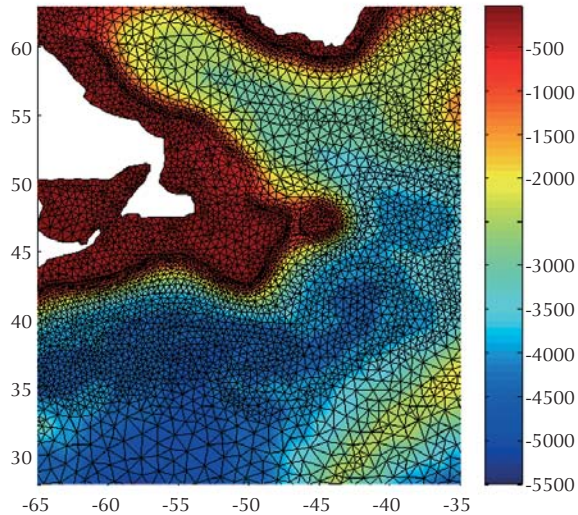


Abb. 1: Triangulierung des Nordatlantischen Ozeans mit einem unstrukturierten Netz. Die Maschengröße variiert entsprechend der topographischen Neigung des Ozeanbodens. Die höchste Auflösung wird an der Schelfkante erreicht. Dargestellt ist das Gebiet südlich von Grönland. Die Farbskala zeigt die Ozeantiefe in Metern.

Fig. 1: Triangulation of the North Atlantic Ocean with an unstructured mesh. The mesh size varies according to the slope of the ocean bottom topography. The highest resolution is achieved at the shelf break. Depicted is the area south of Greenland. The colourscale denotes the ocean depth in metres.

nun zur Datenassimilation genutzt werden. Erste Anwendungen wurden mit der Assimilation von Satellitenaltimetermessungen für den Nordatlantik durchgeführt. In diesem Zusammenhang stellte sich heraus, dass lokalisierende erfolgreicher als globale Fehler-Kovarianzen waren.

In collaboration with members of the Computing Center the Community Ocean Model has been further enhanced. Solver libraries in the numerically expensive part dealing with the solution of large sparse systems were optimized. This leads to an efficient reduction of the computation time. The interface package FoSSI (Family of Simplified Solver Interfaces) which has been developed at the AWI Computing Center allows for easy comparison of various solver configurations and adaptation to different computer hardware architectures. The solver framework ScOPES developed at the AWI computing center was used as a prototype for further memory saving parallelization needed to reduce memory requirements of global models with locally refined resolution in regions of interest, e.g. Weddell Sea.

The oceanic component of the COM project is augmented with an atmospheric unstructured module. In order to simulate multi-scale interactions between global and regional scales properly, the new self-adaptive atmospheric barotropic model PLASMA (Parallel Large scale Self-adaptive Model of the Atmosphere) on high performance computers has been developed. For that purpose, the adaptive Lagrange-Galerkin method, a combination of the finite element method and the semi-Lagrangian method for the spatial and temporal discretisation, has been applied to the spherical shallow-water equations.

Based on the experience gained within the COM project, a finite-element shallow-water wave propagation model was developed jointly by COM and German Indonesian Tsunami Early Warning System (GI-TEWS) project participants. It is currently employed in the GI-TEWS project for computing

In Zusammenarbeit mit Mitgliedern des Rechenzentrums wurde die Effizienz des finite Elemente Ozeanmodells erheblich gesteigert. Lösungsbibliotheken im numerisch aufwändigen Teil, die sich mit der Lösung großer, schwach besetzter Systeme befassen, wurden optimiert. Dies führt zu einer effizienten Verkürzung der Computerzeit. Das Programmpaket FoSSI (Family of Simplified Solver Interfaces), das am AWI-Rechenzentrum entwickelt wurde, erlaubt eine einfache Verwendung verschiedener Lösungskonfigurationen und die Anpassung an verschiedene Hardware-Rechnerstrukturen. Das ebenfalls entwickelte Programmpaket ScOPES wurde als Prototyp für weitere Speicherplatz sparende Parallelisierung genutzt, die zur Verminderung der Speicheranforderungen globaler Modelle mit örtlich verfeinerter Auflösung notwendig ist.

Die ozeanische Komponente des COM-Projekts wird durch ein unstrukturiertes Modul für die Atmosphäre ergänzt. Um die Wechselwirkungen zwischen globalen und regionalen Skalen genau zu simulieren, wurde das neue adaptive barotrope Atmosphärenmodell PLASMA (Parallel LArge scale Self-adaptive Model of the Atmosphere) auf Hochleistungsrechnern entwickelt. Zu diesem Zweck wurde die adaptive Lagrange-Galerkin-Methode, eine Kombination der Finite-Elemente-Methode und der Semi-Lagrange-Methode zur räumlichen und zeitlichen Diskretisierung, auf die Flachwassergleichungen angewandt.

Basierend auf den im COM-Projekt gesammelten Erfahrungen, entwickelten wir gemeinsam mit den Partnern des deutsch-indonesischen Tsunami-Frühwarnungssystems (GI-TEWS) ein Finite-Elemente-Modell zur Beschreibung von Flachwasserwellen. Es wird zurzeit im GI-TEWS-Projekt zur Berechnung von Wellenhöhe und -ankunftszeit angewandt. Hier ist die Nutzung der variablen Auflösung von außerge-

wave height and propagation time maps. Here the possibility of varying resolution is of exceptional value as the area of interest includes many islands and rapidly varying bathymetry.

Data bases constitute a considerable part of the GI-TEWS. Modelling of a tsunami's propagation in the deep sea trench off Indonesia takes too much time to carry out a real-time modelling in case of an earthquake event and warn Sumatra and the islands off the coast in time. Therefore so-called elementary tsunamis (synthetic tsunamis, pre-computed virtual tsunamis) are computed for about 500 distinguishable individual cases along the known tectonically active yield line in the Indian Ocean. In case of a warning, a comparison of data will allow for a fast classification. To make the simulation computations traceable, also the mass data (e.g. ocean-bottom topography interpolated on the irregular grid and values of tide models) are included into the archive. The mutual dependence of data and models is documented in corresponding metadata files. The freely available programme "CatMDEdit" is used as a metadata editor.

New Keys for Polar Climate Archive

The main goal of the additional funding theme "New Keys for Polar Climate Archives" (NEW KEYS) is the quantification of changes in global biogeochemical cycles found in polar ice cores using new analytical and modeling approaches. This comprises (isotopic) studies on greenhouse gases, multi-element analysis on mineral dust and other aerosol components as well as modeling of the global carbon cycle. In addition, process related studies such as novel 3D-computer tomography reconstructions of the firnification process are carried out to better constrain systematic

wöhnlichem Wert, da das betrachtete Gebiet viele Inseln und eine stark veränderliche Bathymetrie besitzt.

Einen erheblichen Teil des GI-TEWS nehmen Datenbanken ein. Die Modellierung der Ausbreitung einer Tsunami-Welle im Bereich des Tiefseegrabens vor Indonesien dauert zu lange, um sie im Fall eines Beben-Ereignisses in Echtzeit vornehmen zu können und noch rechtzeitig Sumatra und die vorgelagerten Inseln zu warnen. Deshalb werden entlang der bekannten tektonisch aktiven Bruchlinie im Indischen Ozean für ca. 500 unterscheidbare Einzelfälle so genannte Elementar-Tsunamis (synthetische Tsunamis, pre-computed virtual tsunamis) gerechnet. Im Warnungsfall kann durch Datenabgleich eine schnelle Einordnung erfolgen. Um die Simulationsrechnungen nachvollziehbar zu machen, werden auch die Masendaten (z.B. Ozeanbodentopographie interpoliert auf das irreguläre Gitter und Werte von Gezeitenmodellen) in das Archiv aufgenommen. Die gegenseitige Abhängigkeit der Daten und Modelle ist in jeweils einem Metadatenfile dokumentiert. Als Metadateneditor wird das frei verfügbare Programm „CatMDEdit“ eingesetzt.

Neue Schlüssel zu polaren Klimaarchiven

Das Hauptziel des Aufwuchsprogramms “New Keys for Polar Climate Archives” (NEW KEYS) ist die Quantifizierung von in Eisbohrkernen archivierten Veränderungen biogeochemischer Kreisläufe mit Hilfe neuer analytischer Methoden und Modelle. Dies um-

effects on the (isotopic) record in air enclosures in polar ice cores. These studies were able to show for the first time that the vertical stratification of the firn has a major effect on the bubble close off depth and thus also on the age of air enclosed. This effect has to be considered in improved firnification models. The isotopic characterization of CO₂, CH₄ and N₂O in bubble enclosures provides important constraints on the processes leading to observed glacial/interglacial changes in these greenhouse gases. To this end, new extraction and gas chromatography/mass spectrometry techniques have been developed, which have been transferred into routine operation after introducing our new mass spectrometer facilities in summer 2005. Again characterization of the composition of rare earth elements in mineral dust using inductively coupled plasma mass spectrometry represents a key to identify possible source areas for aeolian dust transport to the Antarctic ice sheet.

The most important highlight has been the reconstruction of new CO₂ ice core records from the EPICA Dome C ice core in a Swiss, French, German cooperation and the quantitative explanation of these changes using our global carbon cycle model BICYCLE. The CO₂ records have been extended back in time to the interval 420-650,000 years before present, i.e. about 200,000 years more compared to the previous Vostok ice core. The most important feature in this time interval is the significantly lower interglacial CO₂ concentration compared to the following five interglacials. The lower CO₂ levels are in line with cooler temperatures at those times, supporting a close and temporally stable link of Southern Ocean temperature and atmospheric CO₂ over the last 650,000 years. Detailed investigation of the phase

fasst (isotopische) Studien an Treibhausgasen, Multi-elementanalysen an Mineralstaub und anderen Aerosolkomponenten sowie die Modellierung des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Weiterhin werden Prozessstudien, wie z.B. 3D-Computertomographie Untersuchungen der Firnifikation durchgeführt, um systematische Effekte auf die (isotopischen) Zeitreihen in Lufteinschlüssen polarer Eiskerne besser zu quantifizieren. Diese Untersuchungen zeigten z.B. erstmals einen signifikanten Einfluss der vertikalen Stratifizierung des Firns auf die Tiefe des Gaseinschlusses und somit auch auf das Alter der eingeschlossenen Luft. Dieser Effekt muss in verbesserten Firnifikationsmodellen berücksichtigt werden. Die isotopische Charakterisierung von CO_2 , CH_4 und N_2O in Lufteinschlüssen liefert wichtige Informationen für die Identifizierung der Prozesse, die zu Glazial/Interglazial Änderungen dieser Treibhausgase führen. Dazu wurden neue Extraktions- und Gaschromatographie/Massenspektrometrie Methoden entwickelt. Diese wurden in den Routinebetrieb überführt, nachdem ein neues Massenspektrometerlabor im Sommer 2005 eingeweiht werden konnte. Die Charakterisierung der Zusammensetzung der seltenen Erden in Mineralstaubaerosol in Eisbohrkernen mithilfe induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie ist wiederum ein Schlüssel, um mögliche Quellregionen für den aeolischen Staubtransport in die Antarktis besser zu differenzieren.

Einer der Höhepunkte war die Rekonstruktion neuer CO_2 Zeitreihen am EPICA Dome C Eiskern in einer schweizerisch-französisch-deutschen Kooperation und deren quantitative Interpretation mit Hilfe unseres globalen Kohlenstoffkreislauf Modells BICYCLE. Die CO_2 Zeitreihen wurden über das Zeitintervall

relationship between temperature and CO_2 shows that glacial/interglacial changes in atmospheric CO_2 are primarily controlled by temperature changes and only in return lead to a global greenhouse feedback. Reduced interglacial CO_2 concentrations have been also convincingly predicted by our transient carbon cycle model BICYCLE. Those results had been presented in the so called EPICA challenge, where modelers and experimental paleoclimatologists were challenged by the EPICA community to predict CO_2 changes for those subdued early glacial cycles before publication of the measured CO_2 data. Our model studies show that only a combination of processes acting at different times during a glacial/interglacial transition are able to quantitatively explain the observed changes. Southern Ocean mixing and carbonate dissolution/sedimentation in the deep ocean represent the primary factors contributing to the 80-100 ppmv change in atmospheric CO_2 while an aeolian dust induced iron fertilization of the Southern Ocean marine export production is of secondary importance only.

420 - 650 000 Jahre vor heute erweitert, das sind ca. 200 000 Jahre mehr, als bisher vom Vostok Eiskern bekannt. Die wichtigste Eigenschaft dieses erweiterten Zeitraums sind die signifikant niedrigeren interglazialen CO_2 Konzentrationen im Vergleich zu den darauf folgenden fünf Warmzeiten. Diese erniedrigten CO_2 Konzentrationen sind im Einklang mit tieferen Temperaturen zu diesen Zeiten und unterstützen eine enge und zeitlich konstante Beziehung zwischen den Temperaturen des Südozeans und der atmosphärischen CO_2 Konzentration über die letzten 650 000 Jahre. Eine detaillierte Untersuchung der Phasenbeziehung zwischen Temperatur und CO_2 zeigt, dass die Glazial/Interglazial Änderungen der CO_2 Konzentration primär von der Temperatur

kontrolliert werden und CO_2 nur sekundär zu einer Treibhausrückkopplung führt. Reduzierte interglaziale CO_2 Konzentrationen konnten auch überzeugend von unserem Modell BICYCLE prognostiziert werden. Diese Ergebnisse wurden in der so genannten „EPICA challenge“ präsentiert, in der Modellierer und experimentelle Paläoklimatologen aufgefordert waren, die CO_2 Änderungen dieser gedämpften glazialen Zyklen vorherzusagen, solange die CO_2 Messdaten noch nicht zur Verfügung stehen. Unsere Modellstudien zeigten, dass nur eine Kombination von Prozessen, die zu unterschiedlichen Zeiten während der Glazial/Interglazial Übergänge wirken, in der Lage ist, die beobachteten Änderungen quantitativ zu erklären. Der vertikale Austausch im Südozean sowie die Karbonat Lösung/Sedimentation im tiefen Ozean stellen die primären Faktoren dar, die zu der 80 - 100 ppmv Änderung in CO_2 beitragen. Eine Eisendüngung der Exportproduktion des Südozeans durch aeolischen Staubeintrag im Glazial ist dagegen nur von sekundärer Bedeutung.

Petit, J. R., J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pepin, C. Ritz, E. Saltzman, and M. Stievenard (1999), Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature*, 399, 429-436.

Siegenthaler, U., T. F. Stocker, E. Monnin, D. Lüthi, J. Schwander, B. Stauffer, D. Raynaud, J.-M. Barnola, H. Fischer, V. Masson-Delmotte, and J. Jouzel (2005), Stable carbon cycle-climate relationship during the late Pleistocene, *Science*, 310, 1313-1317.

Abb. 1: Modellierung/Prognose der CO_2 Änderungen im Verlauf der letzten 740 000 Jahre. Neben den CO_2 Ergebnissen des BICYCLE Standard-Modelllaufs (blaue Linie) sind Vergleichsdaten des Vostok Eiskerns [Petit et al., 1999] (orange) und Dome C [Siegenthaler et al., 2005] (rot) dargestellt.

Fig. 1: Modeling/prediction of the CO_2 changes during the last 740,000 years. As well as the results of our BICYCLE standard model run (blue line) measured ice core data from the Vostok ice core [Petit et al., 1999] (orange) and the Dome C ice core [Siegenthaler et al., 2005] (rot) are plotted.

