

Zuwendungsempfänger:
Dr. Jens Schröter, Prof. Dr. Dirk Olbers, AWI Bremerhaven
Prof. Dr. Claus Böning, Prof. Dr. Jürgen Willebrand, IFM-GEOMAR Kiel

FÖRDERKENNZEICHEN: 03F0377A/B
TP B1-1

VORHABENBEZEICHNUNG: DEKADISCHE SCHWANKUNGEN DER THERMOHALINEN
ZIRKULATION IM ATLANTIK: MODELL-DATEN-SYNTHESE

Laufzeit des Vorhabens: 1.6.2002 - 31.08.2005
Schlussbericht

Autoren des Berichts: Claus Böning, Jens Schröter und Arne Biastoch

1. Aufgabenstellung, Planung, Ablauf

1.1 Aufgabenstellung

Ziel dieses Projektes war die modellgestützte Synthese von Daten aus verschiedenen Feldprogrammen zur dynamisch konsistenten Beschreibung der großräumigen Zirkulation und ihrer interannualen bis dekadischen Schwankungen. Die langperiodischen Schwankungen, die in verschiedenen Aspekten der nordatlantischen Zirkulation beobachtet wurden, sind dabei eng mit Änderungen der Flüsse an der Grenzfläche Atmosphäre-Ozean verknüpft, wie zum Beispiel der Nordatlantischen Oszillation.

Grundlage dieser Synthese bildeten verschiedene prognostische und assimilierende Studien, die in verschiedenen, komplementären Ozeanmodellen durchgeführt wurden. Beide dabei verwendeten Schemata unterscheiden sich in ihrem numerischen Aufwand: Der Kalman Filter, weiterentwickelt und implementiert am AWI, ist ein statistisch optimales Verfahren und rechentechnisch sehr aufwändig. Wesentlich einfacher, und deshalb auch in Modellen höherer Auflösung verfügbar, ist die Reinitialisierungsmethode, die schon im DYNAMO Projekt erfolgreich zur Darstellung mesoskaliger Strukturen verwendet wurde (Killworth et al., 2001). Diese Methode wurde am IFM-GEOMAR implementiert und getestet.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Mit Beginn des Projektes wurde die Kieler Modellbasis vom FLAME Modell auf das OPA-Modell (Madec, 1999) umgestellt, um in Zusammenarbeit mit französischen Gruppen (LODYC, Paris; IFREMER, Brest; LEGI, Grenoble; LEGOS, Toulouse) Zugriff auf neuere Modellentwicklungen zu haben und Synergien im Bereich der Modellentwicklung und des -betriebes zu nutzen. Diese Umstellung, die schließlich auch das Einbeziehen von Frischwassereffekten auf die großskalige Zirkulation ermöglichte, bildete einen zeitlichen Schwerpunkt des Vorhabens.

Zu Beginn des Projektes wurde am AWI das PDAF (Parallel Data Assimilation Framework)

entwickelt, mit dem es möglich ist, verschiedene Filtertypen (Ensemble Kalman, SEIK, SEEK) in Verbindung mit einem beliebigen Ozeanmodell zu verwenden. Die modellunabhängige Entwicklung des PDAF erleichtert seine Anwendung in der Datenassimilation. Es kann mit dem gleichen geringen Aufwand sowohl in Verbindung mit dem OPA Modell wie auch mit dem FEOM (Finite Element Ocean Model), das am AWI entwickelt wurde, benutzt werden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Am IFM-GEOMAR wurde in enger Kollaboration mit den französischen Kollegen eine globale Ozean-Eis Konfiguration mit $\frac{1}{2}^\circ$ Auflösung und 46 vertikalen Schichten auf Basis von der neuen OPA-Version 9 aufgesetzt (ORCA05). Ein Modell dieser Auflösung bietet zum einen den Vorteil, dass es sich noch ökonomisch über den geforderten Zeitraum von mehrerer Dekaden rechnen lässt, zum anderen sowohl mit als auch ohne mesoskalige Wirbel integrieren lässt (ja nach Ein- oder Ausschalten der GM Wirbelparametrisierung (Gent und McWilliams, 1990)). Neben dem Aufsetzen dieser Modellkonfiguration wurde in Zusammenarbeit mit Dr. Rene Redler, Fa. C&C, NEC Europe, die Assimilierung nach Oschlies und Willebrand (1996) in das OPA-Modell portiert. Nach Interpolation der Satellitendaten (TP/ERS-1 von AVISO) auf das tripolare Modellgitter mit Hilfe des OASIS-Kopplers (in Zusammenarbeit mit der Gruppe M&D, DKRZ) wurden erste Tests über jeweils einen Zeitraum von einem Jahr vollzogen, wobei objektiv interpolierte 10-Tages Karten inklusive der Fehlerinformation in den Bereichen $10-65^\circ$ N/S assimiliert wurden. In diesen Tests zeigte sich, dass eine sinnvolle Assimilierung von Altimeterdaten nur in einer späteren, wirbelauflösenden Modellkonfiguration sinnvoll ist.

Für Untersuchungen zum meridionalen Umwälzbewegung ist es wichtig, dass gerade die Frischwasserflüsse, mit denen angetrieben wird, realistisch und gut ausbalanciert sind. Zu diesem Zweck wurde der CORE („Coordinated Reference Experiments“) Datensatz in das Modellsystem implementiert. Dieser basiert auf dem gängigen NCEP/NCAR Reanalysedatensatz, der allerdings mit unabhängigen Beobachtungen korrigiert und global balanciert wurde. Nach erfolgreichem Spinup mit ORCA05 mit stabiler meridionaler Umwälzbewegung wurden mehrere Läufe mit interannuaalem Antrieb (1958-2000) durchgeführt. Zur Untersuchung des relativen Einflusses der Antriebskomponenten (Wind, Wärme- und Frischwasserflüsse) wurden diese dabei selektiv klimatologisch oder interannual vorgeschrieben, teilweise auch regional begrenzt.

Am AWI wurde das PDAF erfolgreich implementiert und getestet. Dazu wurden mit der Nordatlantikversion des FEOM Zwillingsexperimente durchgeführt, wobei Ensemble mit bis zu 32 Trajektorien verwendet wurden (Nerger et al. 2005c). Die Arbeiten an der Verbesserung des FEOM wurden weitergeführt. Dies mündete schliesslich in einer Basisversion des Modells mit einer Formulierung in Tetrahedern. Außerdem wurde eine stationäre, inverse Version des FEOM entwickelt (Sidorenko et al. 2006), die in der Analyse der Variabilität der Nordatlantischen Zirkulation Verwendung fand, die auf der Basis der neun Pentaden der Lozier et al. (1995) Daten bestimmt wurde.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

FLAME: hochauflösendes Modell, das in einigen Code-Aspekten nicht mehr dem neuesten Stand der Modellierung (z.B. Advektionsverfahren, partial cells) entsprach sowie keine Frischwasserflüsse, kein Eismodell beinhaltete und regional beschränkt was (d.h. MOC stark durch Randbedingungen vorgegeben). Daher Übergang zu einem globalen Modell (ORCA05), basierend auf dem aktuellen OPA9-Code.

FEOM: der dynamische Kern des Modells war verfügbar, benötigte aber noch verschiedenste

Verbesserungen, um die numerische Effizienz zu erhöhen.

PDAF: stand zu Beginn des Projektes nicht zur Verfügung, was die Anwendung verschiedener Filtertypen (Ensemble Kalman, SEIK, SEEK) schwierig machte, da in jedem Einzelfall Modifikationen am Modellcode notwendig wurden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Begleitet wurde das Vorhaben durch eine enge Kooperation auf wissenschaftlicher und technischer Basis im Rahmen des französisch-deutschen Modellierverbundes DRAKKAR. Dieses sind im Wesentlichen die Gruppen am LODYC (Paris), IFREMER (Brest), LEGI (Grenoble) und MERCATOR (Toulouse). Innerhalb von DRAKKAR wurde nicht nur an einem gemeinsamen Code gearbeitet, sondern auch in enger Abstimmung eine Hierarchie von Modellkonfigurationen entwickelt und systematischen Parameterstudien unterworfen. ORCA05 ist eine solche Gemeinschaftskonfiguration.

2 Ergebnisse, Nutzen und Fortschritte

2.1 Erzielte Ergebnisse

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Das globale Ozean-Meereismodell ORCA05 wurde in einer Reihe von Experimenten mit dem CORE Forcing angetrieben. Eine Schwierigkeit bestand zunächst, mit Hilfe des Zusammenspiels der Frischwasserkomponenten (Flusseintrag, Eisparametrisierungen, Salzgehaltsrestoring) einen stabilen Zustand unter klimatologischen Bedingungen zu erreichen (s. Zwischenbericht 2005). Anschließend wurde das Modell mit variablen Antriebsdaten des Zeitraumes 1958-2000 angetrieben um die zwischenjährliche und dekadische Variabilität der Umwälzbewegung zu untersuchen. Dabei zeigte sich zunächst, dass das ORCA-Modell ein grundsätzlich ähnliches, dekadisches Verhalten wie die bisher verwendete FLAME-Hierarchie aufweist (**Abbildung 1 links**), interannuale Variationen aber wegen des in FLAME nicht vorhandenen expliziten Frischwasserflusses und der regionalen Begrenzung voneinander abweichen können. Dennoch kann man davon ausgehen, dass vor allem die Variabilität der Umwälzbewegung eine robuste Größe über Modellarchitekturen hinweg darstellt.

Die Variabilität der MOC (**Abbildung 1 rechts**) zeigt für den komplett interannual angetriebenen Lauf Schwankungen im Bereich 1-2 Sv von Jahr zu Jahr. Auf dekadischer Zeitskala ist deutlich ein Trend hin zu größerem Overturning ab Mitte der 80er Jahre zu erkennen, mit einer leichten Abnahme in der zweiten Hälfte der 90er Jahre. Mit Hilfe der Zerlegung in die einzelnen Antriebskomponenten lässt sich feststellen, dass vor allem die dekadische Variation ein Ausdruck der thermohalinen Antriebes ist, der das Overturning mit erhöhter Tiefenwasserbildung bestimmt. Der Wind maskiert dabei das Signal mit interannualer Variabilität.

Mit Hilfe des PDAF und einer Nordatlantikversion des FEOM wurde eine Reihe von Zwillingsexperimenten durchgeführt, in denen versucht wurde, die Nordatlantische Zirkulation mit Hilfe der Data-assimilation zu verbessern. Dabei erwies sich die Brauchbarkeit vor allem des SEIK Filteralgorithmus. Ein wesentlicher Teil der Verbesserungen wird dadurch erreicht, dass die

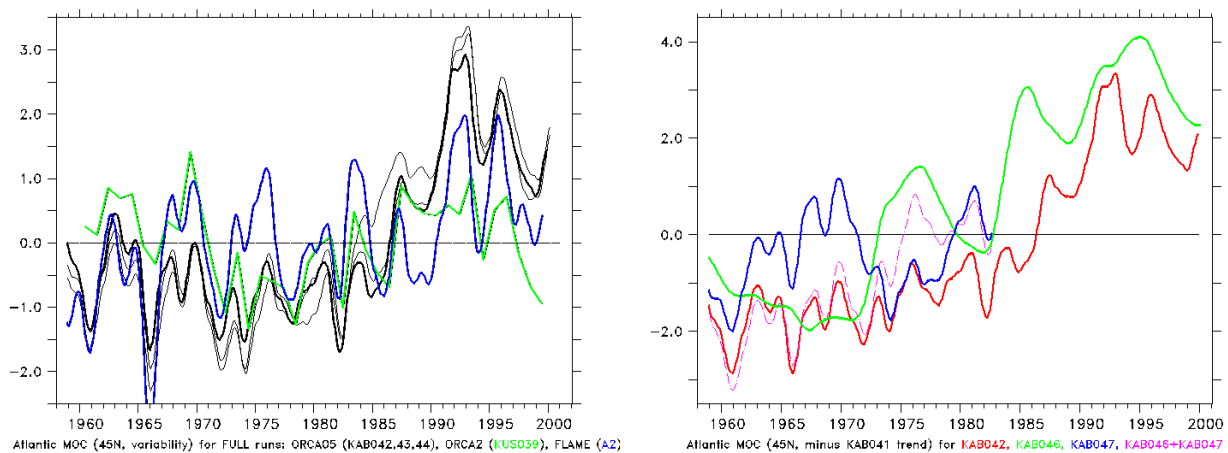


Abbildung 1: Stärke der meridionalen Umwälzbewegung bei 45°N in ORCA05. Links: Vergleich von ORCA05, ORCA2 und FLAME. Rechts: Vergleich von komplett interannual angetriebenem ORCA05 (KAB042), klimatologischem Wind und interannualen thermohalinen Flüssen (KAB046) und interannualen Wind und klimatologischen thermohalinen Flüssen (KAB047)

Assimilation dazu tendiert Trends zu eliminieren, die sich aus den Ungenauigkeiten eines Modells ergeben. Dieses Ergebnis eröffnet Perspektiven für die weiteren Untersuchungen der Trends in der Nordatlantischen Zirkulation, die sich aus den verfügbaren Messungen der Oberflächenauslenkung (aus Satellitenaltimetrie) und aus Oberflächentemperaturen ergeben (Nerger et al. 2005c)

Variabilität des Nordatlantik abgeleitet aus den Lozier et al. (1995) Daten:

Die stationäre, inverse Version des FEOM wurde für den Nordatlantik zwischen 7 und 80 Grad Nord eingerichtet (Sidorenko et al. 2006). Diese wurden auf die neun Pentaden (von 1950 bis 1994) der Lozier et al. (1995) Klimatologie angewandt. Für jede Pentade wurde eine Lösung gefunden mit einem Dichtefeld (potentielle Dichte), das nahe an den Daten liegt, das den dynamischen und der Kontinuitätsgleichung genügt und das nur geringe Residuen in der Dichte Advektions-Diffusionsgleichung aufweist. Da die ersten beiden Pentaden nicht so verlässlich sind wie die letzten, werden hier nur Ergebnisse präsentiert, die auf den Lösungen für die letzten sieben Pentaden basieren. Der in den Analysen benutzte NAO Index ist ein über fünf Jahre gemittelter Winterindex, dabei ist der Mittelungszeitraum gegenüber den Pentaden von Losier teilweise negativ verschoben.

Die linke Grafik in **Abbildung 2** zeigt die normalisierte Variabilität der 'meridional overturning circulation' (MOC) zusammen mit dem NAO Index (für verschiedene zeitliche Verschiebungen). Die rechte Graphik gibt den Korrelationskoeffizienten zwischen MOC und NAO an, abhängig von der zeitlichen Verzögerung. Die Korrelationen sind signifikant und lassen den Schluss zu, das ein wesentlicher Teil der Variabilität in der MOC, die aus den Lösungen für die Pentaden abgeleitet werden kann, mit Änderungen im NAO in Verbindung gebracht werden kann.

Einen klareren Zusammenhang mit dem NAO Index findet man, wenn man die SVD Zerlegung (singular value decomposition) der Matrix betrachtet, die aus den sieben Lösungen für die barotrope Stromfunktion besteht. Die obere rechte Grafik in **Abbildung 3** zeigt die Korrelation dem NAO Index und der zeitlichen Variabilität der EOF's, die am höchsten für die erste Mode ist bei einer Verzögerung des Index von einem Jahr. Die Grafik oben links gibt die zugehörige erklärte Varianz der einzelnen EOF's wieder, die für die erste Mode am höchsten ist. Die unteren Bilder zeigen zum

einen die Projektion der barotropen Stromfunktion auf das zeitliche Verhalten der ersten EOF sowie die räumliche Struktur der ersten EOF selbst (beides in relativen Einheiten). Beide stimmen sehr gut überein.

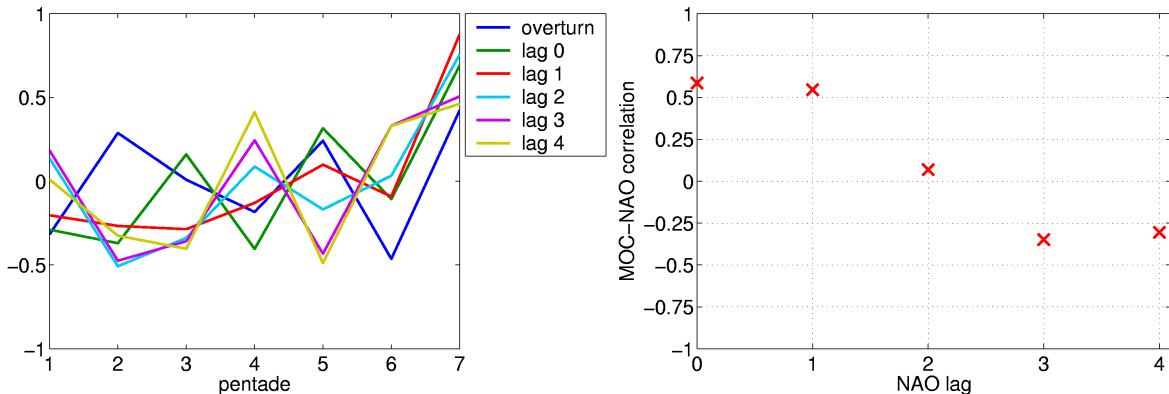


Abbildung 2: links: Variabilität der meridionalen Umwälzbewegung (normalisiert) und verzögerter NAO Index (gemittelt über 5-Jahres Intervalle, normalisiert). rechts: Korrelation zwischen NAO und MOC als Funktion der Verzögerungsjahre

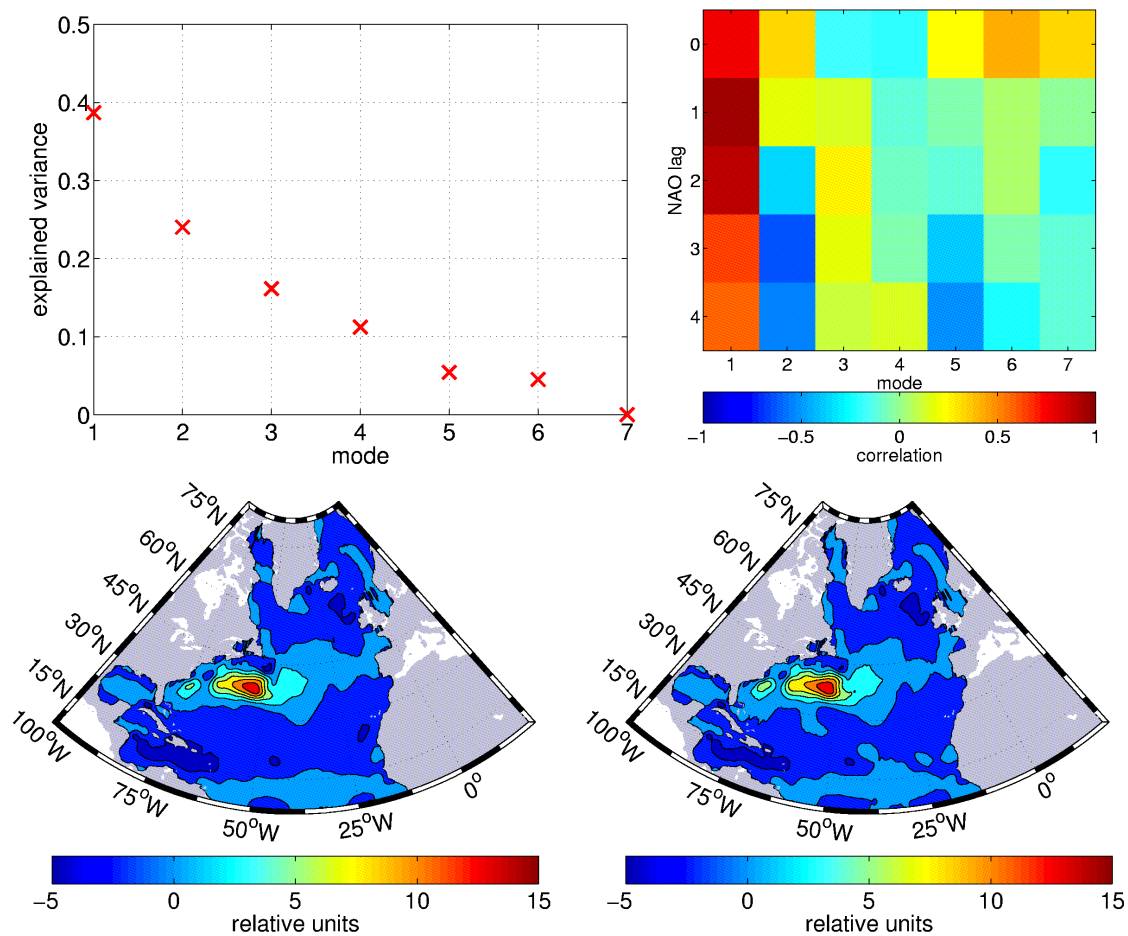


Abbildung 3: obere Reihe: Aufgeklärte Varianz der barotropen Stromfunktion als Funktion der EOF (links); der Korrelationskoeffizient zwischen EOF und NAO als Funktion der verschobenen Jahre (rechts). unten: Projektion der barotropen Stromfunktion auf das zeitliche Verhalten der 1. EOF und der Muster, die mit der 1. EOS assoziiert sind (beide in relativen Einheiten).

Aus dieser Analyse kann man schließen, das die erste EOF der Variabilität der Zirkulation, die aus den Lozier Daten bestimmt wurde, für den vertikal integrierten horizontalen Transport klar mit dem NAO Index korreliert ist, während die Korrelation zwischen MOC und NAO, obwohl signifikant, doch geringer ist.

2.2 Vorrausichtlicher Nutzen

Bei dem Vorhaben ging es um Grundlagenforschung zu den Schwankungen und Mechanismen der thermohalinen Zirkulation. Direkte wirtschaftliche Erfolge und Erfindungen sind daher nicht zu erwarten, wohl aber Konsequenzen auf längeren Zeitskalen. Die Arbeiten haben und werden zum Verständnis des globale Klima spielen. Der wesentliche Gewinn aus den Ergebnissen dieses Projekts wird daher neben einer verbesserter Erkenntnis der Mechanismen in der Verbesserung des Verstehens von gekoppelten Modellen liegen.

2.3 Fortschritte auf dem Gebiet von anderen Stellen

Mehrere internationale Gruppen führen ähnliche Untersuchungen durch, deren Ergebnisse einen Einfluss auf das Vorhaben haben konnten. Es bestand ein kontinuierlicher Austausch, vor alle Gemeinsame Veröffentlichungen sind zu erwarten.

2.4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Barnier, B., G. Madec, T. Penduff, J.-M. Molines, A.-M. Treguier, A. Beckmann, A. Biastoch, C. Böning, J. Dengg, S. Gulev, J. Le Sommer, E. Remy, C. Talandier, S. Theetten, M. Maltrud, 2005: Recent progress in modelling the global ocean circulation at eddy permitting resolution, submitted to *Ocean Dynamics*

Biastoch, A., J. Getzlaff, and C. Böning, 2006: Interannual to decadal dariability in the meridional overturning circulation of the North Atlantic Ocean, in preparation

Böning, C.W. and J. Kröger, 2005. Seasonal variability of deep currents in the equatorial Atlantic: a model study. Deep-Sea Research I, 52, 99-121.

Danilov, S., Kivman, G. and Schröter, J. Evaluation of an eddy-permitting finite-element ocean model in the North Atlantic. *Ocean Modelling*, 10, 35--49 (2005).

Getzlaff, J., C. W. Böning, C. Eden, and A. Biastoch, 2005: Signal propagation in the North Atlantic overturning, *Geophys. Res. Letters*, **32**, doi:10.1029/2004GL021002

Hüttl, S., and C. Böning (2005): Mechanisms of decadal variability in the shallow subtropical-tropical circulation of the Atlantic Ocean: a model study. Submitted to *Journal of Geophysical Research*.

Latif, M., C. Böning, J. Willebrand, A. Biastoch, J. Dengg, N. Keenlyside, and U. Schweckendiek, 2005: Is the thermohaline circulation changing?, *J. Climate*, in press

Nerger, L.(2004). Parallel Filter Algorithms for Data Assimilation in Oceanography, http://elib.suub.uni-bremen.de/publications/dissertations/E-Diss804_nerger_orig.pdf, Universität Bremen.

Nerger, L., Hiller, W., Schröter, J.(2005)a. A Comparison of Error Subspace Kalman Filters, Tellus A, in press.

Nerger, L., Hiller, W., Schröter, J.(2005b). PDAF - The Parallel Data Assimilation Framework: Experiences with Kalman Filtering, Proceedings of the 11. ECMWF Workshop on Use of High Performance Computing in Meteorology, Reading, UK, October 25-29, 2005.

Nerger, L., Danilov, S., Hiller, W., Schröter, J. (2005c) Using sea level data to constrain a finite-element primitive-equation ocean model with a local SEIK filter, Ocean Dynamics, submitted

Nerger, L., Danilov, S., Kivman, G., Hiller, W., Schröter, J.(2004). Data Assimilation with the Ensemble Kalman Filter and the SEIK Filter applied to a Finite Element Model of the North Atlantic, J. mar. syst., submitted

Sidorenko D.V. (2005) The North Atlantic circulation derived from inverse models, http://elib.suub.uni-bremen.de/publications/dissertations/E-Diss1202_sidorenko.pdf, Universität Bremen.

Sidorenko, D., Danilov, S., Kivman, G. , and Schröter, J. On the use of a deep pressure gradient constraint for estimating the steady state ocean circulation from hydrographic data. Geoph. Res. Let., DOI: 10.1029/2005GL024716

3.Erfolgskontrollbericht

(siehe Extraseite)