

# Schlussbericht

für ein Einzelvorhaben im Rahmen des Verbundprojekts

**REaldatenAnaLyse GOCE (REAL-GOCE)**

innerhalb des vom BMBF geförderten Sonderprogramms  
Geotechnologien,

Thema 2: “Beobachtung des Systems Erde aus dem Weltraum“

Zuwendungsempfänger:

Universität Hamburg, Institut für Meereskunde (IfM)

Förderkennzeichen:

03G0726B

Vorhabenbezeichnung:

Der zeitliche Mittelwert der Ozeanzirkulation und das ozeanische Geoid

Laufzeit des Vorhabens:

01.06.2009 bis 31.05.2012

Berichtszeitraum:

01.06.2009 bis 31.05.2012

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Arbeitspaketes WP220 war die Nutzung von Ergebnissen aus einem numerischen Ozean-Zirkulationsmodell in Kombination mit den vorhandenen ozeanischen, atmosphärischen Datensätzen und vor allem dem neuen zeitlich gemittelten GOCE-Geoid und seine Fehler-Kovarianz, um quantitativ die zeitlich gemittelte Ozean-Zirkulation und seine zeitlich gemittelten Transporteigenschaften zu prüfen. Diese Arbeit bezog sich auf und kooperierte mit mehreren anderen Arbeitspaketen innerhalb des REAL-GOCE-Programms. Sie lieferte insgesamt neue, einzigartige Aspekte des Geotechnologie-Programms. Insbesondere benötigte sie als Input die bestmöglichen GOCE Geoid- Lösungen und ihre Fehler-Kovarianzen. Im Gegenzug bot sie eine Konsistenzprüfung des Geoids und seiner Fehlerlösung und liefert eine unabhängige Geoid-Schätzung, die im Einklang mit Ozeandaten und einem Ozeanmodell steht. Ziel war es, zu untersuchen, in welchem Umfang die GOCE-Lösung zur Verbesserung der Schätzungen der Ozeanzirkulation in der Lage ist und gleichzeitig, in welchem Umfang die geschätzte Zirkulation im Einklang mit der GOCE-Lösung und ihrer vorherigen Fehlerinformation steht. Der Ansatz der WP220 war, das zeitlich gemittelte GOCE Geoid-Feld zusammen mit Satelliten-Altimetrie und anderen Ozean- und Satellitendaten in das globale GECCO zu assimilieren. Die Ergebnisse des Modells wurden verwendet, um die mittlere dynamische Meeresoberflächenhöhe, die in Einklang mit Ozeandaten und der Dynamik steht, bestmöglich zu schätzen. Modell-Daten-Residuen wurden verwendet, um Unstimmigkeiten zwischen dem GOCE Geoid und den Ozeandaten unter Berücksichtigung von a priori Geoid- und Modellfehlern zu untersuchen. Die Einbeziehung unabhängiger Ozean- und Atmosphärendaten ermöglichte eine zusätzliche Bewertung der Qualität der modellierten mittleren Ozeanzirkulation und der verwendeten Geoidinformationen.

## 1.2 Voraussetzungen des Vorhabens am IfM

### 1.2.1 Vorhandenes wissenschaftliches Personal

Vor Projektbeginn waren am IfM die folgenden Personen angestellt, die an diesem Vorhaben aktiv mitarbeiten sollten:

1. Prof. Dr. Detlef Stammer (Lehrstuhlinhaber, Antragsteller)
2. Dr. Armin Köhl (wiss. Mitarbeiter)
3. Dr. Ulrich Körner (wiss./techn. Mitarbeiter)
4. Dr. Vanya Romanova (wiss. Mitarbeiterin)

### 1.2.2 Vorhandene Beziehungen zu anderen Projekten

### 1.2.3 Vorhandene wissenschaftliche und technische Ausstattung

Das IfM war für dieses Projekt mit ausreichenden EDV-Ressourcen ausgestattet. Dazu gehörten Datenserver, Workstations für Analysen und Grafiken und Supercomputing-Einrichtungen im Hause und im Deutschen Klimarechenzentrum DKRZ.

#### 1.2.4 Vorhandene Mittel für Sachausgaben

Laufende Kosten für die allgemeinen Ausgaben und EDV-System-Unterstützung wurden aus dem regulären Budget der beiden Gruppen am IfM bestritten.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Arbeitsplan von WP220 umfasste fünf Arbeitspakete:

- WP221: Einschließen der Geoid-Fehlerkovarianz-Matrix in das Schätzungsverfahren und Testen des neuen Modellcodes (T0 + 3 Monate).
- WP222: Bestmögliche Schätzung der zeitlich-gemittelten dynamischen mittleren Meeresoberflächenhöhe, die konsistent mit Ozeandaten und mit der in einem Ozeanzirkulationsmodell eingebetteten Dynamik ist. Untersuchung von Residuen zwischen der Schätzung und der altimetrischen mittleren SSH hinsichtlich von Abweichungen zwischen dem GOCE Geoid und vorheriger Fehlerinformationen (T0 + 9 Monate).
- WP223: Bestimmung der zeitlich gemittelten Ozeantransporte unter Verwendung von zeitlich gemittelter GOCE Geoid-Lösung und ihr Fehler-Kovarianzbereich mit unterschiedlichen 'degree-order cut off' im Geoid-Feld, um die räumlichen Skalen zu quantifizieren, die am wichtigsten für die Bestimmung der Ozeanzirkulation und deren Transporte sind (T0 + 16 Monate).
- WP224: Schätzung des ozeanischen Geoids durch die Zusammenführung der geschätzten mittleren Ozeanzirkulation mit den bestehenden zeitlich gemittelten altimetrischen SSH-Feldern und Vergleich der Ergebnisse mit dem GOCE Geoid (T0 + 26 Monate).
- Berechnung der geostrophische absolute Oberflächengeschwindigkeiten aus Tandem-Altimeterdaten unter Berücksichtigung des besten GOCE Geoidfeldes und seines horizontalen Gradienten. Vergleich der Ergebnisse mit unabhängigen zur Verfügung stehenden Informationen, z.B. aus Verankerungen im Golfstrom und Kuroshio Region.

Durch den verspäteten Start der GOCE-Mission und damit auch verzögerter Bereitstellung der GOCE-Geoidmodelle, sind einige Arbeitsschritte später als ursprünglich geplant durchgeführt worden. Die Verzögerungen hatten aber keinen Einfluss auf die erfolgreiche Erfüllung der Ziele in WP220. Für die spektrale Betrachtung des Einflusses der Assimilation der MDT in das Optimierungsverfahren (WP223) wurde aber, zur Einsparung von Ressourcen, auf die Durchführung separater Optimierungen verzichtet. Stattdessen wurden die Ergebnisse des Schätzverfahrens unter Einbeziehung des kompletten Spektrums auf ihre Sensitivität auf unterschiedlichen Längenskalen untersucht. Die im Rahmen dieses Vorhabens beantragte und genehmigte ganze wissenschaftliche Mitarbeiterstelle (Dr. Vanya Romanova) wurde zu Projektbeginn umbesetzt und war über die gesamte Dauer des Vorhabens mit Herrn Dr. Frank Siegmund besetzt.

Entsprechend der Reiseplanung haben Projektmitarbeiter des IfM an sechs REAL GOCE Projekttreffen sowie an den Geotechnologien-Statusseminaren teilgenommen:

- 1. REAL-GOCE Projekttreffen, Karlsruhe, 22.9.2009

- 2. REAL-GOCE Projekttreffen, München, 15.–16.3.2010
- 3. REAL-GOCE Projekttreffen, Stuttgart, 23.–24.9.2010
- 1. GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar, 4.10.2010
- 4. REAL-GOCE Projekttreffen, München, 30.3.2011
- 5. REAL-GOCE Projekttreffen, Stuttgart, 10.10.2011
- 2. GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar, Stuttgart, 11.10.2011
- 6. REAL GOCE Projekttreffen, Bonn, 15.3.2012
- 3. GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar, Potsdam, 24.5.2012

Präsentation der Ergebnisse aus diesem Vorhaben auf nationalen und internationalen Tagungen durch Projektmitarbeiter des IfM (mit Vortrags- bzw. Posterpräsentation):

- 4th International GOCE User Workshop, München, 31.3.-1.4.2011

## **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn**

Zu Projektbeginn lag die Software für ein Optimierungsverfahren des Ozeanzustandes unter Benutzung der adjungierten Methode (GECCO) vor. Dieses Verfahren wurde bereits für die Assimilation eines frühen GRACE Geoidmodells verwendet, allerdings unter Verwendung eines räumlich konstanten Fehlers (Stammer et al. 2007(1)).

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Neben der Zusammenarbeit mit Partnern innerhalb des Vorhabens bestand enger Kontakt auf internationaler Ebene zu Carl Wunsch, Massachusetts Institute of Technology (MIT) und Dr. Rui Ponte (VRE, Cambridge, USA) in Bezug auf Fragen zur Modellierung. Darüber hinaus hatten wir Kontakte zu Prof. Byron Tapley und Dr. Don Chambers (CSR, University of Texas, Austin) und Dr. Victor Zlotnicki und Dr. Lee-Lueng Fu (Jet Propulsion Laboratory, USA), und Prof. John Wahr (Univ. of Colorado, Boulder) in Bezug auf die Qualität der GRACE- und Altimeterdaten, die neben den GOCE Geoidmodellen wichtige Eingangsgrößen für die Optimierung des Ozeanzustandes waren.

# **2 Projektbericht**

## **2.1 Verwendung der Zuwendung und wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die im Rahmen dieses Vorhabens erhaltenen Personalmittel wurden wie geplant für eine über die gesamte Projektdauer laufende ganze wissenschaftliche Mitarbeiterstelle (besetzt mit Herrn Dr. Frank Siegismund) verwendet und beliefen sich auf EUR 179.059,05.

Die erhaltenen Reisemittel wurden für Teilnahmen an den sechs REAL GOCE Projekttreffen, den drei GEOTECHNOLOGIEN Statusseminaren und der Teilnahme am 4th International GOCE User Workshop, München, 31.3.-1.4.2011 verwendet und beliefen sich auf EUR 2.509,80.

## 2.2 Inhaltlicher Projektbericht

Die Erfüllung der Projektziele erforderte zunächst die in WP221 beschriebenen Erweiterungen der Funktionalität unseres Optimierungsverfahrens. Zwar wurde die Mittlere Dynamischen Topographie (MDT) schon in früheren Modellläufen assimiliert (Stammer et al. 2007(1)), dort aber unter der Annahme eines räumlich konstanten a priori Fehlers. In Real-GOCE sollte der Geoid-Fehler auf verschiedenen räumlichen Skalen inklusive deren Korrelation untereinander in den Optimierungsprozess einbezogen werden. Diese Verbesserung des Modells erforderte die Programmierung neuer Funktionalitäten, insbesondere die Projektion der MDT-Residuen auf Kugelflächenfunktionen und die Einbeziehung der Kovarianzmatrix für den MDT-Fehler. Diese Erweiterungen des Modells sind erfolgreich implementiert worden.

Zu Beginn des Projekts standen noch keine GOCE-Level-2 Daten für die Datenassimilation zur Verfügung. Stattdessen haben wir ein aktuelles GRACE-Geoidmodell verwendet, um zunächst Testläufe durchzuführen, die als Referenz für spätere Optimierungen dienten. Es wurde hier die Sensitivität der Optimierung bezüglich der Datenassimilation von MDT-Feldern untersucht. Insbesondere wurden folgende Fragestellungen untersucht: (1) Hat die Assimilation der MDT überhaupt Einfluss auf die durch die Datenassimilation optimierte Ozeanzirkulation? (2) Ist die assimilierte MDT konsistent mit den anderen assimilierten Daten? (3) Welchen Einfluss hat die Fehler-Kovarianz-Information auf die Optimierung? Zur Beantwortung dieser Fragen wurde eine Reihe von Optimierungen für den Zeitraum 1992–1993 durchgeführt, bei denen (1) nur die üblichen Daten, ohne die MDT, (2) die üblichen Daten sowie die MDT und (3) ausschliesslich die MDT assimiliert wurden. Außerdem wurden bei der Assimilation der MDT Läufe mit voller Fehler-Kovarianz, als auch mit ausschliesslich Fehlervarianzen durchgeführt.

Die Entwicklung der Kostenfunktion für die unterschiedlichen Läufe ist in Abb. 1 dargestellt, Beispiele für die MDT-Modell-Daten-Residuen vor und nach der Optimierung zeigt Abb. 2. Die wesentlichen Ergebnisse der Sensitivitätsstudie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Assimilation der MDT hat einen deutlichen Einfluss auf die Optimierung, insbesondere für die Modell-Daten-Residuen der MDT. Diese Residuen werden deutlich reduziert. Wird ausschließlich MDT assimiliert, kann die gemessene MDT mit hoher Genauigkeit reproduziert werden.
2. Wird die MDT zusätzlich zu den üblichen Daten assimiliert, werden die Residuen für alle Datensätze, die wesentlichen Einfluss auf die Kostenfunktion haben, reduziert. Dies bedeutet, dass die MDT, zusammen mit dem geschätzten Fehler konsistent mit den anderen assimilierten Datensätzen, deren Fehlerabschätzungen, und mit dem dynamischen Modell konsistent ist.
3. Wird nur die MDT assimiliert, wird zwar die assimilierte MDT mit hoher Genauigkeit reproduziert, die anderen Modell-Daten-Residuen verbleiben erheblich höher