

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

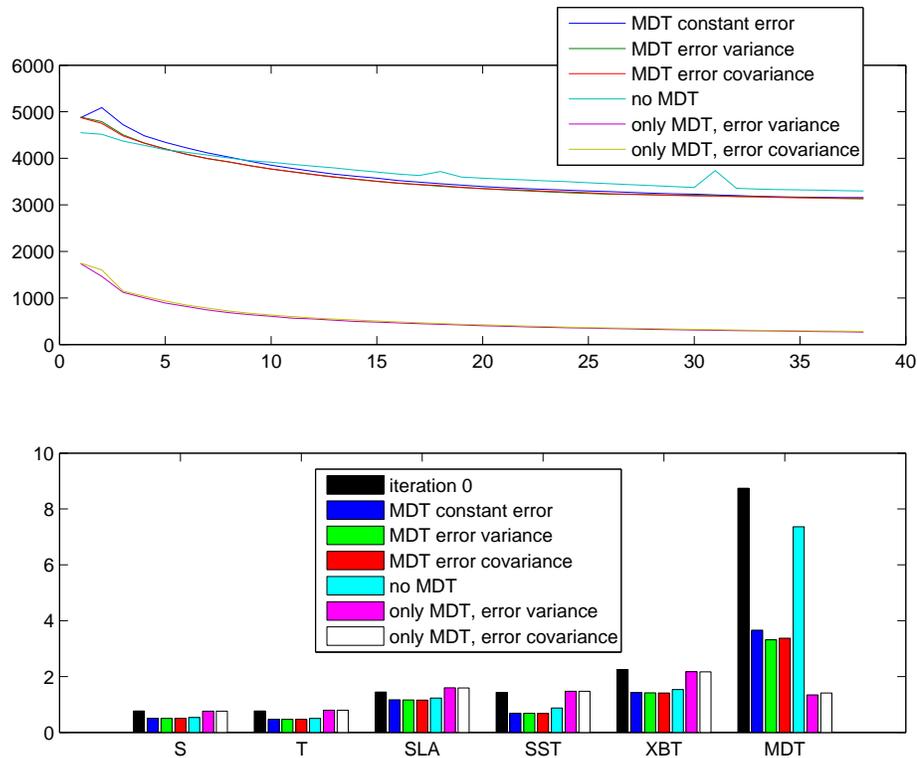


Abbildung 1: Entwicklung der (dimensionslosen) Kostenfunktion für die Modellläufe der Sensitivitätsstudie mit GECCO im Laufe von 38 Iterationsschritten (oben). Vergleich der wichtigsten Komponenten der Kostenfunktion (unten); gezeigt sind die Startwerte vor Beginn der Optimierung (Iteration 0) sowie ihre Werte nach 38 Iterationsschritten.

als bei der Einbeziehung aller üblichen Daten und sind kaum verändert gegenüber einem freien Modelllauf ohne Datenassimilation. Der Grund für die schlechte Reproduktion der gemessenen Daten ist, dass die MDT alleine nicht ausreicht, um den Ozeanzustand eindeutig zu bestimmen. Vielmehr verbleibt das System unbestimmt.

4. Der Einfluss der Kovarianz ist im wesentlichen auf Regionen mit starker zeitlicher Variabilität der Dynamischen Topography beschränkt.

Die nachfolgenden Optimierungsläufe dienten der möglichst realistischen Darstellung des Ozeanzustandes für den Zeitraum 1993-1999. Es wurden verschiedener Modellläufe durchgeführt, die sich lediglich in der Assimilation unterschiedlicher Geoiden (ITG-GRACE-2010s(2); GOCE-Geoid aus dem Direkten Verfahren, erster Release, Bruinsma et al. 2010(3); kombinierte GRACE-GOCE-Lösung: GOCO01s, Pail et al. 2010(4)) unterscheiden und mit einem Modelllauf ohne Assimilation der MDT verglichen wurden. Die Entwicklung der Kostenfunktion für diese Läufe ist in Abb. 3 dargestellt. Die Assimilation der kombinierten GOCE-GRACE-Lösung (GOCO01s) liefert die beste Optimierung im Sinne einer Minimierung der Kostenfunktion. Die Ergebnisse der Sensitivitätsstudie werden bestätigt, wenngleich für den längeren, 7-Jahres-Integrationszeitraum der Einfluss der MDT auf die Optimierung geringer ausfällt als für die kürzeren 2-Jahresläufe.

Als Ergebnis aus den Optimierungsläufen lässt sich das ozeanische Geoid (WP224) als

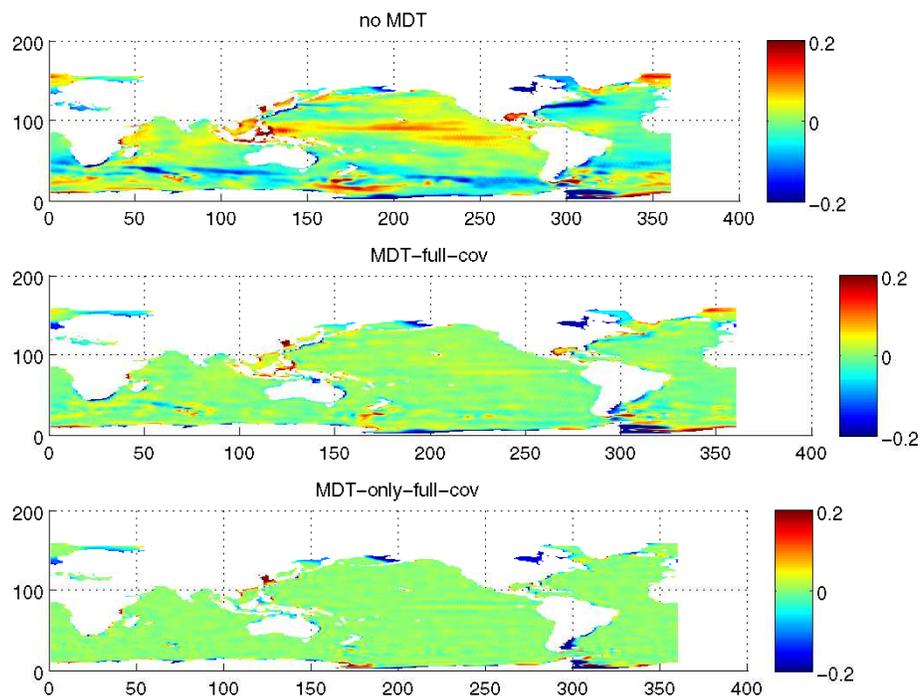


Abbildung 2: MDT-Modell-Residuen (modellierte MDT - geodetische MDT) vor der Optimierung (oben), sowie nach 38 Iterationsschritten bei entweder Assimilation üblicher Daten sowie der MDT (Mitte), oder ausschließlicher Assimilation der MDT (unten), jeweils in [m].

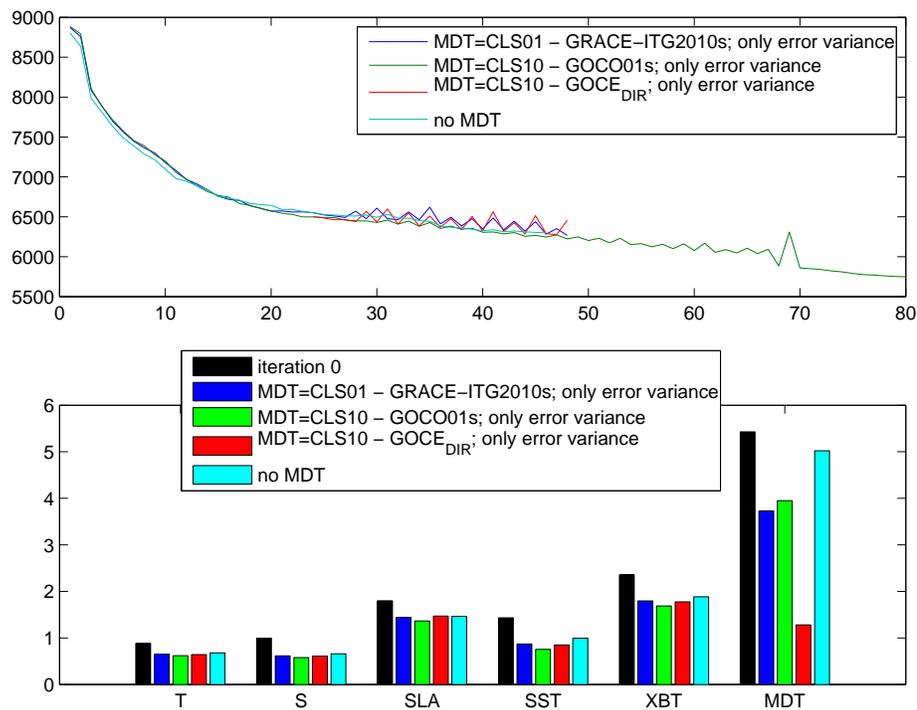


Abbildung 3: Entwicklung der (dimensionslosen) Kostenfunktion für die Optimierungsläufe mit GECCO (oben). Vergleich der wichtigsten Komponenten der Kostenfunktion (unten); gezeigt sind die Startwerte vor Beginn (Iteration 0) sowie ihre Werte nach Durchführung der Optimierung.

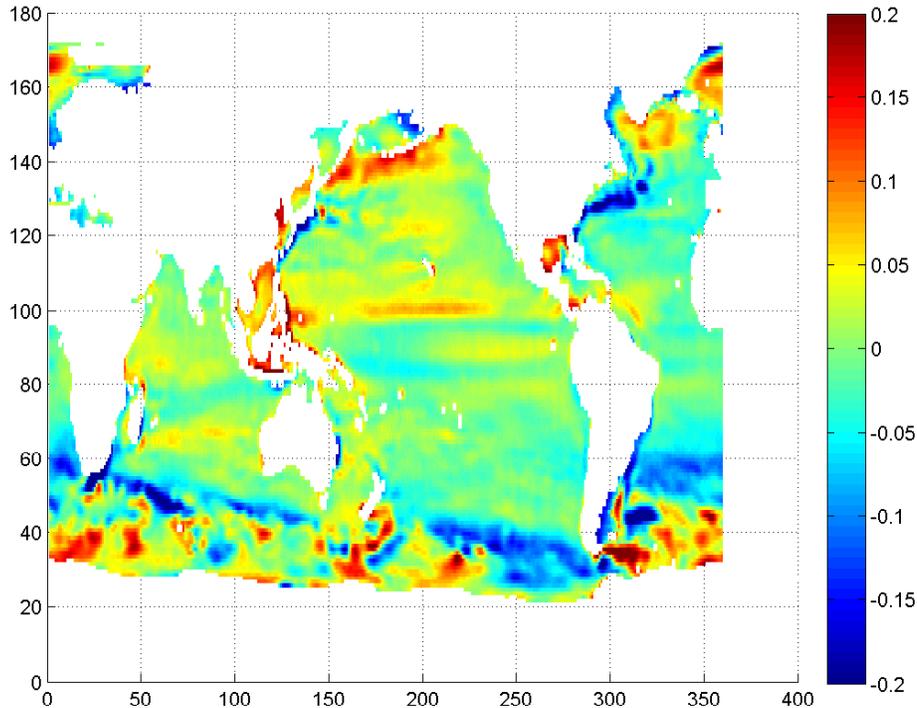


Abbildung 4: Abweichung des mit GECCO optimierten ozeanischen Geoids vom GOCO01s-Modell (GECCO – GOCO01s, in [m]).

Differenz der MSS und der modellierten MDT bestimmen. Der Vergleich mit dem bei der Modellierung verwendeten GOCO01s-Geoiden (Pail et al., 2010(4)) ergibt die in Abb. 4 gezeigten Unterschiede.

Innerhalb der zentralen Becken verbleiben die Differenzen überwiegend unterhalb von 5 cm. Grössere Unstimmigkeiten finden sich in den Westlichen Randströmen, wie dem Golfstrom und dem Kuroshio, und im Südlichen Ozean, insbesondere entlang des Antarktischen Zirkumpolarstroms (ACC). In diesen Regionen treten mesoskalige Wirbel auf. Diese Wirbel können, bedingt durch die begrenzte Gitterweite des Ozeanmodells (1°), nicht aufgelöst werden.

Eine spektrale Betrachtung der Modell-Daten-Differenz für die MDT ist in Abb. 5 dargestellt. Hier ist der Bereich südlich von 60°N ausmaskiert. Ausserdem ist ein (realistischer) Mapping-Fehler für die MSS von 4 cm angenommen. Mit dieser Fehlerannahme liegen die Abweichungen der modellierten von der beobachteten MDT im Bereich der Fehlerannahmen bis etwa d/o 80 (entsprechend 250 km) und darunter für kürzere Raumskalen. Mit dieser Einschränkung (Nichtberücksichtigung des Südlichen Ozeans) und des angenommenen Mapping-Fehlers für die MSS sind modellierte(s) und beobachtete(s) MDT (Geoid) konsistent.

Es ist zu beachten, dass aufgrund der Verwendung der MDT als Differenz von MSS und Geoid sich auf Grundlage der Ozeanmodellierung und Optimierung die Fehler im Geoiden nicht von Fehlern in der MSS unterscheiden lassen. Aus dem Vergleich von formalen Fehlern aus der Prozessierung des Geoiden und Fehlerschätzungen für die MSS ergibt sich allerdings die Annahme, dass Fehler in der geodätischen MDT auf den kurzen Skalen ($d/o > 150$) ihre Hauptquelle in den Kommissionsfehlern des Geoiden haben, aber die

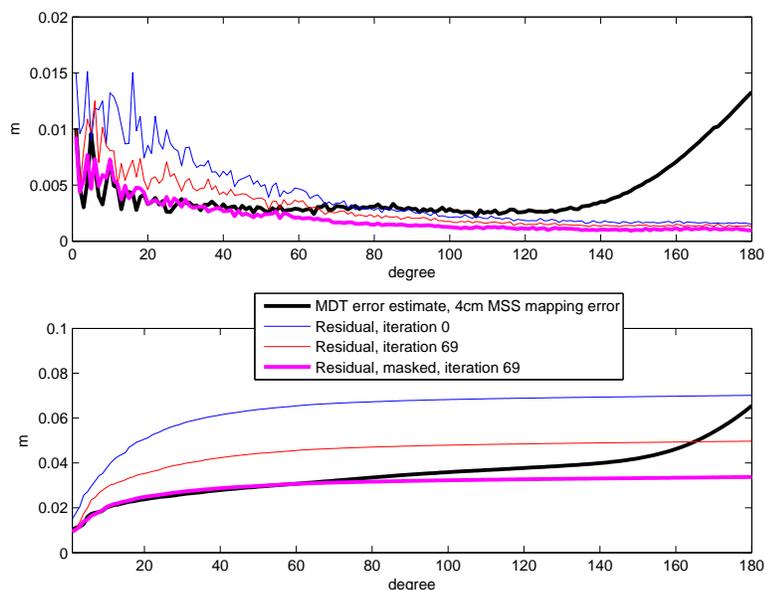


Abbildung 5: Spektraler Vergleich der Modell-Daten-Residuen für die MDT vor (blau) und nach der Optimierung (rot, pink nach Ausmaskierung) durch GECCO mit der Fehlerschätzung (schwarz). Die Residuen sind als Quadratwurzeln, der Gradvarianzen (oben, in [m]), und der kumulierten Gradvarianzen (unten, in [m]) aufgetragen. Näheres siehe Text.

Genauigkeit auf den längereren Skalen (also etwa 130 km und länger) durch Fehler in der MSS begrenzt wird. Durch die höhere Genauigkeit neuerer Geoidmodelle gewinnt also die Genauigkeit der MSS an Bedeutung, um eine MDT hoher Qualität auf allen Skalen zu gewährleisten.

Die Analyse der Optimierungsläufe wurde durch einen Vergleich mit unabhängigen Datensätzen unterstützt, um die modellierte MDT zu validieren, aber auch um den optimierten Ozeanzustand insgesamt zu bewerten (WP225). Zur Validation der MDT wurde insbesondere der umfangreiche Datensatz von Driftergeschwindigkeiten aus dem Global Drifter Program (Hansen und Poulain, 1996(5)) verwendet. Die in 15m Wassertiefe gemessenen Strömungen benötigen eine umfangreiche Korrektur zur Schätzung der zeitlich gemittelten geostrophischen Oberflächengeschwindigkeiten, insbesondere eine Abschätzung der windgetriebenen (Ekman-) Strömung, der Trägheitsschwingungen sowie der zeitlich abhängigen geostrophischen Strömung.

Der Vergleich der korrigierten Drifter-Geschwindigkeiten mit Strömungen aus der assimilierten (geodätischen) MDT sowie der modellierten MDT ergibt insbesondere für die zonale Geschwindigkeitskomponente (Abb. 6) deutliche Einflüsse durch die MDT-Assimilation. Dies ist nicht überraschend, da die zonale Komponente die Ozeanzirkulation dominiert. Für den Bereich von d/o 10 (2000 km) bis d/o 45 (450 km) wird die modellierte Strömung dichter an die Drifter-Daten heranführt, für den Fall, dass die MDT assimiliert wird. Die hohen Residuen bei allen Vergleichen mit Drifter-Daten für sehr lange Skalen (oberhalb 2000 km) deuten auf eine Nichteignung der Drifter-Daten für diese Skalen hin, auf die schon andere Autoren hingewiesen haben (s. Maximenko et al., 2009(6))

Eine ausgezeichnete Möglichkeit zur Bewertung der Optimierungsläufe ergibt sich aus dem Vergleich der berechneten Korrektur des atmosphärischen Antriebs mit unabhängigen

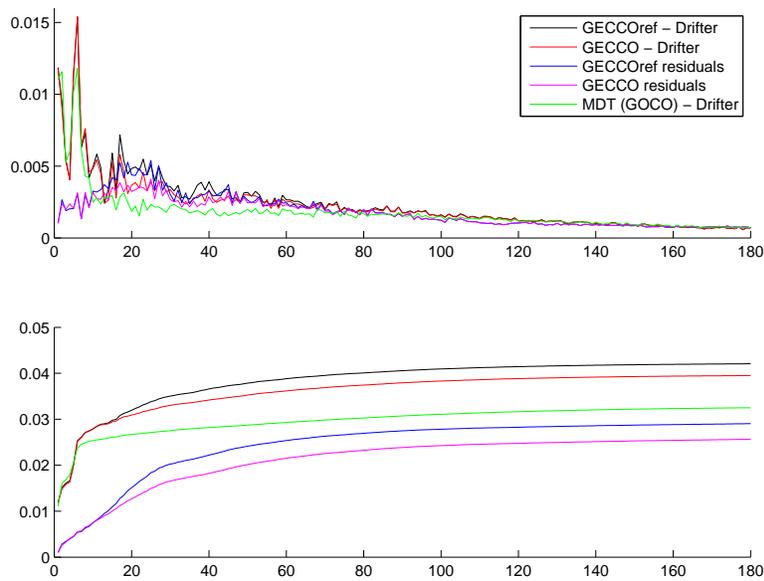


Abbildung 6: Residuen der modellierten zonalen geostrophischen Geschwindigkeit (schwarz: Referenzlauf ohne MDT, rot: Lauf mit MDT-Assimilierung) und Differenzen der modellierten Geschwindigkeiten zu korrigierten Drifter-Geschwindigkeiten (blau: Referenzlauf, violett: Lauf mit MDT-Assimilierung). Außerdem ist die Differenz der Geschwindigkeiten aus der geodätischen MDT zu den Drifter-Daten gezeigt (grün). Dargestellt ist die Quadratwurzel, aus der Gradvarianz (oben, in $[m s^{-1}]$) und aus der kumulierten Gradvarianz (unten, in $[m s^{-1}]$).

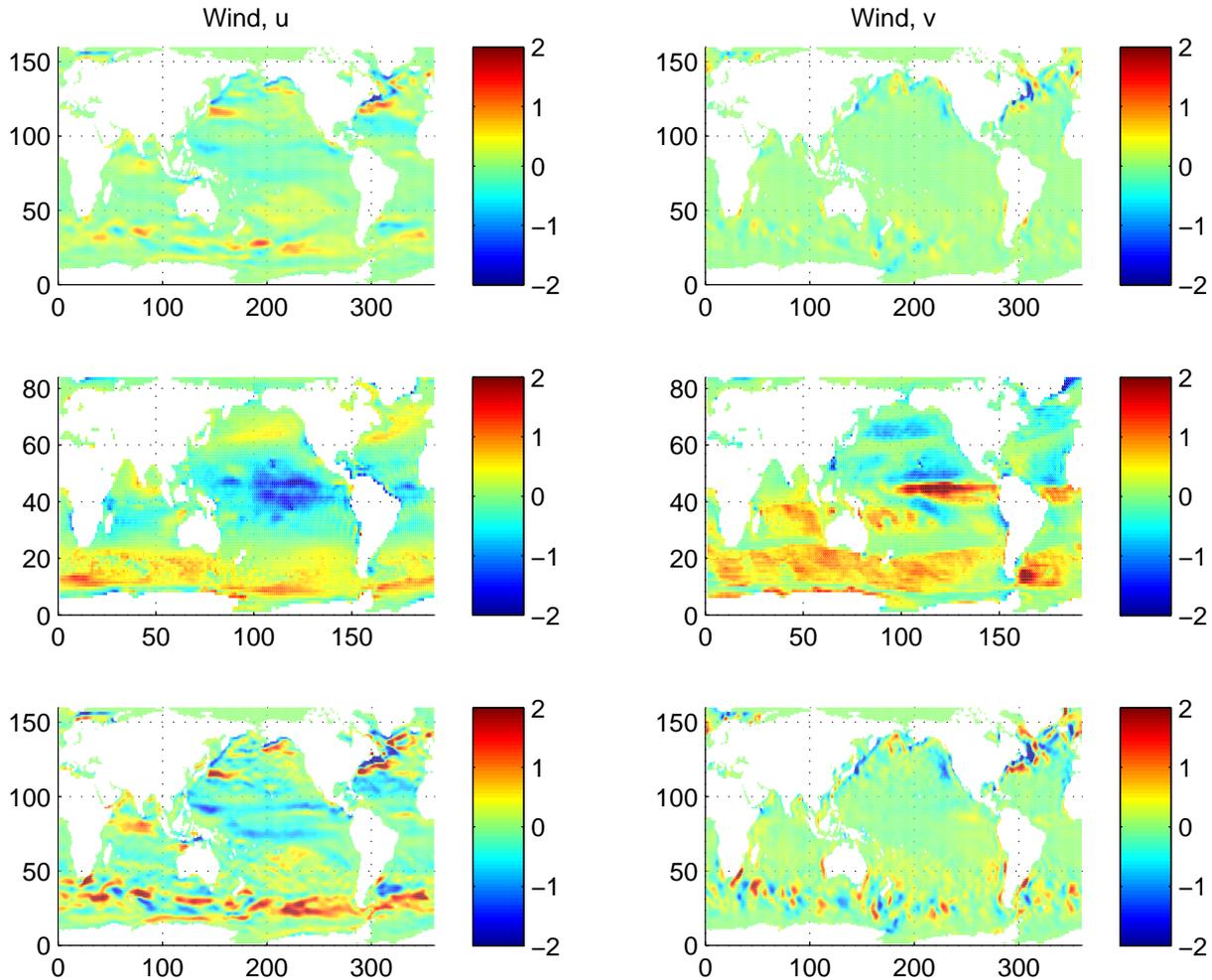


Abbildung 7: Zeitliches Mittel der Korrektur des Windantriebs aus dem GECCO-Referenzlauf ohne MDT-Assimilierung (oben), vorgeschlagen von Large und Yeager (2009, Mitte), und aus dem GECCO-Lauf mit MDT Assimilation (unten). Gezeigt ist die zonale (links) und die meridionale Komponente, (rechts), jeweils in $[\text{m s}^{-1}]$.

Daten. Large und Yeager (2009(7)) haben eine (unabhängige) Korrektur der für unsere Modellläufe als Antrieb verwendeten NCEP-Reanalyse-Daten vorgeschlagen, die sie unter Zuhilfenahme weiterer, gemessener Datensätze erarbeitet haben. Der Vergleich mit den Korrektoren aus den Optimierungsläufen zeigt hohe Korrelationen für den zonalen Wind (Abb. 7, links), Niederschlag und relative Feuchte. Die Korrekturen weisen kleinere Amplituden auf, als die von Large und Yeager (2009(7)), erhöhen sich allerdings, falls die MDT assimiliert wird. Dies verbesserte Übereinstimmung bei Verwendung der MDT im Optimierungsprozess bestätigt die Konsistenz der geodätischen MDT mit den weiteren assimilierten Daten.

Insgesamt kann aus den durchgeführten Untersuchungen geschlossen werden, dass die höhere Auflösung und die größere Genauigkeit der heutigen Geoidmodelle zu einer verbesserten Modellierung der zeitlich mittleren Ozeanzirkulation verhilft.

Literatur

- [1] Stammer, D., A. Köhl, and C. Wunsch (2007), Impact of accurate geoid fields on estimates of the ocean circulation, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 24, 1464-1478
- [2] <http://www.igg.uni-bonn.de/apmg/index.php?id=itg-grace2010>
- [3] Bruinsma S.L., Marty J.C., Balmino G., Biancale R., Foerste C., Abrikosov O. and Neumayer H, 2010, GOCE Gravity Field Recovery by Means of the Direct Numerical Method, presented at the ESA Living Planet Symposium, 27th June - 2nd July 2010, Bergen, Norway; See also: earth.esa.int/GOCE
- [4] Pail, R., et al. (2010), Combined satellite gravity field model GOCO01S derived from GOCE and GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L20314, doi:10.1029/2010GL044906.
- [5] Hansen, D.V., and P.M Poulain (1996), Quality Control and Interpolation of WOCE/TOGA drifter data. *J. Atm. Oc. Tech.*, 13, 900-909.
- [6] Maximenko, N.A., P. Niiler, M.-H. Rio, O. Melnichenko, L. Centurioni, D. Chambers, V. Zlotnicki, and B. Galperin (2009), Mean Dynamic Topography of the Ocean Derived from Satellite and Drifting Buoy Data Using Three Different Techniques, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26, 1910-1919.
- [7] Large, W.G., and S.G. Yeager (2009), The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set, *Clim. Dyn.*, 33, 341-364.

2.3 Voraussichtlicher Nutzen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die GOCE Daten einzigartige neue Aspekte hinsichtlich Geoidvariationen und Ozeanzirkulation aufzeigen. Die Ergebnisse der Projektes können verwendet werden, um die mittlere dynamische Meeresoberflächenhöhe, die in Einklang mit Ozeandaten und der Dynamik steht, bestmöglich zu schätzen. Modell-Daten-Residuen können verwendet werden, um Unstimmigkeiten zwischen dem GOCE Geoid und den Ozeandaten unter Berücksichtigung von a priori Geoid- und Modellfehlern zu definieren.

2.4 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Fortschritte wie sie hier basierend auf GECCO Ergebnissen aufgezeigt wurden, wurden an keiner anderen Stelle erzielt.

2.5 Veröffentlichung des Ergebnisses

Die Ergebnisse dieses Einzelvorhabens werden, wie schon bei GOCE GRAND, durch einen englischsprachigen Beitrag im Rahmen eines Springer-Buchs veröffentlicht.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN Noch nicht bekannt	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Der zeitliche Mittelwert der Ozeanzirkulation und das ozeanische Geoid	
4. Autor(en) Siegismund, Frank Köhl, Armin Stammer, Detlef	5. Abschlussdatum des Vorhabens Mai 2012
	6. Veröffentlichungsdatum geplant für Ende 2012
	7. Form der Publikation Buch
8. Durchführende Institution(en) Institut für Meereskunde, Universität Hamburg, Bundesstr. 53 20146 Hamburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 4
	10. Förderkennzeichen 03G0726B
	11. Seitenzahl 13
12. Fördernde Institution Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 7
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 6
16. Zusätzliche Angaben Keine	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Nicht zutreffend	
18. Kurzfassung <u>Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn:</u> 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 früheren GRACE Geoidmodells verwendet, allerdings unter Verwendung eines räumlich konstanten Fehlers. <u>Begründung/Zielsetzung:</u> 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-Altmetrie 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.	

Methode und Ergebnis:

Die Erfüllung der Projektziele erforderte zunächst eine Erweiterung der Funktionalität unseres Optimierungsverfahrens. Zwar wurde die Mittlere Dynamischen Topographie (MDT) schon in früheren Modellläufen assimiliert, 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. Mit dem erweiterten Optimierungsverfahren wurden zunächst eine Reihe von Optimierungen mithilfe von Geoidmodellen auf Grundlage von GRACE Schwerefelddaten durchgeführt, um die Sensitivität der Ozeansynthese bezüglich Assimilation von MDT zu untersuchen. Aus den Sensitivitätsläufen konnte geschlossen werden, dass die Assimilation der MDT einen deutlichen Einfluss auf die Optimierung hat, insbesondere für die Modell-Daten-Residuen der MDT. Diese Residuen werden deutlich reduziert. 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 zu den anderen assimilierten Datensätzen, deren Fehlerabschätzungen, und zu dem dynamischen Modell ist. Die nachfolgenden Optimierungsläufe dienen der möglichst realistischen Darstellung des Ozeanzustandes für den Zeitraum 1993-1999. Es wurden verschiedene Modellläufe durchgeführt, die sich lediglich in der Assimilation unterschiedlicher Geoide (ITG-GRACE2010s, GOCE-Geoid aus dem direkten Verfahren, erster Release, GOCE-GRACE kombiniertes Modell GOCO01s) und mit einem Modelllauf ohne Assimilation der MDT verglichen wurden. Die Assimilation der kombinierten GOCE-GRACE-Lösung (GOCO01s) liefert die beste Optimierung im Sinne einer Minimierung der Kostenfunktion. Das ozeanische Geoid wurde aus der Differenz von MSS und modellierter MDT bestimmt und mit dem GOCO01s Geoidmodell verglichen. Innerhalb der zentralen Becken verbleiben die Differenzen des modellierten gegenüber dem gemessenen Geoid überwiegend unterhalb von 5 cm. Größere Unstimmigkeiten finden sich in den Westlichen Randströmen, wie dem Golfstrom und dem Kuroshio, und im Südlichen Ozean, insbesondere entlang des Antarktischen Zirkumpolarstroms (ACC). In diesen Regionen treten mesoskalige Wirbel auf. Diese Wirbel können, bedingt durch die begrenzte Gitterweite des Ozeanmodells (1°), nicht aufgelöst werden. Unter der Annahme eines (realistischen) Mapping-Fehler für die MSS von 4 cm und unter der Nicht-Berücksichtigung von Regionen mit starker mesoskaliger Aktivität, die im Modell nicht aufgelöst wird (insbesondere ACC) sind modellierte(s) und beobachtete(s) MDT (Geoid) konsistent. Die optimierte Ozeanzirkulation und die im Optimierungsprozess korrigierten Antriebsdaten wurden mit unabhängigen Datensätzen verglichen. Die Vergleiche weisen eine deutliche Verbesserung der Übereinstimmung für die Optimierungen auf, in denen die MDT assimiliert wird.

Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten:

Im Rahmen des Vorhabens wurde die Funktionalität des Optimierungsverfahrens erweitert. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Assimilation neuer, hochauflösender Geoidmodelle die Modellierung der Ozeanzirkulation und des oberflächennahen Ozeanzustandes verbessert wird. Diese Aufwertung des Optimierungsverfahrens ist relevant für zukünftige Vorhaben in der Geophysik, sowohl in der Meeresforschung als auch in der Erdsystemforschung und insbesondere der Klimaforschung, die die Ozeanmodellierung als wesentliche Komponente benötigt. Insbesondere würde der neue Standard Verwendung finden, falls ein derzeit in der Planung befindlichen DFG-Schwerpunktsprogramm über Meeresspiegeländerungen verwirklicht würde.

19. Schlagwörter

Mittlere Dynamische Topographie, Datenassimilation, GOCE

20. Verlag

Springer Heidelberg

21. Preis

Noch nicht bekannt