

Sea Level Variations

-

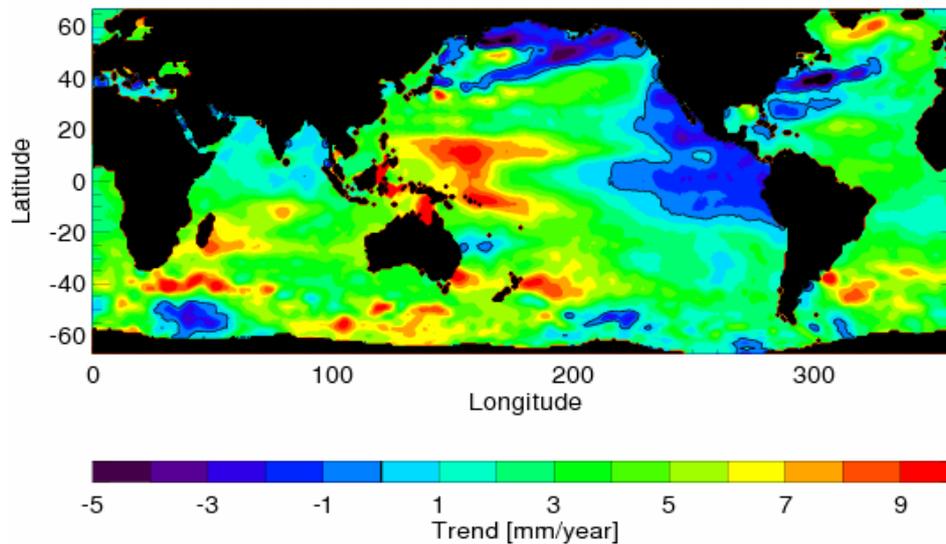
Prospects from the Past to the Present

*Verbundprojekt im Sonderprogramm Geotechnologien
„Erfassung des Systems Erde aus dem Weltraum“*



GEOTECHNOLOGIEN

Schlussbericht Zeitraum 01.10.2005 bis 31.08.2008



- Verbundpartner**
- Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
 - Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven (AWI)

Projektleitung Prof. Dr. phil. nat. M. Rothacher

GeoForschungsZentrum Potsdam
Department 1 „Geodäsie und Fernerkundung“
Telegrafenberg, 14473 Potsdam
Tel.: (0331) 288-1100
Fax: (0331) 288-1111
Email: rothacher@gfz-potsdam.de

(Leeresseite)

- Koordinator: Dr. Tilo Schöne
GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)
Department 1 „Geodäsie und Fernerkundung“
Telegrafenberg A6
D-14473 Potsdam
Tel.: +49 (0)331 288 1739
Fax.: +49 (0)331 288 1775
Email: tschoene@gfz-potsdam.de
- Teilprojektleiter AWI: Dr. Jens Schröter
Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
Department „Klimasystem“
Bussestraße 24
D-27570 Bremerhaven
Tel.: +49 (0)471 4831 1762
Fax.: +49 (0)471 4831 1797
Email: jschroeter@awi-bremerhaven.de
- Teilprojektleiter GFZ: Dr. Saskia Esselborn
GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)
Department 1 „Geodäsie und Fernerkundung“
Telegrafenberg A6
D-14473 Potsdam
Tel.: +49 (0)331 28
Fax.: +49 (0)331 28
Email: essel@gfz-potsdam.de
- Mitarbeiter AWI: Dr. Dmitri Sidorenko
Dmitri.Sidorenko@awi.de
- Dr. Vladimir Ivchenko
Vladimir.Ivchenko@awi.de
- Dipl. Phys. Heiko Reinhardt
Heiko.Reinhardt@awi.de
- Dipl. Hyd. Falk Richter
Falk.Richter@awi.de
- Mitarbeiter GFZ: Dr. Sergei Rudenko
rudenko@gfz-potsdam.de
- Dipl.-Phys. Nana Schön
nana@gfz-potsdam.de

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeiner Bericht	5
1.1 Aufgabenstellung	5
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	6
1.2.1 Helmholtz Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ) ...	6
1.2.2 Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeressforschung (AWI).....	6
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
1.4 Wissenschaftlicher, technischer Stand bei Projektbeginn.....	7
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	9
2. Ergebnisse des Projektes	9
2.1 Erzielte Ergebnisse und Verwendungsnachweis.....	25
2.2 Voraussichtlicher Nutzen	25
2.3 Fortschritte auf dem Gebiet von anderen Stellen.....	25
2.4 Literatur.....	26
3. Gesamtüberblick aller Veröffentlichungen, Vorträge und Poster	26
3.1 GFZ	27
3.1.1 Dissertationen	27
3.1.2 Diplomarbeiten	27
3.1.3 Publikationen	27
3.1.4 Vorträge	28
3.1.5 Poster	29
3.2 AWI.....	30
3.2.1 Dissertationen	30
3.2.2 Diplomarbeiten	30
3.2.3 Publikationen	30
3.2.4 Vorträge	31
3.2.5 Poster	33

1. Allgemeiner Bericht

1.1 Aufgabenstellung

Das Vorhaben bezieht sich auf dem Anstieg des Meeresspiegels, der äußerst empfindlich auf Änderungen und Variationen des Klimas reagiert. Ein Anstieg des Meeresspiegels ergibt sich als Reaktion auf die Erwärmung des Weltozeans oder auf das Abschmelzen großer kontinentaler Eismassen. Ein großer Teil der Menschheit wäre durch einen erheblichen Anstieg des Meeresspiegels direkt betroffen. Zudem weisen die Küstenstreifen eine sehr große Biodiversität auf, die beeinträchtigt werden würde. Unabhängig davon, ob die derzeit gemessenen Änderungen des globalen Meeresspiegels natürliche oder antropogene Ursachen haben, ist die hochgenaue Bestimmung und Überwachung des Meeresspiegels sowie der Beiträge von Massen- und Dichteänderungen eine zentrale Aufgabe.

Die Messung von Meeresspiegelvariationen mit Pegeln und Radaraltimetrie (RA) sowie ihre Modellierung mit einem Ozeanzirkulationsmodell sind die Mittel der Wahl, um konsistente Aussagen über regionale und globale Meeresspiegeländerungen zu erhalten. Durch die Verknüpfung dieser Informationen mit den neuen und hochgenauen Schwerefeldern von CHAMP und GRACE ergibt sich zudem die Möglichkeit zu unterscheiden, ob diese Änderungen in der Massen- und/oder der Dichtebilanz des Ozeans ihren Ursprung haben.

In den letzten zwei Jahrzehnten hat die Altimetrie eine wichtige Rolle bei der Bestimmung von Meeresspiegeländerungen gespielt. Vom Satelliten aus konnte eine starke regionale Variabilität beobachtet werden, die auch dekadische Zeitskalen aufweist. Allerdings führt die Auswertung von Altimeterdaten derzeit zu keiner einheitlichen Abschätzung der Meeresspiegeländerungen. Abhängig von den verwendeten Korrekturalgorithmen werden signifikant unterschiedliche Trends gefunden. Ziel des Vorhabens war es daher, verschiedene Altimeterprodukte über Perioden von Monaten bis Dekaden hinsichtlich ihrer Konsistenz mit der Ozeandynamik zu überprüfen.

Ein großes Problem bei der Ableitung langfristiger Änderungen ist die Überlagerung der klimabedingten dekadischen und säkularen Änderungen durch saisonale, jährliche und inter-annuale Variabilitäten. Erschwerend kommt hinzu, dass lange Zeitreihen des Meeresspiegels nur von Pegeln vorliegen. Diese Messungen können aber durch vertikale Bewegungen des festen Landes verfälscht sein und liefern daher nur relative statt absolute Änderungen des Meeresspiegels. Ein weiteres Problem besteht in der inhomogenen globalen Verteilung der Pegel. Durch die Assimilation von Pegeldata in globale Ozeanmodelle können sie in dynamisch konsistenter Art und Weise über den gesamten Bereich des Ozeans extrapoliert werden.

Als Forschungsansatz in SEAVAR wurde gewählt, das Verständnis der Prozesse des Meeresspiegels und seine Änderungen in der Vergangenheit und in der Zukunft hochgenau zu bestimmen. Dieses Ziel war mit folgenden Aufgaben verknüpft:

- Die hochgenaue Bestimmung des absoluten Meeresspiegels unter Nutzung verschiedener Radaraltimetermissionen, gestützt auf diverse in-situ Informationen, seit dem Start von GEOSAT,
- Die Bestimmung vertikaler Bewegungsraten an Pegelstationen auf der Basis langjähriger GPS-Messungen und die Verknüpfung mit Pegelmessungen zur Ableitung hochgenauer und hochaufgelöster Meeresspiegelinformationen,
- Eine verbesserte Bestimmung historische Meeresspiegelvariabilitäten durch die Kombination von Radaraltimetrie und langjährigen Pegelmessungen über Empirische Orthogonalfunktionen,
- Verifizierung verschiedener Altimeterprodukte hinsichtlich ihrer Konsistenz mit der Ozeandynamik,
- Berechnung regionaler und globaler Meeresspiegeländerungen für 20 und mehr Jahre, um die Lücke zwischen den GEOSAT- und ERS- & TOPEX/Poseidon-Missionen mittels Ozeanmodellierung und Assimilation zu schließen,

- Verfeinerung der Ozeanmodellauflösung, um eine bessere Beschreibung der Randströme zu erhalten, die Assimilation der Pegeldata zu ermöglichen und die Nutzung des hochaufgelösten GOCE-Geoids vorzubereiten.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Arbeiten in diesem Projekt bauten wesentlich auf den Vorarbeiten und die Kompetenz der einzelnen Projektpartner zu Projektbeginn auf und sind im Folgenden beschrieben.

1.2.1 Helmholtz Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)

Das GFZ beteiligte und beteiligt sich an verschiedenen nationalen und internationalen Programmen. Darunter fallen Aktivitäten in Verbindung mit der Bestimmung von Gravitationsfeldern, wie CHAMP und GRACE, mit der GPS-Analyse, wie das IGS-Analysezentrum, mit Pegeln, wie das IGS-TIGA, und in Verbindung mit der Altimetrie, wie die Ozeantopographie aus Satellitenmissionen (OSTM/NASA und CNES) und die Inter-Kommissionsprojekte der IAG für Satellitenaltimetrie und Vertikales Referenzsystem.

Das GFZ ist in ESA-Aktivitäten innerhalb des D-PAF und D-PAC involviert und verantwortlich für die ERS-Bahnbestimmung. Viele Jahre lieferte das GFZ auch Quick-Look Altimeterdaten für die ESA. Als nationalen Beitrag für ENVISAT entwickelte das GFZ den RA-Prozessor für Meeres- und Eisprodukte (jetzt ADS).

In den letzten Jahren nahm das GFZ an durch das BMBF geförderten Projekten mit ähnlicher Zielrichtung teil, darunter die Strategiefonds-Projekte SEAL, ENVOG und GASP der Helmholtzgemeinschaft. Die dort erzielten Ergebnisse bilden die wissenschaftliche Grundlage für diesen Antrag. Zusätzlich beteiligt sich das GFZ am IEOS (Integrated Earth Observing System). Innerhalb von IEOS tragen die Antragsteller gemeinsam mit den AWI-Partnern zum Thema „Eis und Ozean“ bei.

Innerhalb der “Geotechnologien” werden wir eng mit anderen Gruppen kooperieren. Mit DEGGOS werden wir auf dem Gebiet der GPS-Analyse und der Bereitstellung von homogenen GPS-Zeitreihen zusammenarbeiten. Unsere AP100 und AP300 werden von den anderweitig beantragten Arbeiten zur Bestimmung und Verbesserungen der Schwerefeldmodelle, basierend auf CHAMP und GRACE, profitieren. Unsere Produkte und Ergebnisse können im Gegenzug von diesen Antragsstellern zur Verbesserung ihrer Arbeiten verwendet werden.

1.2.2 Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeressforschung (AWI)

Das AWI ist das führende deutsche Polarforschungsinstitut. Es stellt eine Reihe von Großgeräten und Polarstationen für die deutsche und internationale Polarforschung zur Verfügung. An den Expeditionen des Forschungsschiffes Polarstern ist der Fachbereich Klima des AWI federführend beteiligt. In diesem Fachbereich werden sowohl Feldexperimente wie auch numerische Simulationen durchgeführt. Die für den Rahmen dieses Antrags wichtigen Kenntnisse und technischen Entwicklungen werden im folgendem kurz dargestellt.

Am AWI hat das Problem des Anstiegs des Meeresspiegels eine zentrale Stellung in der Glaziologie und der Ozeandynamik. Wesentliche Voraussetzungen für das vorliegende Projekt wurden im HGF-Strategiefondprojekt SEAL in Zusammenarbeit mit dem Partner GFZ gelegt. Die Verarbeitung von Radaraltimetriemessungen in der Ozeanmodellierung wird seit langem betrieben. Der Schwerpunkt hier liegt in der Bestimmung des Meeresspiegelanstiegs auch während der Zeiten ohne Altimeterdaten. Ferner wird besonderer Wert auf das Verständnis des Anstiegs und seiner regionalen Schwankungen gelegt. Temperaturmessungen im Ozean sind nur Teilweise vorhanden, so dass die Wärmeausdehnung nur ungenau bestimmt werden kann. Noch ungenauer sind Niederschlag, Verdunstung und Eintrag durch Flüsse in den Ozean zu bestimmen. Eine Berechnung der Bilanz aus gemessenen Flüssen verbietet sich also und nur über die Messung des Meeresspiegels in Zusammenhang mit Ozeanmodellierung und Datenassimilation lassen sich die unter-

schiedlichen Ursachen quantitativ erfassen. Am AWI steht hierfür das hochentwickelte 4DVAR Assimilationsverfahren sowie mit dem Ozeanmodell LSG ein schlagkräftiges und erprobtes Werkzeug zur Verfügung für das wir über eine große Erfahrung verfügen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Personal: Aus den Projektmittel wurden folgende Mitarbeiter finanziert:

Mitarbeiter	Institut	Zeitraum
Dr. Sergei Rudenko	GFZ	01.10.2005-31.08.2008
Dipl.-Phys. Nana Schön	GFZ	15.12.2005-31.08.2008
Dipl.-Phys. Heiko Reinhardt	AWI	01.10.2006-31.08.2008
Dipl.-Hyd. Falk Richter	AWI	16.11.2006-31.08.2008
Dr. Dmitri Sidorenko	AWI	5 Monate
Dr. Vladimir Ivchenko	AWI	8 Monate

Investitionen/Sachmittel: Im Rahmen des Projekts waren keine Investitionen vorgesehen.

1.4 Wissenschaftlicher, technischer Stand bei Projektbeginn

Im Folgenden wird der Stand der wissenschaftliche/technische Stand der verschiedenen Arbeitspakete zu Projektbeginn zusammengefasst.

RA-Daten werden bereits seit 20 Jahren für Untersuchungen des Meeresspiegels herangezogen, wobei sich die Genauigkeit der Messungen über die Jahre deutlich verbessert hat. Die Genauigkeiten der Messungen haben sich über die Jahre deutlich verbessert. Während in den ersten Jahren (GEOSAT-Mission) die radialen Bahnfehler und das Messrauschen Fehler im Dezimeterbereich verursachten, weisen spätere Missionen (TOPEX, JASON-1) nur noch Fehler im Zentimeterbereich auf. Wegen der großen radialen Fehler in den Anfangsjahren der RA hatte sich über viele Jahre die Assimilation von Meeresspiegelanomalien in Ozeanmodelle durchgesetzt, der direktere Weg, die Assimilation der dynamischen Meerestopographie, rückte erst seit dem Start von CHAMP und GRACE in den Bereich der Möglichkeiten. Aber auch andere Forschungsmöglichkeiten standen für das Projekt offen; mit dem am GFZ abgeleiteten GRACE-basierten Schwerefeldmodellen können z.B. homogene Bahnbestimmungen für alle Altimetersatelliten vorgenommen werden. Die erneute Aufbereitung von GEOSAT (1985-1989) mit den modernen Möglichkeiten ermöglicht es, dekadische Variationen des Meeresspiegels zu untersuchen.

Die einzige Methode, die ausreichend genaue und hochaufgelöste Information über die Vertikalbewegungen der Pegelstationen liefert, ist die Analyse von GPS-Daten. Um dabei die höchstmögliche Genauigkeit in den abgeleiteten Zeitreihen der Höhen zu erhalten, müssen alle bekannten Auflasteffekte korrigiert, sowie die wöchentlichen Lösungen auf ein präzises und stabil realisiertes Referenzsystem basiert werden. Alle Effekte müssen mit einer Genauigkeit von besser als 1 mm/Jahr beherrscht werden. Bei Projektbeginn existierende Lösungen stammen oft aus inhomogen analysierten Zeitreihen, bei deren Erstellung nicht-optimale Modelle, beispielsweise für die Satellitenantennen, benutzt und die Auflasteffekte ignoriert wurden. Zum Projektbeginn standen erstmals Modelle für die Antennenkorrektur zur Verfügung. Auch war die internationale Beteiligung und Einbindung zum Antragszeitpunkt geplant und organisiert.

Zusätzlich zu der bereits erwähnten RA-Kalibrierung, liefern Pegelzeitreihen, die durch GPS höhenmäßig korrigiert sind, eine Basis für die Rekonstruktion der rezenten Meeresspiegelvariabilitäten. Für diese Aufgabe werden die spärlich verteilten Pegeldaten auf die dominanten empirischen Orthogonalfunktionen (EOF) der aus RA abgeleiteten Meeresspiegelvariabilität projiziert. Zum Projektbeginn konnte davon ausgegangen werden, dass eine ausreichende Zahl von

Gezeitenpegeln mit harmonisierten Pegel­daten sowie den zugehörigen GPS-Korrekturen vorliegen würden.

Die Frage, ob der in den letzten Jahrzehnten beobachtete Meeresspiegelanstieg primär durch Änderungen des Wärmehaushaltes oder den Eintrag von Wassermassen vom Festland hervorgerufen wurde, wurde zu Projektbeginn in der Wissenschaft kontrovers diskutiert. Der Verlauf dieser beiden Faktoren, ihre Wechselwirkungen und ihre regionalen Auswirkungen waren und sind für das letzte Jahrhundert, ja sogar für die letzte Dekade, nur unzureichend geklärt. Die zeitvariablen Schwerefeld­daten, die aus der GRACE-Mission abgeleitet werden können, eröffneten erstmalig die Möglichkeit, die massenspezifischen Änderungen des Meeresspiegels anhand von Messungen zu bestimmen.

Um eine qualifizierte Aussage über die zukünftigen Änderungen des Meeresspiegels zu ermöglichen, müssen die Ursachen für die beobachteten Phänomene untersucht und verstanden werden. Der Meeresspiegelanstieg hat im Wesentlichen zwei Ursachen: (1) Änderungen der Dichte des Meerwassers, die überwiegend auf die Änderungen im Wärmehaushalt zurückgeführt werden können; und (2) den Eintrag von Wassermassen z.B. durch das Schmelzen von Gletschern und polarer Eismassen. Der Verlauf dieser beiden Faktoren, ihre Wechselwirkungen und ihre regionalen Auswirkungen sind für das letzte Jahrhundert, ja sogar für die letzte Dekade, nur unzureichend geklärt. Dies ist die Ursache für kontroverse Diskussionen in der Wissenschaft.

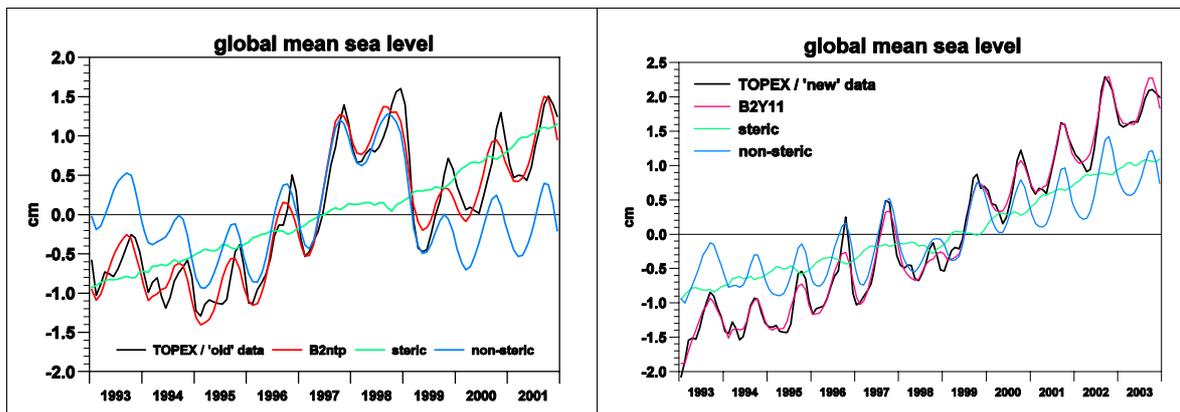


Abb. 1. Zwei Realisierungen des global gemittelten Meeresspiegels abgeleitet durch Assimilation von TOPEX/Poseidon-Anomalien in das LSG-Ozeanmodell vor Projektbeginn. Das Modell folgt sehr gut dem jeweils vorgegebenen Altimeterprodukt (schwarze Linie). Die beiden Altimeterprodukte unterscheiden sich in den Korrekturalgorithmen für die Prozessierung der Rohdaten. Die Differenzen sind primär durch die unterschiedlichen Verfahren der Bestimmung des 'sea state'-Bias vor und nach dem Umschalten des TOPEX-Altimeters von Side A auf B verursacht. Das hat erhebliche Konsequenzen bei der Interpretation der sich ergebenden Meeresspiegeländerung, im Wesentlichen wird dadurch der nicht-sterische Anteil, d.h. der Zufluss von zusätzlichem Frischwasser in den Ozean, beeinflusst.

Auch nach einer sorgfältigen Prozessierung werden Altimeter- und Pegel­daten noch Unge­nauigkeiten enthalten. Ein Beispiel für die Auswirkungen verbesserter Korrekturen für die RA ist in Abbildung 1 dargestellt. Ein entscheidender Test für die Altimeterprodukte ist ihre Assimilation in ein globales Ozeanzirkulationsmodell, das einen mit der Ozeandynamik konsistenten Meeresspiegel berechnet. Auf diesem Wege können Altimeterkorrekturen durch Ozeanzirkulationsmodelle validiert werden, so dass die Qualität der Korrekturen nicht nur anhand der herkömmlichen Kreuzungspunktanalyse sondern auch anhand der Modellergebnisse beurteilt werden kann. Bei der Assimilation treten die größten Probleme in den Küstenregionen auf, die von den Standard-Ozeanzirkulationsmodellen nur schlecht aufgelöst werden. In dem am AWI entwickelten Finite-Elemente-Ozeanzirkulationsmodell wird dieses Problem entschärft, indem die Auflösung in den kritischen Regionen erhöht wird, während andere Bereiche unverändert bleiben, um die Recheneffektivität zu erhalten. Die Kombination verbesserter Altimeter- und Pegel­produkte mit der Modellierung der globalen Ozeanzirkulation auf einem Raster, das die Komplexität der realen

Ozeanränder berücksichtigt, erlaubt es, Meeresspiegeländerungen zuverlässiger als bisher möglich zu berechnen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für das GFZ hat sich die Zusammenarbeit insbesondere im internationalen Rahmen des International GNSS Services (IGS), der Gruppierungen des Global Geodetic Observing Systems (GGOS) und des Global Ocean Observing Systems (GLOSS, UNESCO) entwickelt. Für die Analyse der Daten wurden auf bestehende mit der Ohio State University (Ohio, USA) und auf Kooperationen mit der University of Calgary (Kanada) zurückgegriffen. Abstimmungen erfolgten zudem mit NOAA/LSA. Auf dem Gebiet der Datenassimilation wurde die Zusammenarbeit mit den Universitäten Utrecht (NL) und Grenoble (F) deutlich verstärkt. Mit dem Institut für Meereskunde an der Universität Hamburg gibt es eine intensive Kooperation bei der 4DVAR Methode. Ferner konnte mit dem National Oceanographic Centre (NOC) in Southampton (GB) eine gemeinsame Datenverarbeitung und Auswertung von Ozeanmessungen begonnen werden.

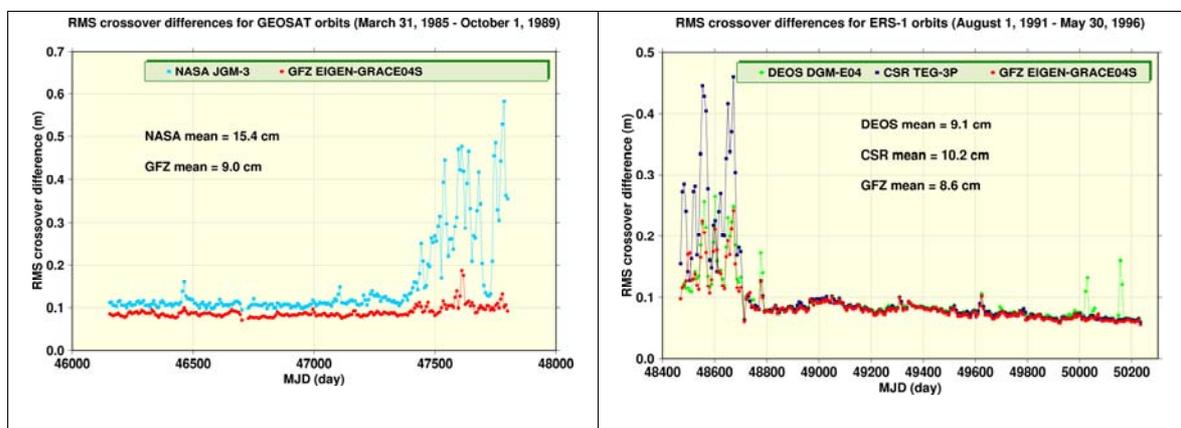
2. Ergebnisse des Projektes

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse des Projektes beschrieben und Aussagen zum Erreichen der einzelnen Meilensteine gemacht. Der Abschnitt wird durch einen Gesamtüberblick aller Veröffentlichungen, Vorträge, Poster, Dissertationen und Diplomarbeiten im Rahmen des Projektes vervollständigt.

Berechnung von Satellitenorbits

Die Arbeiten für SEAVAR umfassten u.a. die Berechnung der Orbits der meisten Altimetersatelliten über die vollständigen Missionszeiträume. Damit liegen für GEOSAT, ERS-1, ERS-2 und TOPEX/ Poseidon vollständige Orbitinformationen vor (Zeiträume: TOPEX/Poseidon (09/1992 bis 10/2005), GEOSAT (03/1985 bis 01/1990), ERS-2 (05/1995 bis 03/2006), ERS-1 (08/1991 bis 06/1996)).

Das Hauptziel war die Bestimmung eines qualitativ hochwertigen GEOSAT-Orbit. Dazu wurden die Dopplerdaten der Magnavox-1502 Stationen und der TRANET-II Stationen aufbereitet und in die Analyse einbezogen. Für die weiteren Orbitberechnungen wurden Kreuzungspunktdifferenzen, basierend auf vorläufigen Satellitenbahnen, bestimmt. Die so erhaltenen Orbits wurden iterativ verbessert. Zusätzlich wurden verschiedene Methoden zur optimalen Bahnbestimmung getestet, so z.B. eine dichtere Schätzung des atmosphärischen Drags und empirischer Beschleunigungen entlang und quer zur Bahnspur. Dadurch konnte der mittlere Fehler der Kreuzungspunktdifferenzen für den gesamten Missionszeitraum von 11.4 cm auf 9.0 cm reduziert werden (Zeitraum April 1985 bis September 1989) und von 9.1 cm auf 8.4 cm für Perioden mit geringer solarer Aktivität. Der größte Gewinn bezüglich der Orbitverbesserung wurde für den Zeitraum hoher solarer Aktivität (August 1988 bis Dezember 1989; Abb. 2) erreicht.



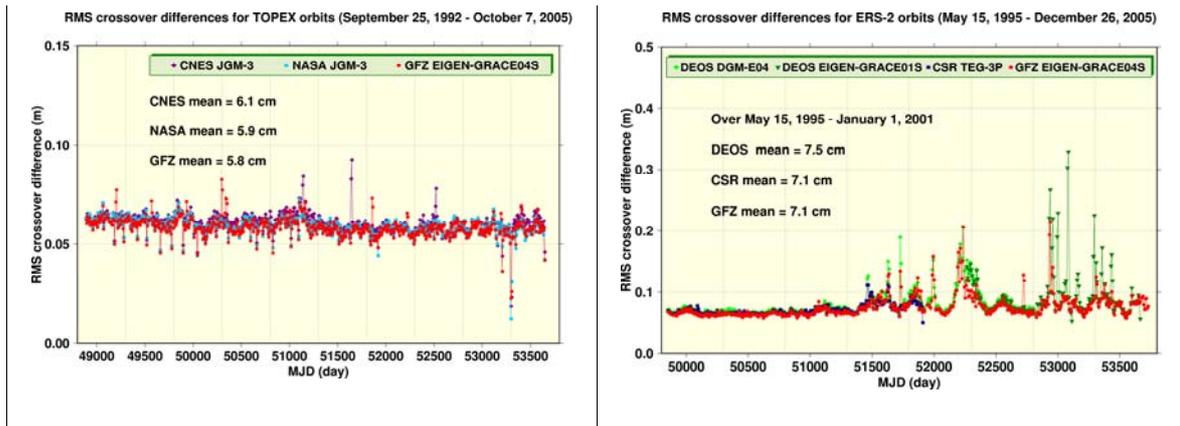


Abb. 2. Mittlere Kreuzungspunktdifferenzen für die am GFZ und anderen Instituten bestimmten Bahnen von GEOSAT, ERS-1, TOPEX/Poseidon und ERS-2

Eine dichtere Schätzung von Bahnparametern wurde auch für die Bahnbestimmung von ERS-1 und ERS-2 getestet. Dadurch wurde der mittlere Fehler der Kreuzungspunktdifferenzen für ERS-1 von 9.1 cm auf 8.6 cm für den Gesamtmissionszeitraum (August 1991 bis Mai 1996) erzielt. Für die Periode niedriger solarer Aktivität (Juni 1992 bis Juni 1996) reduzierte sich der mittlere Fehler von 7.7 cm auf 7.5 cm. Für den ERS-2 wurde ein Orbit, basierend auf Laser- und Kreuzungspunkt-daten, mit einem mittleren Fehler von 7.5 cm (Mai 1995 bis Juni 2003) bestimmt, die mittleren Fehler für TOPEX/Poseidon liegen bei 5.9 cm (September 1992 bis Oktober 2005).

Damit standen und stehen für die weiteren Untersuchungen konsistente Bahnen für die Missionen GEOSAT, ERS-1, ERS-2 und TOPEX/Poseidon im ITRF2000 zur Verfügung. Insbesondere der mittlere Fehler von GEOSAT liegt jetzt im Niveau von ERS-1 und nur geringfügig höher als ERS-2. Die Bahnen von TOPEX/Poseidon sind, wegen einer verbesserten Bahnverfolgung (DORIS) generell besser.

Reprozessierung von GPS an Gezeitenpegeln

Ein weiterer Schwerpunkt von SEAVAR im GFZ-Anteil waren die Reprozessierung von GPS an Gezeitenpegeln. Ziel war es, die Grundlage für die EOF-Verknüpfung der Radaraltimetrie mit Pegeldaten zu schaffen. Zur Anwendung kam die zwischenzeitlich zur Verfügung stehende Version (pdm7) der GFZ-GPS-Prozessierungssoftware "EPOS Potsdam", der zwischenzeitlich verfügbare Standard ITRF2005 verbessert die Lösung in der Qualität und Laufzeit. Wesentliche Vorzüge der Software sind die Basierung auf den IERS Konventionen 2003, der Nutzung absoluter Phasenzentrumsvariationen, eines neu implementierten Ozeangezeitenmodells (FES2004), eines neuen Schwerefeldmodells (EIGEN-GL04C) und eines neuen Lösungsansatzes zur Fixierung der Mehrdeutigkeiten. Letzteres verbessert die Anzahl gefixter Mehrdeutigkeiten von 80% in der Version pdm6 auf 95% in der Version pdm7.

Des Weiteren wurde die Strategie für die Reprozessierung weiter entwickelt. Durch die zahlreichen Vorarbeiten hat sich die Anzahl der verfügbaren GPS-Stationen deutlich erhöht. Dadurch wäre der Prozessierungsaufwand unverhältnismäßig gestiegen. Daher wurden die Lösungsstrategien in Cluster ausgeführt. Der Hauptcluster mit ca. 216 Stationen enthält überwiegend IGS-Stationen und TIGA-Stationen, die seit längerem verfügbar sind. Der zweite Cluster, in dem die Anzahl der einbezogenen Stationen auf ca. 217 erhöht wurde, wird separat berechnet und anschließend auf der Basis der Normalgleichungen in die finale Berechnung eingeführt. 30 Stationen gehören zu beiden Cluster. Das vollständige TIGA GPS Netz umfasst aktuell 403 GPS Stationen: 216 IGS Stationen und 187 TIGA-only Stationen (Abb. 3). Das ist das weitaus größte Netz aller TIGA Analysezentren. Mit diesem Ansatz hat das GFZ eine führende Position bei der Reprozessierung eingenommen.

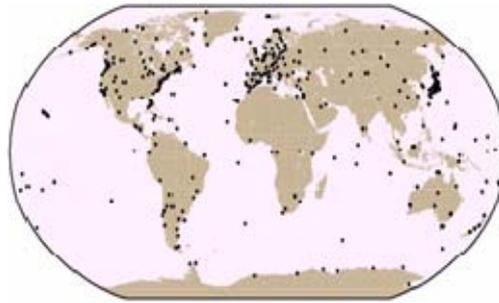


Abb. 3. Das vollständige TIGA GPS Netz der GFZ - Lösung (403 GPS-Stationen)

Zusätzlich mussten eine Reihe zusätzlicher Aufgaben durchgeführt werden, um eine qualitativ hochwertige und möglichst vollständige Reprozessierung der GFZ-Lösung für TIGA zu ermöglichen. So wurden z.B. 31 neue TIGA GPS Stationen in die Auswertung eingeführt. Die Information über Antennen und Empfänger, DOMES Nummern wurden für 156 TIGA Stationen für den Zeitraum 1994-2007 überprüft und aktualisiert. TIGA spezifische Namen (TIGAxxxxx) wurden für 15 TIGA Stationen zugewiesen, die keine DOMES Nummern haben. Eine Liste von ftp-Adressen wurde aus den site-logs für alle 187 TIGA-only erstellt, um die automatisierte Datenaquise zu unterstützen. GPS Daten für die neuen Stationen und fehlenden GPS-Daten für die vorhandenen Stationen für den Zeitraum von 01.01.1994 bis 31.12.2007 wurden in Datenbanken am GFZ erfasst und abgelegt. Wöchentliche SINEX Dateien, die international zur Verfügung gestellt werden, enthalten jetzt die folgenden Parameter: Satellitenantennenoffsets, X,Y,Z-Stationenkoordinaten, x- & y-Polkoordinaten und Raten, Unterschied (UT1-UTC) und Länge des Tages (LOD). SINEX Dateien für 482 Wochen der Jahre 1998-2007 stehen bereit. Die SINEX Dateien wurden auch für das GEOTECHNOLOGIEN Projekt „GGOS-D“ und für die IGS-Reprozessierung zu Verfügung gestellt. Die Dateien für die Jahre 2000-2001 wurden für die IGS Kombination für ITRF2008 benutzt.

Im Rahmen von SEAVAR wurden nicht nur am GFZ Reprozessierungen von GPS-Daten an Pegeln durchgeführt, sondern es konnte auch auf die durch das GFZ koordinierten TIGA-Lösungen weiterer internationaler Zentren rückgegriffen werden. Da im internationalen Maßstab aber keine ähnlich gelagerte Systematik der Prozessierung vorliegt, liegen teilweise überlappende aber unterschiedliche komplette Lösungen vor. Es wurde in der Vergangenheit jedoch bereits gezeigt, dass die Kombination einer größeren Anzahl von Beiträgen Vorteile gegenüber der Einzelauswertung hat.

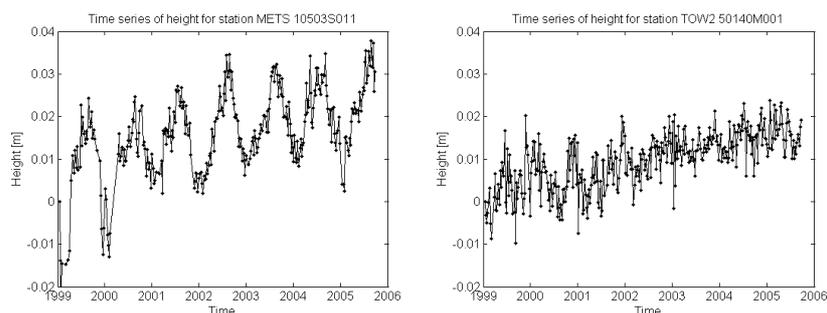


Abb.4 Zeitserien aus der wöchentlichen SEAVAR-Kombination für Metsahovi (METS) und Townsville (TOW2).

Um auf einen international akzeptierten Standard der Kombination zurückgreifen zu können, werden ähnliche Algorithmen wie im IGS genutzt (siehe auch Ferland et al. 2005). Damit ist eine größtmögliche Konsistenz und Vergleichbarkeit sichergestellt. Alle Lösungen der GPS-Analysen liegen im SINEX-Format vor. Diese Lösungen enthalten neben den Normalgleichungen die vollen Varianz-Kovarianz-Informationen und die a priori Zwänge, die bei der Lösung angewendet wurden. Dadurch ist die Rückführung auf datumsfreie Normalgleichungen und rigorose Kombination möglich. Zur Kombination wird die Berner GPS-Software (Dach et al. 2007)

verwendet, die am GFZ speziell für den Zweck der Kombination erweitert wurde, verwendet. Die resultierenden kombinierten Lösungen werden im Alignment des IGS auf ITRF2005 (Altamimi et al. 2007) über no-net-rotation und no-net-translation auf einen Satz von IGS-Referenzstationen durch Helmerttransformation überführt.

Die Abbildung zeigt exemplarisch die aus der kombinierten Lösung abgeleiteten Stationshöhen für Metsahovi (METS, Abb. 4a). Diese zeigt ein prononciertes jährliches Signal, welches durch Atmosphärenauflasten oder hydrologische Änderungen im Untergrund hervorgerufen werden. Diese erschweren die Interpretation der Pegelsignale in den anderen Arbeitspaketen. In Gegensatz dazu zeigt die Station Townsville (TOW2, Abb. 4b) einen dominanten Trend ohne deutliche Variationen.

Harmonisierung von Altimeterdaten

Ausgehend von der Tatsache, dass die RA-Missionsdaten von verschiedenen Organisationen (ESA, NASA, CNES, NOAA) durchgeführt, prozessiert und verbreitet werden, weisen die für die Nutzer verfügbaren Daten einen inhomogenen Stand auf. Hierzu kommen die Probleme, die aus den unterschiedlichen Bearbeitungszeiträumen (20 Jahre) resultieren. Durch neue Analyseansätze, neue Korrekturmodelle sowie vorangegangene Harmonisierungsbemühungen können RA-Daten heute wesentlich strukturierter ausgewertet werden.

Ein Ziel von SEAVAR war die Harmonisierung von GEOSAT und weiterer Missionen. Durch die Nutzung des ADS-Systems (adsc.gfz-potsdam.de/ads) können Korrekturmodelle ausgetauscht oder addiert werden. Im Rahmen von SEAVAR wurden diese verschiedenen Datensätze weiter analysiert und ein optimierter Satz von Korrekturmodellen als Grundlage für die weiteren Arbeiten bestimmt. Ein Bestandteil der Arbeiten war die Harmonisierung der vorhandenen Korrekturmodelle. Auf diese Arbeiten wird nicht näher eingegangen, ein Beispiel jedoch in Abb. 5 gegeben.

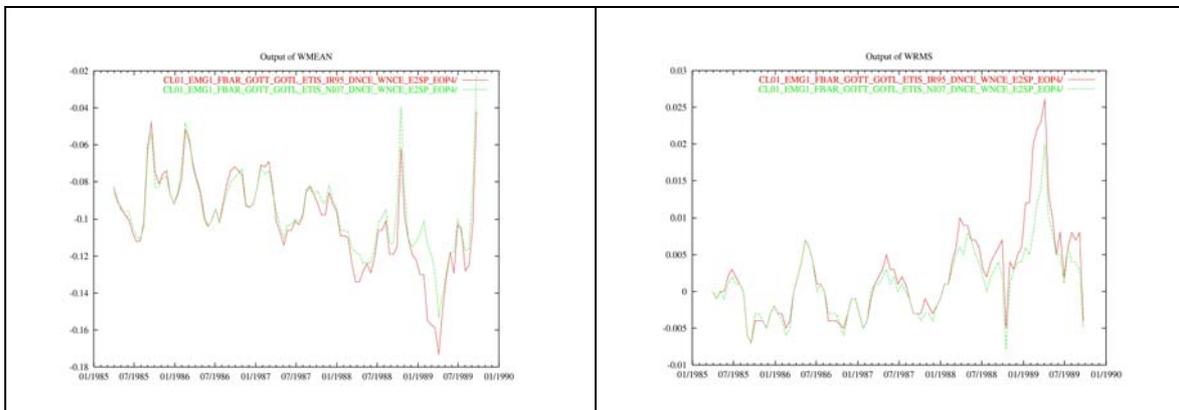


Abb. 5: Beispiel für unterschiedliche Korrekturmodelle für den GEOSAT. Zeitlicher Verlauf des global gemittelten Meeresspiegels (links) und der zugehörigen Standardabweichung (rechts) für zwei verschiedene Korrekturen der ionosphärischen Laufzeitverzögerungen – IRI95 (rot) und NI07(grün) (Remko Scharroo, Altimetrics LLC). Durch die Wahl der Korrektur ändern sich zeitlicher Verlauf und Trend des mittleren Meeresspiegels.

Eine zweite Methode, die in SEAVAR Anwendung fand, ist die Analyse von Kreuzungspunkt-differenzen. Hierbei wird ausgenutzt, dass der mittlere Meeresspiegel im Kreuzungspunkt einer aufsteigenden und absteigenden Bahn bei hinreichend kleiner Zeitdifferenz (<5 Tage) überwiegend nur durch zu korrigierende Prozesse (Gezeiten, Wind- und Seegangseinfluss, Ionosphäre, Troposphäre) verändert wird. Durch die Analyse der Vielzahl vorhandener Kreuzungspunkte wird eine statistisch signifikante Aussage zur Qualität verschiedener Modelle (z.B. Orbit, Sea State Bias) möglich. Insbesondere findet diese Methode bei der iterativen Verbesserung der Satellitenbahnparameter Anwendung.

Für das Projekt SEAVAR sind die langfristigen Meeresspiegelrends von besonderer Bedeutung. Neben der Stabilität des Referenzsystems ist hierfür bei den neueren Altimetern auch die Korrektur von Driften der Radiometermessungen (wet troposphere correction) von großer Bedeutung. Diese wurden nach einem Verfahren von Scharroo et al. (2004) korrigiert. Frühere Analysen des GFZ zur Bedeutung der einzelnen Korrekturmodelle für die Genauigkeit der durch die RA ableitbaren Meeresspiegeländerungen, z.B. beim TOPEX/Poseidon, zeigen die Notwendigkeit eine Bearbeitung der sog. „sea state bias“ (SSB) Korrektur. Die Wahl der Parametrisierung bestimmt dabei die Qualität der Korrektur, jedoch sind die Ergebnisse durch Signifikanzuntersuchungen zu unterlegen. Eine Überparametrisierung kann ein Ergebnis scheinbar verbessern, jedoch zeigen sich wegen der Bindung der Korrektur an Wind- und Seegangparameter negative Effekte in mittleren südlichen Breiten. Für SEAVAR wurde deshalb ein optimiertes Modell gewählt und die Parameter für jede Mission mittels Kreuzungspunktanalysen anhand optimierter Datensätze über den gesamten Missionszeitraum abgeschätzt. Die Untersuchungen zeigen weiter, dass die in den SSB einfließenden Werte für Wind und signifikante Wellenhöhe für einige Missionen nicht stabil sind. Wegen der fehlenden Vergleichsdaten ist dieser Effekt derzeit allerdings weder verifizierbar noch korrigierbar.

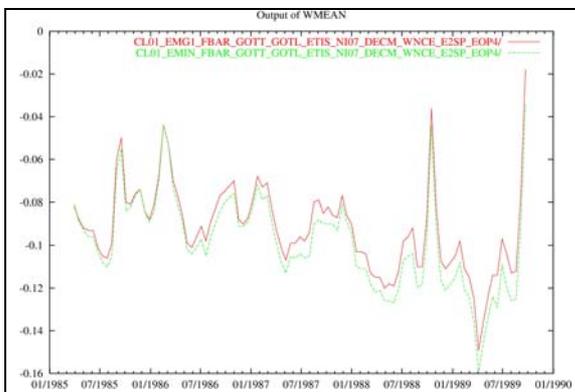


Abb. 6a: Meeresspiegelrends in [m] gegen ein mittleres Meeresspiegelmodell (CLS2001) berechnet mit der internen Korrektur des „sea state bias“ (EMIN, grün) und einer im Rahmen von SEAVAR berechneten Korrektur (EMG1, rot). Mit der neuen Korrektur wird der Trend um 3mm/Jahr verändert.

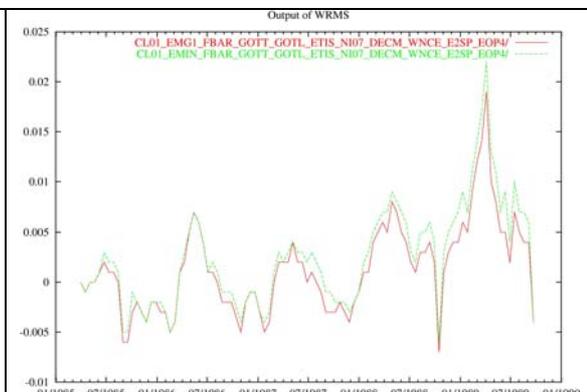


Abb. 6b: RMS des Meeresspiegelrends in [m] gegen ein mittleres Meeresspiegelmodell (CLS2001) berechnet mit der internen Korrektur des „sea state bias“ (EMIN, grün) und einer im Rahmen von SEAVAR berechneten Korrektur (EMG1, rot). Die neue Korrektur zeigt eine geringere Streuung.

Im Rahmen der Harmonisierung der Altimetermissionen wurden verschiedene neue Korrekturmodelle (z.B. Ionosphären- und Gezeitenmodelle) implementiert und untersucht. Diese wurden insbesondere unter dem Aspekt der Harmonisierung mit den bei der Schwerfeldableitung genutzten Standardmodellen analysiert.

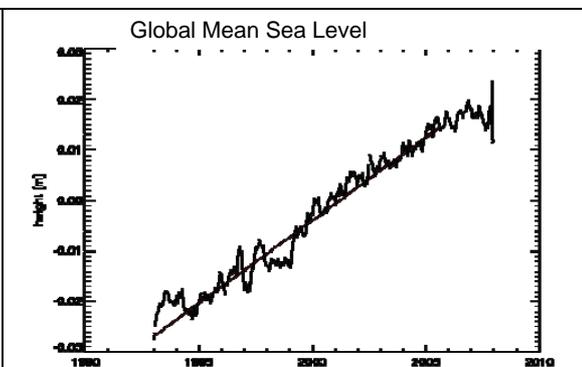
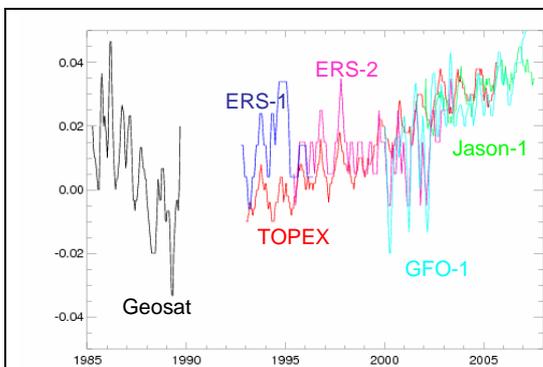


Abb. 7: Auf der konsolidierten und harmonisierten Altimeterdaten wurden verbesserte Zeitreihen der globalen Meeresspiegeländerungen geschätzt und Modelle der zeitlichen Entwicklung der Meeresspiegelanomalien an das AWI abgegeben.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen für GEOSAT stand immer wieder die Ableitung geeigneter SSB-Modelle. Die Wahl der Korrekturmodelle und der Orbitmodelle (über geographisch korrelierte Fehler in den Schwerefeldmodellen) führt zu Aufdatierungen. Hierbei zeigt sich wiederum, wie schon beim TOPEX/Poseidon, die Abhängigkeit der Berechnung des Meeresspiegeltrends von der Wahl der SSB-Korrektur. Für den GEOSAT sind die Auswirkungen trotz wegen der kürzeren Missionszeit gleichfalls signifikant. So wird der lineare Meeresspiegeltrend um 3mm/Jahr verändert (Abb. 6a). Zugleich zeigt Abb. 6b, dass die neue SSB-Korrektur zu einer Verringerung des Rauschen (RMS) führt.

In SEAVAR konnten die Satellitenbahnen verschiedener Satelliten neu berechnet werden. Auf der Basis der Ergebnisse der Harmonisierung der Korrekturen wurden die Offsets gegen ein Basismodell (Mittleres Meeresspiegelmodell des CLS) berechnet (Abb. 7 und 8). TOPEX/Poseidon und JASON-1 zeigen ein sehr ähnliches Bild eines mittleren globalen Meeresspiegelanstieges. Hier konnten die Missionen verknüpft werden. Die Missionen des ERS lassen sich nicht ohne weiteres auf diese Basis übertragen. Ursachen sind hier das unterschiedliche Abtastverhalten (35-Tage Orbit statt 10-Tage Orbit), aber auch Einflüsse, wie z.B. der sonnensynchrone Orbit der ERS-Satelliten. Hierdurch werden insbesondere nichtmodellerte Signale in Ionosphärenmodellen und Gezeitenmodellen dominant.

Die Kombination der Missionen wird durch den Trend von TOPEX/Poseidon und JASON-1 dominiert. Durch die lange Zeitreihe von 15 Jahren gelten die Ergebnisse des globalen Meeresspiegelanstieges von rund 3 mm/Jahr nunmehr als gesichert. Von Interesse sind aber regionale Unterschiede und die Entwicklung der Variabilitäten, wie sie im Projektteil des AWI weiterverwendet werden.

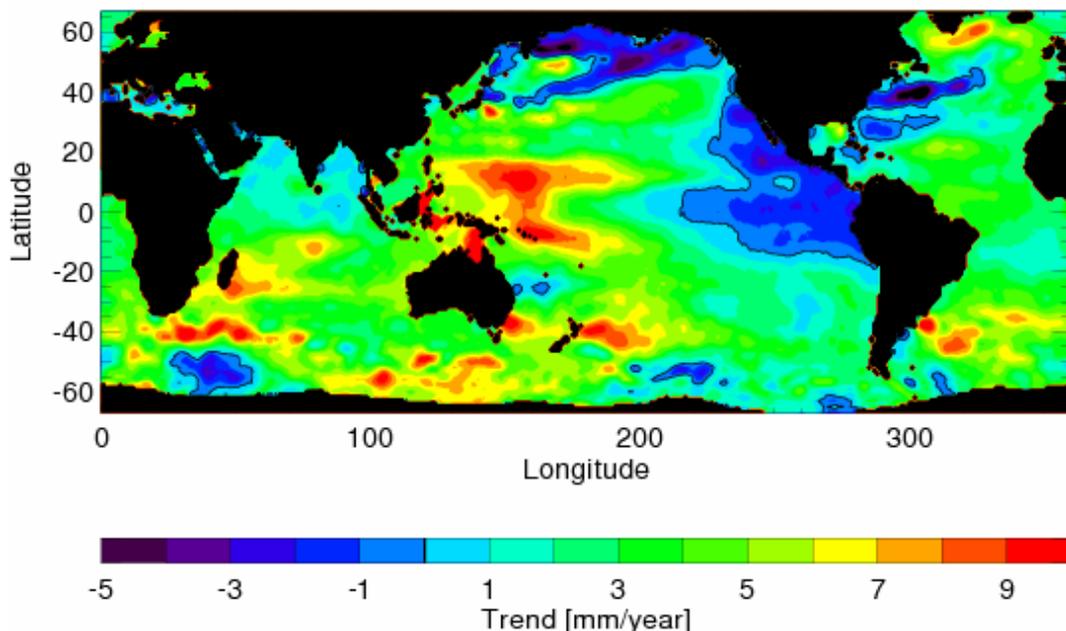


Abb. 8: Meeresspiegeltrend (1993-2007) geschätzt aus der Kombination von TOPEX und JASON-1

Rekonstruktion der Meeresspiegelanomalien

Die verfügbaren GPS-Daten wurden einer genauen Qualitätsanalyse unterworfen. Bei einem großen Teil der verfügbaren GPS-Zeitreihen an Pegeln war die Qualität der Messungen nicht ausreichend für eine Verwendung. Vielfach war die Länge der Zeitreihe nicht ausreichend (Blevitt und Lavallé (2002) empfehlen eine Zeitreihenlänge von mindestens 2,5 Jahren); des Weiteren musste oft eine Korrektur von Sprüngen und Lücken (wegen Antennenwechsels o.ä.) in den

Zeitreihen erfolgen. Da eine vollständig automatisierte Evaluierung und Korrektur der Zeitreihen nicht möglich ist bzw. keine verlässlichen Ergebnisse erbringt, wurde im Rahmen des Projektes ein Programm zur computergestützten Sichtung und Korrektur der GPS-Zeitreihen entwickelt. Als ein weiteres Hindernis erwies sich das Fehlen konsistenter Angaben zum Nivellement zwischen Pegeln und GPS-Stationen, da diese Informationen von den Stationsbetreibern zum großen Teil nicht dokumentiert werden.

Für die Erstellung der Rekonstruktion der Meeresspiegelanomalien wurden verschiedene Rekonstruktionsalgorithmen untersucht und verglichen (Smith (1996), Kaplan et al. (1998, 2000), Schneider (2001), Beckers und Rixen (2003), Kondrashov and Ghil (2006)). Es wurde entschieden, die Methode von Kaplan et al. („Optimal Interpolation“) zu verwenden, da diese in Anbetracht der Datenlage (kurze Zeitreihen globalen Umfangs aus RA-Messungen in Kombination mit langen Zeitreihen punktueller Messungen an Pegeln) die besten Ergebnisse verspricht. Bei Testreihen wurde eine Abhängigkeit der Ergebnisse von der geographischen Verteilung der verwendeten Pegel beobachtet, die zuvor zwar bereits von Experten (Chambers 2002) vermutet, aber bisher nicht nachgewiesen worden war. Aus dieser Abhängigkeit ergeben sich einige Schwierigkeiten für die Rekonstruktion. So ist etwa ein adaptives Einsetzen von Pegelstationen, die nur für einen begrenzten Zeitraum verfügbar sind, nicht möglich. Damit verringert sich die Anzahl der möglichen Pegelstationen für eine langjährige Rekonstruktion massiv, da nur solche Zeitreihen verwendet werden können, die über die gesamte Dauer verfügbar sind. Pegelzeitreihen, die etwa nur einige Jahre des Gesamtzeitraumes abdecken, können somit nicht berücksichtigt werden. Des Weiteren muss auf eine geographisch ausgeglichene Verteilung der verwendeten Pegelstationen geachtet und die Stabilität der verwendeten Konfiguration überprüft werden. Vernachlässigt man diesen Einfluss, kann dies zu massiven Schwankungen sowohl im rekonstruierten Jahresgang als auch im Trend führen (Abb. 9). Besonders stark sind dabei Gebiete im indischen Ozean und im Pazifik betroffen, da dort bei Auftreten des El Niño – bzw. IOD-Phänomens starke Schwankungen im Meeresspiegel auftreten.

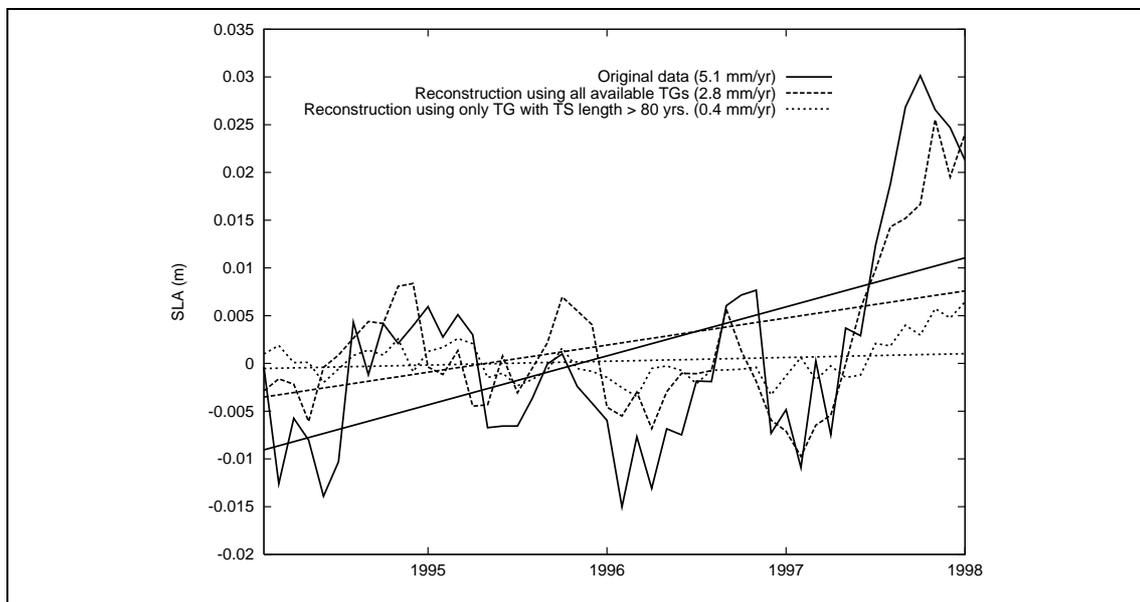


Abb. 9: Einfluss der geographischen Lage der in einer Rekonstruktion verwendeten Pegel auf den Trend. Gezeigt wird der Vergleich zwischen den Originaldaten aus Altimetriemessungen und zwei verschiedenen Pegelkonfigurationen in einer regional begrenzten Beispielrekonstruktion.

Des Weiteren werden nur solche Pegel verwendet, bei denen eine starke Korrelation mit den Altimeterdaten aus dem gemeinsamen Messzeitraum beobachtet werden kann. Auf diese Weise wird verhindert, dass Daten von Pegeln verwendet werden, die das Verhalten des umgebenden offenen Meeres nicht wiedergeben können (dies etwa, weil sie in einer Flussmündung oder einer abgeschlossenen Bucht liegen). Dies entspricht den Empfehlungen von Douglas (2001).

Das hier gezeigte Beispiel (Abb. 10) verwendet 18 Pegel, für die GPS-Korrekturen aus dem TIGA-Netzwerk (Tabelle 1) vorliegen, sowie weitere drei Pegel ohne GPS-Korrekturen (La Libertad 2 (PSMSL ID 845/012), Pt. La Rue (PSMSL ID 442/007), Unalaska (PSMSL ID 820/021)) zur Stabilisierung der Rekonstruktion. Für diese Pegel ist im PSMSL Archiv (Woodworth and Player 2003) eine 15-jährige Zeitreihe (1987-2001) verfügbar, kleinere Lücken wurden korrigiert (LOCF-Methode). Die GPS-Korrektur wird hier jeweils für den gesamten Rekonstruktionszeitraum angebracht. Es wird derzeit geprüft, ob es in Einzelfällen sinnvoll sein kann, den Korrekturzeitraum individuell zu variieren, wenn etwa der Startzeitpunkt einer Landbewegung (z.B. Beginn der Förderung von Öl bzw. Gas im Umkreis des Pegels) zeitlich genauer eingrenzbar ist.

Breite	Länge	Stations- name	GPS ID	PSMSL ID	Entfernung (m) to TG	GPS Trend [mm/a]	Länge vertikaler Trend	Länge der GPS Zeitreihe [Jahre]	Anzahl Epochen	WRMS der Höhe [mm]
57.14	357.92	Aberdeen	ABER	170011	10	-0.28	6.69	308	308	6.87
48.39	236.51	Albert Head	ALBH	822101	12000	-2.31	6.69	308	308	9.22
53.56	6.75	Borkum	BORK	140015	750	-1.00	5.15	270	270	7.3
48.38	355.50	Brest	BRST	190091	350	-0.72	6.96	315	315	7.02
-21.20	200.20	Cook Island	CKIS	785001		3.78	4.3	208	208	7.18
6.23	102.11	Geting	GETI	550021	5	5.62	3.72	141	141	7.42
1.35	172.92	Kiribati	KIRI	730008		2.04	3.42	164	164	7.53
4.19	73.53	Maldives	MALD	454011	5	1.80	5.31	183	183	10.7
		Mar del Plata	MPLA	860101	5	-2.26	3.24		128	7.67
-38.04	302.47	Cananea	NEIA	874051	10	-2.03	3.2	132	132	9.25
-25.02	-47.93	P-Ofunato	P205	642022	1	0.00	2.28	116	116	6.56
39.02	141.75	Pohnpei	POHN	710031		5.22	2.67	138	138	6.65
6.96	158.21	Sheerness	SHEE	170101	10	-0.48	6.69	308	308	6.63
51.45	0.74	St. John's	STJO	970121	5000	-1.19	6.96	347	347	8.53
47.60	307.32	Torshavn	TORS	015/011	2110	-2.49	4.37	206	206	4.99
62.02	353.24	Tuvalu	TUVA	732011		1.24	4.05	181	181	5.83
-8.53	179.20	Valparaiso	VALP	850033	25	-6.45	3.51	59	59	9.81
-33.03	288.37	Wellington	WGTT	690012	800	-1.54	6.04	309	309	7.37

Tabelle 1: Die in der Rekonstruktion verwendeten Pegelstationen mit jährlichen vertikalen Trends und Streuung (gewichteter RMS/WRMS).

Für die Berechnung der EOFs werden Altimetriedaten aus der TOPEX-Mission von 1995-2001 verwendet. Für die Rekonstruktion werden die ersten 25 EOFs verwendet, die mehr als 91% der globalen Variabilität in diesem Zeitraum ausmachen. Abb. 10 zeigt den Vergleich der GPS-korrigierten Rekonstruktion mit einer Rekonstruktion, die die Landbewegung durch Verwendung eines GIA-Korrekturmodells (Peltier 2004) berücksichtigt, sowie mit den Originaldaten aus der TOPEX-Mission für Februar 2008. Die dominanten Signale sind hier die doppelte zungenförmige positive Anomalie im östlichen Pazifik, die aus dem El Niño 1997/98 resultiert, sowie das IOD (Indian Ocean Dipole) Event mit einer stark positiven Anomalie im Indischen Ozean und der zugehörigen negativen Anomalie um Indonesien und die westlichen Pazifikinseln. Beide Rekonstruktionen geben die Originaldaten gut wieder, die RMS liegen bei 3.46 cm (GPS-Korrektur) bzw. 3.92 cm (GIA-Korrektur).

Die GPS-korrigierte Version kann die negativen Anomalien östlich von Japan und um die westlichen Pazifikinseln herum besser reproduzieren. Weiterhin wird die Intensität des El Niño Signals genauer wiedergegeben. Die GIA-korrigierte Version überschätzt die positiven Anomalien im Nordpazifik und zeigt mehr Artefakte im Raum um Neuseeland.

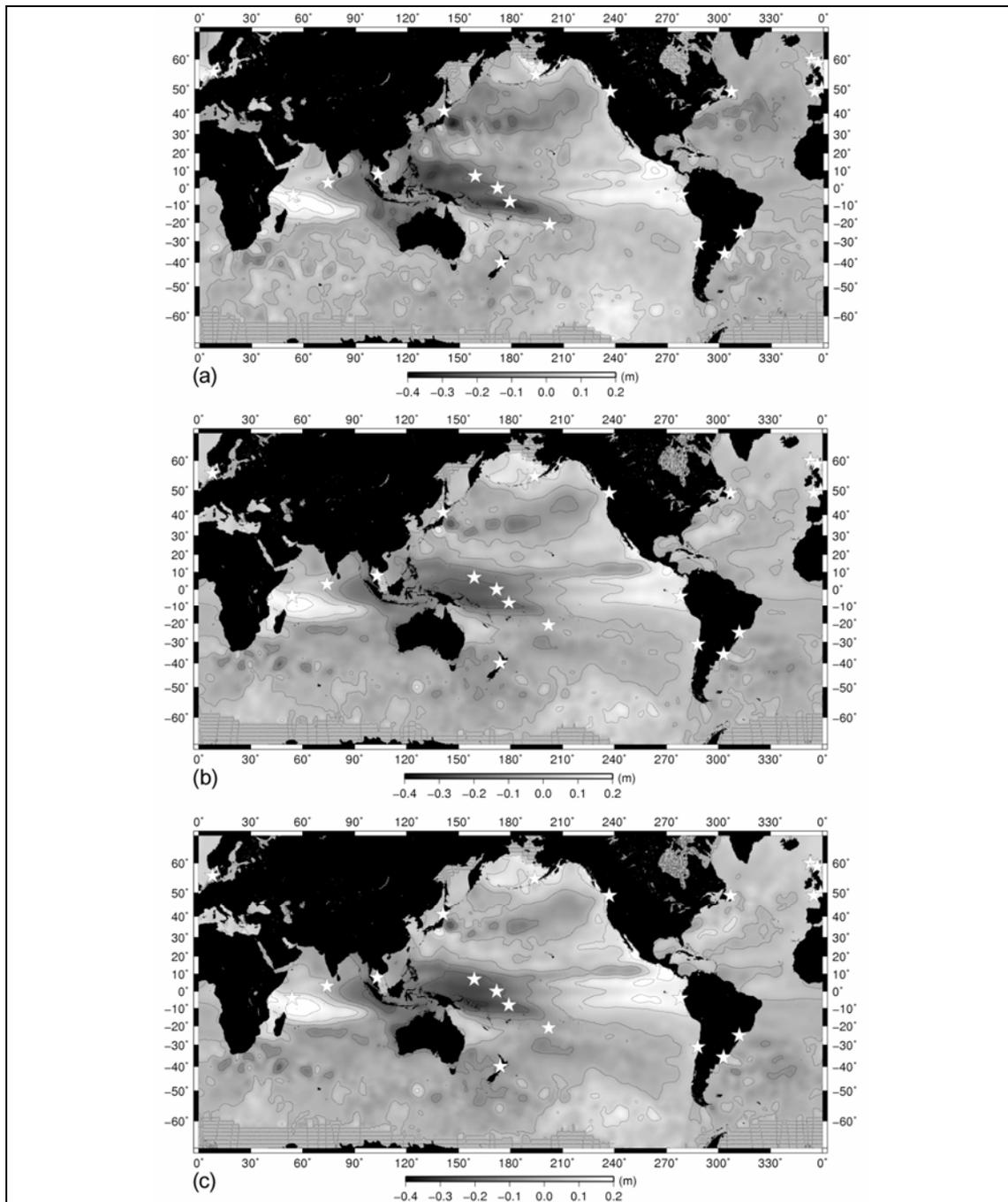


Abb. 10: Vergleich der Originaldaten aus TOPEX-Altimetriemessungen (a) für Februar 1998 mit zwei Rekonstruktionen, die GPS-Korrekturen (b) bzw. GIA-Korrekturen (c) verwenden. Die in der Rekonstruktion verwendeten Pegel sind durch Sterne gekennzeichnet.

Im Rahmen der Dissertation von Frau Schön (wg. Elternzeit Fertigstellung erst 2009) wird derzeit eine umfangreichere Konfiguration von Pegeln zusammengestellt, für die lange Zeitreihen verfügbar sind und bei der gleichzeitig die Stabilität der Rekonstruktion gewährleistet ist.

Abb. 11 zeigt den Meeresspiegeltrend für den Zeitraum 1995-2001 aus den verschiedenen Rekonstruktionen. Im Gegensatz zum monatlichen Vergleich ist die relative Verbesserung durch die GPS-Korrekturen im Vergleich mit der GIA-korrigierten Version ist im globalen Mittel hier nicht zu erkennen. Der Vergleich mit dem aus den Originaldaten erstellten Trend fällt jedoch sehr gut aus (2.3mm/a bzw. 2.4 mm/a).

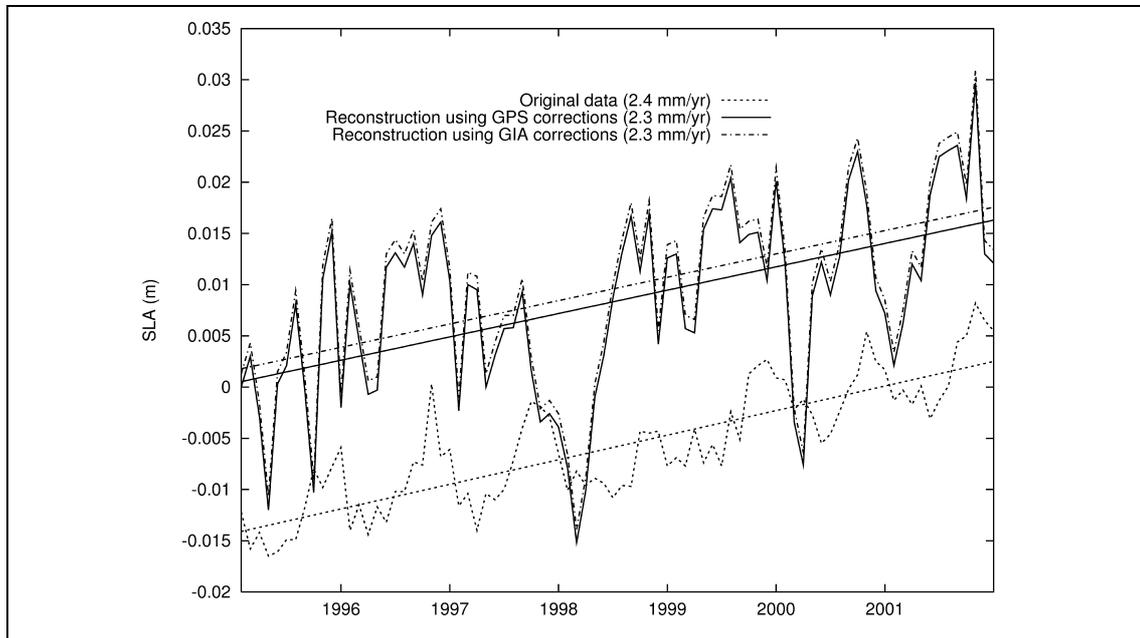


Abb. 11: Globaler Meeresspiegeltrend im Vergleich zwischen den Originaldaten aus Altimetriemessungen und zweier GPS- bzw. GIA-korrigierten Beispielrekonstruktionen mit 18 PSMSL-Pegeln.

Analyse der Massenänderungen

Ausgehend von den vom GFZ bereitgestellten monatlichen Schwerefeldkoeffizienten wurden Karten monatlicher Massenänderungen im Ozean für den Zeitraum von Herbst 2002 bis Ende 2007 erstellt. Als kritisch erwies sich die Wahl der räumlichen Filterung, da die GRACE-Daten erhebliches Rauschen aufweisen. Durch Anwendung spezieller Filter (Swenson und Wahr, 2006) zusätzlich zu einem klassischen Gaußfilter konnten räumliche Skalen bis zu einer Filterhalbwertsbreite von 500km aufgelöst werden. Für die Kombination mit JASON-1 Altimeterdaten wurden diese entsprechend räumlich geglättet.

Da sich die Altimeterdaten auf den geometrischen Mittelpunkt, die GRACE-Daten aber auf den Massenschwerpunkt der Erde beziehen, wurden zwei verschiedene Datensätze der so genannten Geozentrumsverschiebung auf Basis von GPS- und SLR-Daten getestet. Beide Zeitreihen weichen erheblich voneinander ab, und es war nicht möglich eine Verbesserung der Konsistenz zwischen Altimetrie und Gravimetrie bei Verwendung einer der Geozentrumskorrekturen nachzuweisen. Folglich ist eine Korrektur der Geozentrumsbewegungen zwar nötig, aber aufgrund der Qualität der derzeitig verfügbaren Daten nicht sinnvoll.

Um die Genauigkeit der aus GRACE-Daten abgeleiteten Massenkomponente des Meeresspiegels abzuschätzen, wurde sie mit einer Kombination aus Altimeterdaten mit der aus ARGO-Driftern abgeleiteten sterischen Komponente verglichen. Dabei zeigten sich Inkonsistenzen zwischen den beiden Datensätzen der Massenänderungen. Die Ursachen hierfür werden zurzeit noch genauer untersucht. Da die Massenänderungen im Ozean nach den derzeitigen Untersuchungen noch am Rande der Messgenauigkeit liegen, wurde auf eine Rekonstruktion der Massenkomponente vorerst verzichtet.

Ein Ziel des SEAVAR Projektes war die Modellierung regionaler und globaler Meeresspiegeländerungen für einen Zeitraum von 20 und mehr Jahren, um die Lücke zwischen den GEOSAT- und TOPEX/Poseidon-Missionen mit Hilfe eines Ozeanmodells und Datenassimilation dynamisch konsistent zu schließen. Dazu wurden zwei Assimilationsexperimente, GETO und GETORC, für den Zeitraum 1987-2000 durchgeführt. Beide Experimente nutzen die Altimetermessungen sowohl von TOPEX/Poseidon als auch von GEOSAT, wobei die GEOSAT Daten nur als Anomalien bekannt sind. Um die Informationslücke zwischen den beiden Satellitenmissionen in dynamisch konsistenter Weise zu schließen, werden zusätzlich hydrographische Daten assimiliert.

In dem Experiment GETO zeigte sich, dass die Entwicklung des globalen Meeresspiegels im Vergleich zu unabhängigen Daten (z.B. Church und White, 2006) nicht befriedigend wiedergegeben werden kann (Abb.12). Dahingegen wird der rein sterische, aus der Erwärmung des Ozeans resultierende Anteil aber gut reproduziert. Dies wird deutlich, wenn man den Wärmehaushalt des Ozeans mit den Daten von Levitus (2005) vergleicht (Abb.13). Das Defizit in der Entwicklung des totalen Meeresspiegels ist also im Frischwasserhaushalt des Ozeans begründet. Ohne kontinuierliche Informationen zur die Entwicklung des Meeresspiegels über den gesamten Assimilationszeitraum kann der Frischwasserhaushalt nicht verlässlich bestimmt werden. Die hydrographischen Daten allein reichen dafür nicht aus.

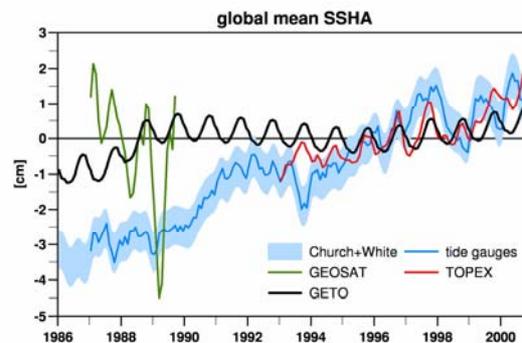


Abb. 12: Global gemittelte Meeresspiegelanomalien des Assimilationsexperiments GETO im Vergleich zu den benutzten Satellitendaten. Da die GEOSAT Daten nur Anomalien ohne bekannte Referenz darstellen, wurde die entsprechende Kurve so adjustiert, dass sie denselben zeitlichen Mittelwert wie die Modelllösung hat. Zum Vergleich sind außerdem die von Church und White (2006) aus Pegelmessungen rekonstruierten Daten (blaue Kurve) zusammen mit ihren Fehlerbalken (hell blaue Schattierung) dargestellt.

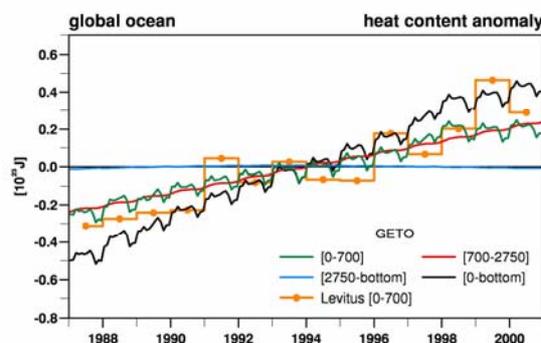


Abb.13: Zeitliche Entwicklung der Anomalie des globalen Wärmehalts des Ozeans für die Tiefenbereiche [0-700m], [700-2750m] und [2750m-bottom]. Die entsprechenden Jahresmittelwerte aus Levitus et al (2005) für die oberen 700m sind ebenfalls dargestellt (orange Stufenkurve).

Deshalb wurden in dem Experiment GETORC zusätzliche Informationen über den Meeresspiegel assimiliert, die aus Pegelmessungen gewonnen wurden. Mit Hilfe der von Church et al. (2004) vorgestellten EOF Methode wurden aus den Pegelmessungen Karten der Meeresspiegelanomalien für den gesamten Zeitraum 1987-2000 gewonnen und zusätzlich zu den aus der Altimetrie gewon-

nenen Daten assimiliert. In diesem Experiment ist es möglich die Entwicklung des Meeresspiegels zufrieden stellend wiederzugeben (Abb.14), wobei die Entwicklung des Wärmehaushalts noch leicht verbessert wird (Abb.15). GETORC liefert damit auch Antworten auf die Frage nach der zeitlichen und räumlichen Variabilität des Meeresspiegels und seiner Bestandteile sowie deren relative Wichtung: In dem untersuchten Zeitraum ist der globale Meeresspiegel mit einer Rate von etwa 3mm/Jahr angestiegen, wobei etwa ein Drittel aus der sterischen Ausdehnung resultiert.

Dabei ist etwa die Hälfte der sterischen Ausdehnung bedingt durch die Erwärmung der oberen 700m des Ozeans, was in guter Übereinstimmung mit den Analysen von Levitus (2005) ist. Die andere Hälfte resultiert zu gleichen Teilen aus einer Erwärmung des tiefen Ozeans sowohl oberhalb als auch unterhalb von 2250m. Wir diagnostizieren also auch für den tiefen Ozean eine starke Erwärmung, die aus den nur spärlich vorhandenen hydrographischen Daten allein nicht abzuleiten wäre. Zusätzlich zu der durch die Erwärmung des Ozeans bedingten Änderung des Meeresspiegels finden wir einen Anstieg von etwa 2mm/Jahr (Abb.16), der durch einen verstärkten Eintrag von Süßwasser in den Ozean bedingt ist. Im Vergleich zu früheren Arbeiten liegt dieser Wert zwar an der oberen Grenze wird aber durch neuere Analysen von Jevrejeva et al. (2008) gestützt. Ein weiteres Ergebnis der Assimilation ist, das der Jahresgang im global gemittelten Meeresspiegel nahezu vollständig auf entsprechende Variationen im Frischwassereintrag zurückzuführen ist (Abb.16). Zusammenfassend kann man sagen, dass wir eine relative Referenz zwischen den Satellitenmissionen von GEOSAT und TOPEX/Poseidon gefunden haben, die physikalisch plausibel ist und mit den hydrographischen Daten sowie den Pegelmessungen übereinstimmt.

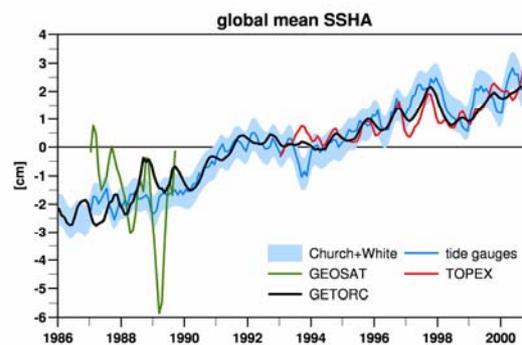


Abb. 14: Wie Abb.1 jedoch für das Experiment GETORC. In diesem Experiment wurden zusätzlich die aus Pegelmessungen rekonstruierten Felder des Meeresspiegels assimiliert!

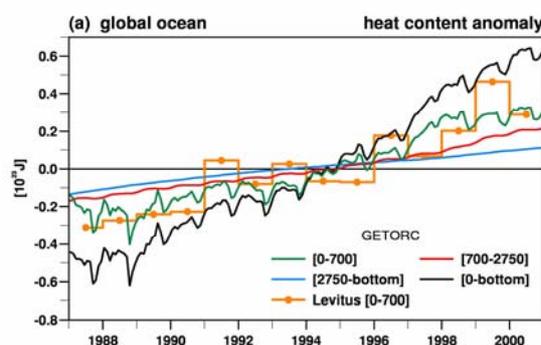


Abb. 15: Wie Abb.13 jedoch für das Experiment GETORC bei dem aus Pegelmessungen bestimmte Meeresoberflächen zusätzlich assimiliert wurden.

Ein wichtiges Teilziel des Projekts war die Ableitung des Meeresspiegels auf globalen wie auch regionalen Skalen für die vergangenen 100 Jahre. Hierfür wurde ein neu entwickeltes Verfahren auf Basis von neuronalen Netzen angewandt. Haupthindernis dabei ist die Tatsache, dass Wasserstandsmessungen nur an wenigen Orten über längere Perioden gemessen wurden.

Zur Berechnung wurde zunächst die zeitliche Entwicklung des regional gemittelten Meeresspiegels für den Zeitraum 1900-2007 direkt aus Pegelmessungen abgeleitet. Zur Bestimmung wurde ein entsprechend konstruiertes neuronales Netz benutzt. Als Eingangsdaten wurden nur die Pegelstationen ausgewählt (Abb.16), an denen für mindestens 50 Jahre Daten vorhanden sind. Die für das Training des neuronalen Netzes benötigten Zieldaten lieferten die vom GFZ aufbereiteten TOPEX/Poseidon Daten. Als unabhängige Alternative wurden auch die entsprechenden vom CSIRO auf ihrer Webseite zur Verfügung gestellten Daten benutzt. Aus Abb.17 erkennt man deutlich, dass die Entwicklung der regionalen Mittel stark von dem verwendeten Zieldatensatz abhängt. Dies gilt vor allem in dem Zeitraum, der nicht für das Training des neuronalen Netzes herangezogen wurde. Für das globale Mittel ist die Abhängigkeit von der Wahl des Zieldatensatzes geringer. Insgesamt ergibt sich ein Anstieg des globalen Meeresspiegels mit einer Rate von etwa 1.7mm/Jahr, was gut mit den bisherigen Schätzungen von Church und White (2006) oder Jevrejeva et al. (2006) übereinstimmt.

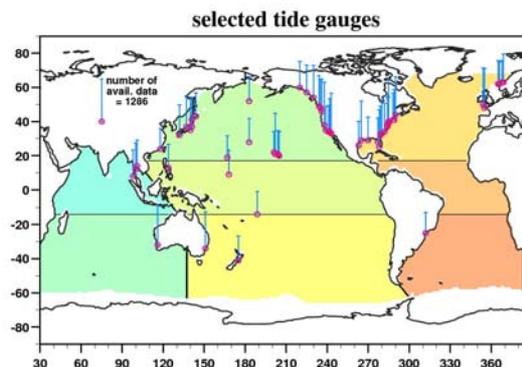


Abb. 16: Position der zur Berechnung der mittleren Meeresspiegel ausgewählten Pegelstationen. Die Länge der vertikalen Balken gibt die jeweilige Anzahl der im Zeitraum [1900-2007] zur Verfügung stehenden Daten wieder. Die farblichen Schattierungen repräsentieren die Regionen des Ozeans, für die die Entwicklung des mittleren Meeresspiegels bestimmt wurde.

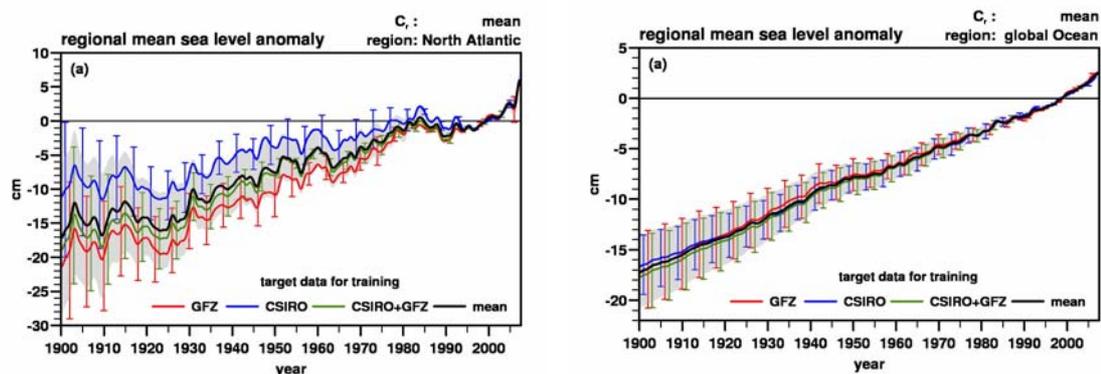


Abb. 17: Zeitliche Entwicklung des regional gemittelten Meeresspiegels für den Nordatlantik (links) und den globalen Ozean (rechts) in Abhängigkeit von dem zum Training des neuronalen Netzes benutzten Altimeterdatensatzes.

Der Zusammenhang zwischen altimetrisch gemessener Meeresoberfläche und den aus der Dichteänderung im Ozean abgeleiteten Meeresspiegeländerungen wurde in einem Teilprojekt genauer betrachtet. Hierzu wurden die neuartigen, autonomen Tiefendriftkörper des ARGO Programms ausgewertet. Als Region wurde dazu der Nordatlantik ausgewählt, für den zahlreiche Messungen vorliegen und für den großen ozeanographischen Hintergrundwissen besteht. Die ARGO-Messungen zwischen 1999, dem Beginn des Programms, und 2007 wurden mit Hilfe der objektiven Analyse zu dreidimensionalen Jahresmitteln zusammengefasst. Die Jahresmittel erlauben die Berechnung der Dichteanomalien und damit der sterischen („dynamischen“) Meerestopographie. Die mit dem Altimeter gemessene Topographie ist die Summe aus der sterischen und

der durch Massenverlagerung oder Zufuhr verursachten Meereshöhe. In Abbildung IV.1 wird die erste empirische Komponente der aus ARGO berechneten sterischen Höhe dargestellt. Die Variationen sind in einem für den Nordatlantik typischen Muster angeordnet, dass mit der Nordatlantischen Oszillation (NAO) verknüpft ist. Hier ist vor allem ein ansteigender Trend sichtbar.

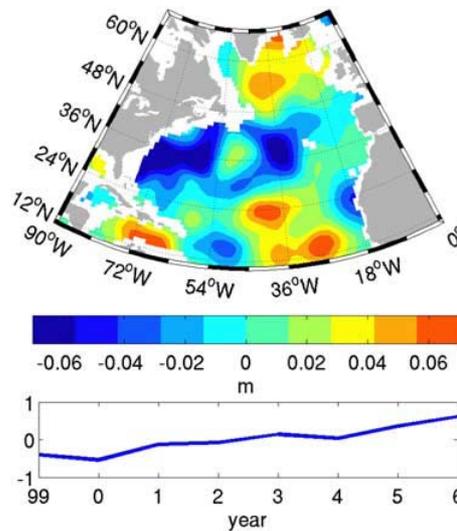


Abbildung IV.1 Erster EOF der sterischen Ausdehnung des Ozeans im Nordatlantik. Die zugehörige Zeitreihe von 1999 bis 2006 (unten) zeigt, dass die zwischenjährliche Variabilität hauptsächlich durch einen Trend erzeugt wird.

Die Analyse der zugehörigen Zeitreihe aus Altimeterdaten zeigt in der ersten Komponente eine großskalige interannuale Schwingung an. Erst die zweite Komponente, rechts in Abbildung IV.2 dargestellt zeigen weitgehend den gleichen Verlauf und das gleiche Muster wie die sterischen Signale. Die erste Komponente ist demnach nicht sterisch bedingt und stellt eine barotrope Schwingung dar, die sich im Bodendruck abzeichnet.

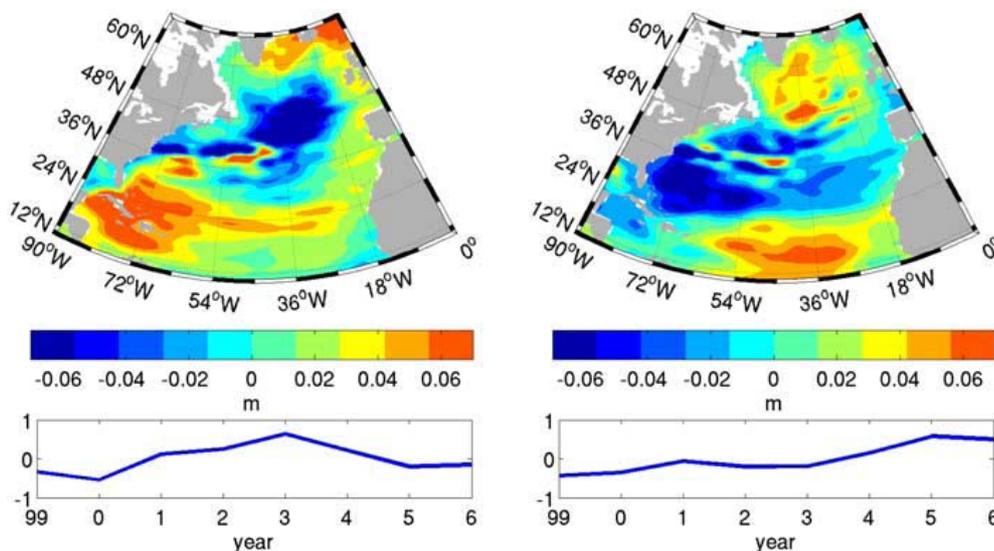


Abbildung IV.2 Die ersten beiden EOF's der Meeresoberfläche, berechnet aus Altimeterdaten. Die zugehörigen Zeitreihen sind im unteren Bildabschnitt dargestellt. Die größte Varianz wird durch eine nahezu dekadische Schwingung beschrieben. Der Trend ist zweitrangig und offenbar eng mit dem Trend der sterischen Ausdehnung verknüpft.

Vergleicht man die Trends regional, so fällt vor allem eine hohe räumliche Variabilität auf. Um zu signifikanten Aussagen zu gelangen, mitteln wir die Trends zonal. In Abbildung IV.3 wird dies Ergebnis zusammengefasst. Das Altimetersignal (rote Linie) wird zum großen Teil, jedoch nicht ganz, von den sterischen Trends verursacht (blaue Linie). In den mittleren Breiten sehen wir einen

Abfall des Meeresspiegels, im Norden und in Äquatornähe dagegen ein Anstieg. Sterische Effekte, wenigstens die bis in 1000 Meter Tiefe, reichen zur Erklärung der Ozeanvariabilität auf großen Zeit und Raumskalen nicht aus.

Das Altimeter stellt damit keinen guten Proxy für den Wärmehalt des Ozeans dar. Nur in einer Zusammenschau mit Schwerfeldmessungen lassen sich Aussagen treffen. Allerdings spielt auch der Salzgehalt bei regionalen Trends eine große Rolle. In vielen Regionen, wie im Nordatlantik, kompensiert er einen Teil der Wärmeausdehnung. Eine Temperaturabschätzung aus Altimetrie ist daher leicht eine Unterschätzung.

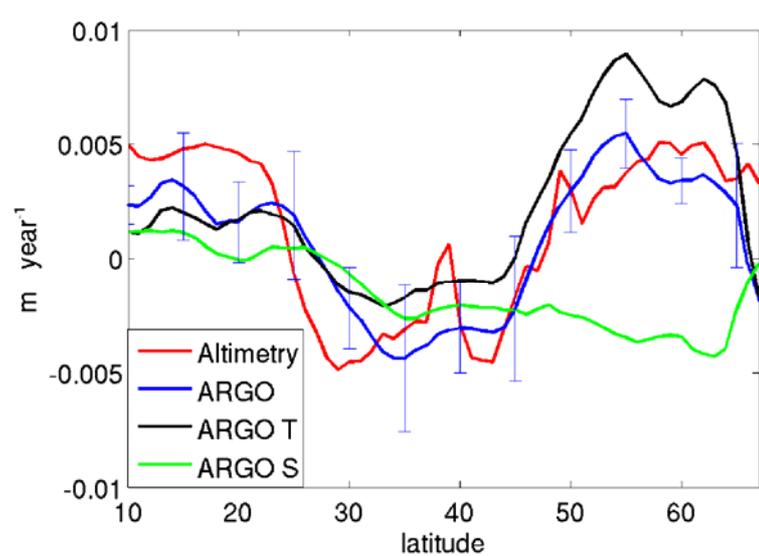


Abb. IV.3 Der zonal gemittelte Trend der Meeresoberfläche im Nordatlantik zwischen 1999 und 2006. Das Gesamtsignal aus dem Altimeter ist rot dargestellt. Deutliche Anstiege gibt es im Norden und am Äquator, während in mittleren Breiten ein Abfall des Meeresspiegels beobachtet wird. Die blaue Linie stellt die sterischen Trends im Meeresspiegel dar, aufgeteilt in die Wärmeausdehnung (schwarz) und Salzgehaltänderung (grün).

Satelliten-Altimetriemessungen und hydrographische Daten von Tiefendriftern (ARGO) wurden mit Hilfe eines inversen Finite-Elemente Ozean-Zirkulations Modells kombiniert um die Zirkulation im Nordatlantik abzuleiten. Die Analysen wurden für verschiedene Jahre durchgeführt. Dabei stimmen die modellierten Temperatur- und Salzgehaltfelder im optimalen Sinn mit den ARGO Daten überein, die entsprechende Zirkulation erfüllt zusätzlich die Forderung einer kleinst möglichen Abweichung zu den Altimetriemessungen der Meeresoberflächenauslenkung. Die Auswirkungen der einzelnen Datensätze auf die Modellergebnisse wurden untersucht, dabei konnte gezeigt werden, dass die Assimilation von Altimetriemessungen die Modellergebnisse signifikant verbessert. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die in-situ Beobachtungen aus ARGO und die Fernerkundungsmessung der Satellitenaltimetrie einen Informationsgehalt zeigen, der weitgehend komplementär ist. Die Verschiedenheit kommt vor allem aus den unterschiedlichen räumlich-zeitlichen Überdeckungen der Messsysteme. Illustriert wird dies in Abbildung FR.1, wo die zeitliche Entwicklung der Strömungsmuster 2005 bis 2006 dargestellt wird. Im linken Bildteil werden nur ARGO Messungen verwendet, im rechten Bildteil nur Altimeterdaten. Deutlich erkennbar wird, dass in das Altimeter sehr viel sensitiver als die ARGO Messungen in Bezug auf Ozeanströmungen ist.

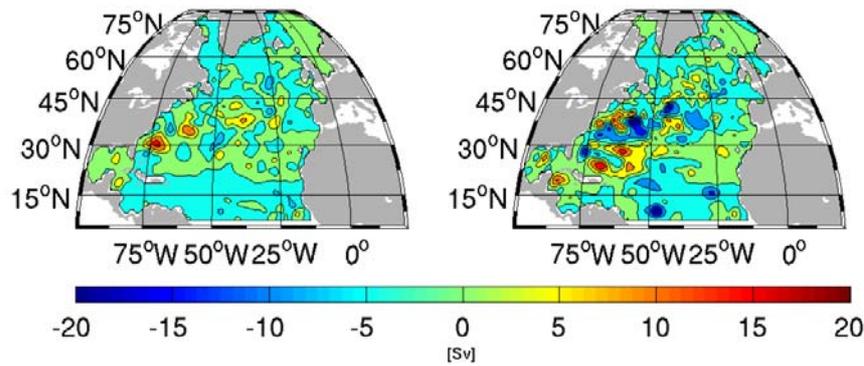


Abb. FR.1 Änderung der Ozeanströmung 2005-2006, dargestellt als barotrope Stromfunktion. Links: Berechnung nur auf Grund von ARGO Messungen, Rechts: Berechnungen nur auf Grund von Altimeterdaten. Die Satellitenmessungen führen zu einer deutlich verstärkten Variabilität, die sich aus in situ Messungen nicht erschließt.

In einer weiteren Untersuchung wurden Pegelmessungen im Nordatlantik analysiert. Dabei wurden zuerst Datenlücken mit Hilfe der MSSA Methode geschlossen. Die nunmehr zeitlich durchgehenden Serien wurden nach post-glacial-rebound (PGR) nach Peltier korrigiert und zur Eichung des oben genannten Inversmodells herangezogen. Mit dem Inversmodell waren nur aus Temperatur und Salzgehaltmessungen aus den Jahren 1960-1995 Fünfjahresmittel (Pentaden) erzeugt. Das Ergebnis ist eine dreidimensionale Beschreibung des Ozeans. Allerdings besitzt seine Oberflächenauslenkung keine absolute Referenz, so dass Änderungen durch Massenzufuhr verborgen bleiben müssen. Dieses Manko können wir durch die Pegel beseitigen, indem wir das Inversmodell an den Pegelstationen an die Messungen anpassen. Dies gelingt gut. Die so geeichten Serien für die Meeresoberfläche kann man mit den originalen Messungen vergleichen (Abbildung HR.1) Bis auf einzelne Pegel sind die Modell und Messwerte hochkorreliert, am Besten an der Kanadischen Küste. Die Regressionsanalyse zeigt Koeffizienten von weitgehend eins mit der regionalen Abweichung im Golf von Mexiko. Hier steigt der gemessene Pegel schneller als der modellierte. Eine mögliche Erklärung wäre in dieser Region eine Landsenkung durch Entnahme von Erdöl aus der Küstenregion. Eine solche Landbewegung wäre in PGR nicht enthalten.

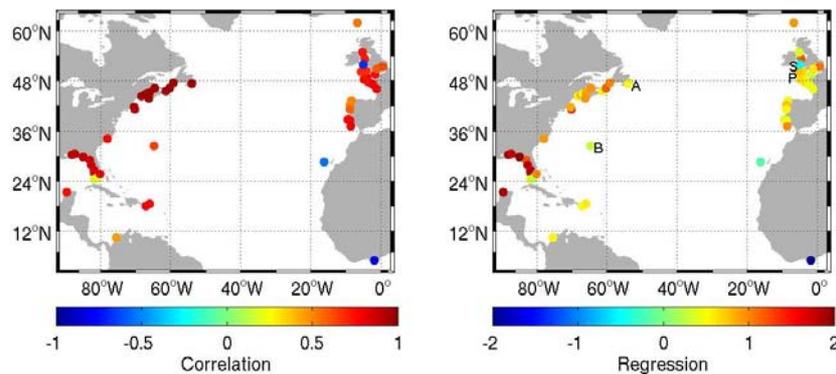


Abb. HR.1 Vergleich zwischen gemessenen Gezeitenpegeln und dem Ergebnis des geeichten Inversmodells IFEOM für 1960-1995. Die Serien haben sowohl in Korrelation, wie auch in der Regression gute Übereinstimmung.

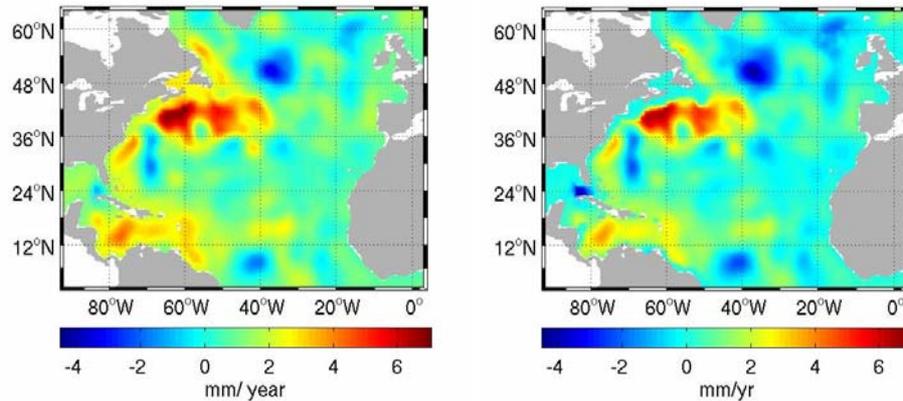


Abb. HR.2 Aus den Pegeln und dem Inversmodell abgeleitete Trends der Meeresoberfläche im Nordatlantik 1960-1995. Links: der gesamte Trend in m pro Jahr; Rechts: der Anteil, der durch sterische Ausdehnung kompensiert wird.

Nachdem die Ergebnisse an den beobachteten Pegelstationen befriedigend sind, wenden wir uns nun den flächenmäßigen Darstellungen zu. Der berechnete Trend im Meeresspiegel 1969-1995 besitzt eine starke räumliche Struktur mit einem Anstieg von ca. 5mm/Jahr nördlich des Golf- bzw. Nordatlantischen Stroms. Fast das gesamte Signal ist durch sterische Ausdehnung zu verstehen. Der Massenzufluss, der sich aus den Pegelmessungen ergibt, ist fast gleichmäßig verteilt und beträgt 0.7 mm/Jahr.

2.1 Erzielte Ergebnisse und Verwendungsnachweis

- Ein Hauptergebnis des Projektes ist die Aufbereitung der Daten des GEOSAT nach aktuellen wissenschaftlichen Gesichtspunkten.
- Die Daten (Altimetrie und Orbit) werden über das GFZ-Webinterface ADS (adsc.gfz-potsdam.de/ads) international bereitgestellt.
- Die GPS-Daten und Kombinationsprodukte werden über das Web-Portal am GFZ (adsc.gfz-potsdam.de/tiga) bereitgestellt. Darüber hinaus beteiligt sich das GFZ mit diesen Daten an der Reprozessierungskampagne des IGS und in Planung ist die Einbeziehung der Prozessierungsergebnisse in die Kombination zum ITRF2008.
- Unmittelbares Ergebnis von SEAVAR ist die Kontraktierung des GFZ durch die ESA für die Reprozessierung der Daten des ERS-1 und ERS-2.

2.2 Voraussichtlicher Nutzen

Als direktes Ergebnis der Aufbereitung der Orbitdaten durch das GFZ wurde die Arbeitsgruppe durch die ESA für die Reprozessierung von Satellitendaten des ERS-1 und ERS-2 ausgewählt. Hier kommt es zu einer Gewinnung von Drittmitteln. Die Bahndaten des GEOSAT sind bereits mehrfach angefragt und werden nach der Veröffentlichung in Fachpublikationen international zur Verfügung gestellt.

Die Analyse und Kombination von GPS-Daten an Pegeln führte zu einer Beteiligung an einer Reprozessierungskampagne im Rahmen des IGS. Darüber hinaus wird es zu einer Beteiligung des GFZ im IERS kommen. Die Daten der GPS-Kombination sind Grundlage der Arbeiten im IGS und in GLOSS, die Ergebnisse werden laufend abgegeben.

2.3 Fortschritte auf dem Gebiet von anderen Stellen

Es wurden während der Projektlaufzeit keine Fortschritte anderer Gruppen bekannt, die die Förderziele in Frage stellen.

Im Bereich Altimetrie/Orbitbestimmung wurde nach Projektende eine Initiative der ESA gestartet, die eine Reprozessierung der Satellitenbahnen des ERS-1 und ERS-2 nach definierten ESA-Standards durchführt. Das GFZ ist daran beteiligt.

Die Reprozessierung der GPS-Daten an Gezeitenpegeln wird im Rahmen des IGS und GGOS weitergeführt. Gleichzeitig findet eine Reprozessierungskampagne im Rahmen des IGS statt, die GFZ-Ergebnisse werden dort zur Verfügung gestellt.

2.4 Literatur

- Altamimi Z, Collilieux X, Legrand J, Garayt B, Boucher C (2007) ITRF2005: a new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *J Geophys Res* 112:B09401, doi 10.1029/2007JB004949
- Beckers JM, Rixen M (2003) EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic data sets, *J. Atmosph. And Ocean Techn.* 20, pp. 1839–1856.
- Blewitt G, Lavallée D (2002) Effect of annual signals on geodetic velocity. *J. Geophys. Res.* 107 (B7), doi:10.1029/2001JB000570.
- Chambers DP, Melhaff CA, Urban TJ, Fuji D, Nerem RS (2002) Low-frequency variations in global mean sea level: 1950– 2000, *J. Geophys. Res.*, 107(C4), pp. 3026-3035
- Church JA, White NJ (2006) A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01602, doi:10.1029/2005GL024826
- Church JA, White NJ, Coleman R, Lambeck K, Mitrovica JX (2004), Estimates of the Regional Distribution of Sea Level Rise over the 1950 to 2000 Period. *Journal of Climate*, 17, 2609-2625
- Dach R, Hugentobler U, Fridez P, Meindl M (2007) Bernese GPS Software 5.0. Astronomical Institute University of Bern, Switzerland.
- Douglas, BC (2001) Sea Level Change in the Era of the Recording Tide Gauge. In: *Sea Level Rise - History and Consequences*. Ed Douglas, B.C. Kearney, M.S. Leatherman, S.P. Academic Press. 37-64.
- Ferland R, Gendt G, Schöne T (2005) IGS Reference Frame Maintenance. In: Meindl M (ed) *Celebrating a Decade of the International GPS Service, Workshop and Symposium 2004, Proceedings*. Astronomical Institute University of Bern, Switzerland
- Jevrejeva S, Grinsted A, Moore JC, S. Holgate S (2006), Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records, *J. Geophys. Res.*, 111, C09012, doi:10.1029/2005JC003229
- Jevrejeva S, Moore JC, Grinsted A. (2008), Relative importance of mass and volume changes to global sea level rise, *J. Geophys. Res.*, 113, D08105, doi:10.1029/2007JD009208
- Kaplan A, Cane MA, Kushnir Y, Clement AC, Blumenthal MB, Rajagopalan B (1998) Analyses of global sea surface temperatures 1856–1991, *J. Geophys. Res.* 103, pp. 18,567–18,589.
- Kaplan A, Kushnir Y, Cane MA (2000) Reduced space optimal interpolation of historical marine sea level pressure: 1854–1992, *J. Climate* 13, pp. 2987–3002.
- Kondrashov D, Ghil M (2006) Spatio-temporal filling of missing points in geophysical data sets, *Nonlin. Processes Geophys.*, 13 (2006), 151–159
- Levitus S, Antonov J, Boyer T. (2005) Warming of the world ocean, 1955-2003, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Peltier WR (2004) Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE, *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.*, 32, 111-149
- Scharroo R, Lillibridge JL, Smith WHF, Schrama EJO (2004) Cross-calibration and long-term monitoring of the microwave radiometers of ERS, TOPEX , GFO, Jason, and Envisat. *Marine Geodesy* 27, 279-308
- Schneider T (2001) Analysis of incomplete climate data: Estimation of mean values and covariance matrices and imputation of missing values, *J. Climate* 14 (2001), 853–871
- Smith TM, Reynolds RW, Livezey RE, Stokes D (1996) Reconstruction of historical sea surface temperatures using Empirical Orthogonal Functions, *J. Climate* 9, pp. 1403–1420
- Swenson S, Wahr J (2006) Post-processing removal of correlated errors in GRACE data, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08402, doi: 1029\2005GL25285
- Woodworth PL, Player R (2003) The permanent service for mean sea level: an update to the 21st century, *J. Coastal. Res.* 19 (2003), pp. 287–295

3. Gesamtüberblick aller Veröffentlichungen, Vorträge und Poster

Es sind folgende Dissertationen, Diplomarbeiten, Veröffentlichungen, Vorträge und Poster im Rahmen des Projektes entstanden und präsentiert worden:

Tabellarische Übersicht

Institut	Dissertationen	Diplomarbeiten	Publikationen	Vorträge	Poster
AWI	2 (in Bearbeitung)	0	24	23	33
GFZ	1 (in Bearbeitung)	0	22	19	9
Gesamt	3	0	46	42	42

3.1 GFZ

3.1.1 Dissertationen

Schön, Nana: wegen Elternzeit voraussichtlicher Abschluss 2009

3.1.2 Diplomarbeiten

Keine

3.1.3 Publikationen

- Anderssohn J, Rudenko S, Kaufmann H, Oncken O (2007) TIPTEQ Research Group (2007) Monitoring surface deformation during the seismic cycle at natural and artificial active continental margins, European Geosciences Union General Assembly 2007, Vienna, Austria, 15-20 April, 2007, Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 060616.
- Anderssohn J, Rudenko S, Kaufmann H, Oncken, O (2006) Influence of satellite orbits on monitoring surface deformation in active margin settings with the DInSAR technique, Eos Trans. AGU, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract G53D-0929.
- Esselborn S, Gendt G, Sadowsky N, Schoene T, Rudenko S, Zhang F (2006) Consistent time series for sea level height, extended abstract, GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar 'Observation the system Earth from Space' (Bonn 2006).
- Flechtner F, Schmidt R, Meyer U, Schöne T, Esselborn S, Förste C, Stubenvoll R, Rudenko S, Neumayer KH, Rothacher M, König R (2006) The benefit of EIGEN gravity field models for altimetry and vice versa. In: International Symposium on '15 Years of Progress in Radar Altimetry' Symposium (Venice 2006).
- Foerste C, Schmidt R, Stubenvoll R, Flechtner F, Meyer U, König R, Neumayer H, Biancale R, Lemoine JM, Bruinsma S, Loyer S, Barthelmes F, Esselborn S (2008) The GeoForschungsZentrum Potsdam/Groupe de Recherche de Geodesie Spatiale satellite-only and combined gravity field models: EIGEN-GL04S1 and EIGEN-GL04C. Journal of Geodesy, 82, 6, 331-346, doi:10.1007/s00190-007-0183-8
- Ge M, Gendt G, Dick G, Zhang FP (2005) Improving carrier-phase ambiguity resolution in global GPS network solutions. Journal of Geodesy, vol. 79, pp 103-110, DOI 20.2007/s00290-005-0447-0.
- Ge M, Gendt G, Dick G, Zhang FP, Rothacher M (2006) A new data processing strategy for huge GNSS networks. Journal of Geodesy, 80, pp 199-203, DOI 10.1007/s00190-006-0044-x
- Ge M, Gendt, G, Rothacher M, Shi C, Liu J (2008) Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations In: Journal of Geodesy, 82, 7 2008. 389-399 p. 10.1007/s00190-007-0187-4
- Homberg A, Esselborn S, Flechtner F (2007) Temporal variability of oceanic mass balance in the Atlantic Ocean, Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 07645, EGU General Assembly in Vienna, Austria (15-20 April 2007)
- Homberg A, Esselborn S, Flechtner F (2008) Determination of sea level change with radar altimetry, Argo profiles and GRACE, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-08145, EGU General Assembly in Vienna, Austria (14-18 April 2008)

- Neilan R, Altamimi Z, Blewitt G, Davis J, Gross R, Kuo C, Moore A, Plag HP, Rothacher M, Shum CK, Sideris MG, Schöne T, Tregoning P, Zerbini S: Geodetic Observations and Global Reference Frame Contributions to Understanding Sea Level Rise and Variability, (book chapter Blackwell Publishing)
- Rudenko S, Schoene T (2006) Orbit determination for GEOSAT, ERS-1, ERS-2 and TOPEX/Poseidon, GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar 'Observation the system Earth from Space' (Bonn 2006).
- Rudenko S, Schöne T (2007) Influence of parameterization on the accuracy of altimetry satellite orbits. Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 07492
- Rudenko S, Schöne T (2007) Influence of parameterization on the accuracy of altimetry satellite orbits, European Geosciences Union General Assembly 2007, Vienna, Austria, 15-20 April, 2007, Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 07492.
- Rudenko S, Schöne T, Gendt G, Zhang F, Thaller D (2007) Precise orbits of altimetry satellites and analysis of GPS data at tide gauges for sea level research. In: Observations of the System Earth from Space: status seminar, 22-23.11.2007, Bavarian Academy of Sciences and Humanities, Munich; Programme & Abstracts, Koordinierungsbüro GEOTECHNOLOGIEN, 41-46
- Rudenko S, Schöne T, Gendt G, Zhang F, Thaller D (2007) Precise orbits of altimetry satellites and analysis of GPS data at tide gauges for sea level research, Observations of the System Earth from Space : status seminar, 22-23.11.2007, Bavarian Academy of Sciences and Humanities, Munich; Programme & Abstracts, Koordinierungsbüro GEOTECHNOLOGIEN, 41-46.
- Rudenko S, Schöne T, Raimondo JC (2006) Precise orbits of altimetry satellites ERS-1, ERS-2 and TOPEX/Poseidon. In: International Symposium on '15 Years of Progress in Radar Altimetry' (Venice 2006)
- Rudenko S, Schöne T, Raimondo JC (2006) Precise Orbits of Altimetry Satellites ERS-1, ERS-2 and TOPEX/Poseidon, International Symposium on '15 Years of Progress in Radar Altimetry' (Venice 2006).
- Rudenko S, Schöne T, Raimondo, JC, Meixner H, Neumayer KH (2006) New precise orbits of altimetry satellites GEOSAT, ERS-1, ERS-2 and TOPEX/Poseidon 3rd General Assembly European Geosciences Union (Vienna, Austria 2006) Geophysical Research Abstracts, Vol.8, 07674, 2006 2-7 April 2006
- Rudenko S, Zhang F, Gendt G, Schöne T, Thaller D, Rothacher M (2008) Reanalysis of GPS data at tide gauges General Assembly European Geosciences Union (Vienna, Austria 2008) 2008. Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-03839, 2008.
- Rudenko S, Zhang F, Gendt G, Schöne T, Thaller D, Rothacher M (2008) Reanalysis of GPS data at tide gauges, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-03839.
- Schöne T, Thaller D, Schön N (2009) IGS Tide Gauge Benchmark Monitoring Pilot Project (TIGA): scientific benefits, Journal of Geodesy, 10.1007/s00190-008-0269-y
- Zhang F, Gendt G, Ge M (2007) GPS data processing at GFZ for monitoring the vertical motion of global tide gauge benchmarks: technical report for projects TIGA and SEAL. GeoForschungsZentrum Potsdam Scientific Technical Report STR07/02, 28 p.
- Zhang F, Wunsch J, van Dam T, Gendt G, Ge M, Schöne T (2008) Vertical Crustal Motion at Tide Gauges Derived by Analyzing GPS Time Series. GeoForschungsZentrum Potsdam Scientific Technical Report STR08/03, 106 p.

3.1.4 Vorträge

- Esselborn S, Schöne T, Schmidt R (2006) Basin Scale Mass Variations in the Atlantic Ocean, International Symposium on '15 Years of Progress in Radar Altimetry', Venedig, Italien, 13.-18. März 2006
- Esselborn S, Gendt G, Sadowsky N, Schöne T, Rudenko S, Zhang F (2006) Consistent time series for sea level height, GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar 'Observation the system Earth from Space', Bonn, Deutschland, 18.-19. September, 2006
- Esselborn S, Homberg A, Schöne T, Schmidt R (2007) Basin Scale Mass Variations in the Atlantic Ocean from Altimeter, in situ and GRACE Data, Grace Science Team Meeting+DFG Schwerpunktprogramm 1257 Symposium, 15.-17. September 2007

- Esselborn S, Rudenko S, Sadowsky N, Schöne T, Schröter J, Sidorenko D, Wenzel M (2007) SEAVAR: Sea Level Variations – Prospects from the Past to the Present, Geotechnologien Status-Seminar, München, Deutschland, 22.-23.November, 2007
- Schöne T (2006) Linking GPS to tide gauges and tide gauge benchmarks, World Climate Research Programme (WCRP) Workshop Understanding Sea-level Rise and Variability, Paris, 6 June 2006
- Rudenko S, Schöne T, Raimondo JC, Meixner H, Neumayer KH (2006) New precise orbits of altimetry satellites GEOSAT, ERS-1, ERS-2 and TOPEX/Poseidon, EGU 2006 General Assembly, Wien, Österreich, 3.-7. April 2006
- Rudenko S, Schöne T (2006) Orbit determination for GEOSAT, ERS-1, ERS-2 and TOPEX/Poseidon, GEOTECHNOLOGIEN Statusseminar 'Observation the system Earth from Space', Bonn, Deutschland, 18.-19. September, 2006
- Rudenko S (2006) ERS-2 orbit derived using SLR and PRARE data, Regular meeting of GFZ Section 1.2 OP, Oberpfaffenhofen, Deutschland, 22. November 2006.
- Rudenko S, Schöne T, Raimondo JC, Neumayer KH (2007) Results of precise orbit determination of altimetry satellites GEOSAT, ERS-1, ERS-2 and TOPEX/Poseidon, Regular meeting of GFZ Section 1.2 OP, Oberpfaffenhofen, Deutschland, 10. Januar 2007.
- Rudenko S, Schöne T (2007) Precise orbit determination of altimetry satellites: current status and future activities, SEAVAR Project Meeting, Potsdam, Deutschland, 1.März 2007.
- Rudenko S, Zhang F, Gendt G (2007) Preparations for TIGA GPS data reprocessing. Regular meeting of GFZ Section 1.2 OP, Oberpfaffenhofen, Deutschland, 25.April, 2007.
- Rudenko S, Gendt G, Zhang F (2007) Status of IGS TIGA Processing at GFZ. GGOS-D Geotechnologien Project 5th Meeting, Potsdam, Deutschland, 11.September, 2007.
- Rudenko S, Schöne T, Raimondo JC, Neumayer KH, Rothacher M (2007) Altimetry satellite precise orbit determination at GFZ Potsdam, Envisat Altimetry Quality Working Group Meeting No.9, Barcelona, Spanien, 9.-12. Oktober 2007.
- Rudenko S, Schöne T, Gendt G, Zhang F, Thaller D (2007) Precise orbits of altimetry satellites and analysis of GPS data at tide gauges for sea level research, Geotechnologien Status-Seminar, Munich, Deutschland, 22.-23.November, 2007.
- Rudenko S, Gendt G, Zhang F (2008) Status of IGS TIGA Processing at GFZ. GGOS-D Geotechnologien Project 6th Meeting, Munich, Deutschland, 18.-19. Februar 2008.
- Rudenko S, Zhang F, Gendt G, Schöne T, Thaller D, Rothacher M (2008) Reanalysis of GPS data at tide gauges, EGU General Assembly 2008, Wien, Österreich, 13.-18. April 2008.
- Rudenko S, Schöne T, Gendt G (2008) "GPS Tide Gauge Benchmark Monitoring. Some results", Ukrainian School for Young Astronomers, Kiew, Ukraine, 20. Mai, 2008
- Rudenko S, Schöne T, Gendt G, Zhang F, Nischan T, Brandt A, Rothacher M (2008) Improved orbits of altimetry satellites and reanalysis of GPS data at tide gauges for sea level investigations, IAG International Symposium on Gravity, Geoid & Earth Observation 2008, 23.-27. Juni 2008, Chania, Griechenland
- Rudenko S, Gendt G (2008) Status of IGS TIGA Processing at GFZ. GGOS-D Geotechnologien Project 7th Meeting, Frankfurt am Main, Deutschland, 3.-4. Juli 2008

3.1.5 Poster

- Esselborn S, Schöne T, Schmidt R (2006) Recent Sea Level Changes in the Atlantic Ocean: Steric and Mass Contributions, POF evaluation, GFZ Potsdam, Potsdam, Deutschland, Oktober 2006.
- Homberg A., Esselborn S, Flechtner F (2007) Temporal variability of oceanic mass balance in the Atlantic Ocean, EGU General Assembly in Vienna, Austria (15-20 April 2007)
- Homberg A, Esselborn S, Flechtner F (2007) Oceanic mass changes in consideration of geocenter motion corrections, Joint International GSTM + DFG - SPP Symposium in Potsdam, Germany, 15-17 October 2007
- Homberg A, Sadowsky N (2007) Determination of sea level change with radar altimetry, tide gauges and GRACE, PhD-Day, GFZ in Potsdam, Germany, 1 November 2007
- Homberg A, Esselborn S, Flechtner F (2008) Determination of sea level change with radar altimetry, Argo profiles and GRACE, EGU General Assembly in Vienna, Austria, 14-18 April 2008)

- Rudenko S, Schöne T, Raimondo JC (2006) Precise Orbits of Altimetry Satellites ERS-1, ERS-2 and TOPEX/Poseidon, International Symposium '15 Years of Progress in Radar Altimetry', Venedig, Italien, 13.-18. März 2006
- Rudenko S, Schöne T, Raimondo JC, Neumayer KH (2006) Altimetry satellite precise orbit determination, POF evaluation, GFZ Potsdam, Potsdam, Deutschland, Oktober 2006
- Rudenko S, Schöne T (2007) Influence of parameterization on the accuracy of altimetry satellite orbits, EGU General Assembly 2007, Wien, Österreich, 15.-20. April 2007
- Rudenko S, Schöne T (2007) Influence of parameterization on the accuracy of altimetry satellite orbits, GFZ Department 1 Workshop, Potsdam, Deutschland, 6.-7. Mai 2007
- Sadowsky N, Schöne T, Esselborn S, Zhang F (2007) Seavar - sea level anomalies from combined satellite altimetry and GPS-corrected TIGA tide gauge data, IUGG Perugia, (6. Juli 2007)

3.2 AWI

3.2.1 Dissertationen

- Reinhardt, Heiko: Beginn Oktober 2006 voraussichtliche Abgabe Ende 2009
- Richter, Falk: Beginn November 2006 voraussichtliche Abgabe Ende 2009

3.2.2 Diplomarbeiten

Keine

3.2.3 Publikationen

- Danilov, S., Kivman, G., Schröter, J. (2005). Evaluation of an eddy-permitting finite-element ocean model in the North Atlantic, *Ocean modelling*, 10, 35-49. doi:10.1016/j.ocemod.2004.07.006
- Hellmer, H. H., Schodlok, M. P., Wenzel, M., Schröter, J. G. (2005). On the influence of adequate Weddell Sea characteristics in a large-scale global ocean circulation model, *Ocean dynamics*, 55(2), 88-99. doi:10.1007/s10236-005-0112-4
- Kivman, G., Danilov, S., Fritsch, B., Harig, S., Reick, C., Schröter, J., Seufer, V., Sidorenko, D., Staneva, J., Wenzel, M. (2005). Improved estimates of the oceanic circulation using the CHAMP geoid, Reigber, C., Luehr, H., Schwintzer, P. and Wickert, J.(Eds): *Earth Observation with CHAMP, Results from Three Years in Orbit*, Springer Berlin Heidelberg New York, 211-216.
- Losch, M., Sidorenko, D., Beszczynska-Möller, A.(2005). FEMSECT: an Inverse Section Model Based on the Finite Element Method, *Journal of geophysical research-oceans*, 110(C12), C12023, doi:10.1029/2005JC002910 .
- Nerger, L., Hiller, W., Schröter, J. (2005). A Comparison of Error Subspace Kalman Filters, *Tellus series a-dynamic meteorology and oceanography*, 57A(5), 715-735. doi:10.1111/j.1600-0870.2005.00141.x
- Schröter, J. (2005). *Ocean Dynamics*, Ilk, K.H., J. Flury, R. Rummel, P. Schwintzer, W. Bosch, C. Haas, J. Schröter, D. Stammer, W. Zahel, H. Miller, R. Dietrich, P. Huybrechts, H. Schmeling, D. Wolf, H.J. Götze, J. Riegger, A. Bardossy, A. Güntner, Th. Gruber: *Mass transport and mass distribution in the Earth system - Contribution of the new generation of satellite gravity and altimetry missions to geosciences*. GOCE Projektbüro, TU München und GFZ Potsdam, 2005, 39-55.
- Seufer, V., Schröter, J., Wenzel, M., Keller, W. (2005). Impact of the CHAMP Mission on Estimating the Mean Sea Surface, Reigber, C., Luehr, H., Schwintzer, P. and Wickert, J.(Eds): *Earth Observation with CHAMP, Results from Three Years in Orbit*, Springer Berlin Heidelberg New York, 205-210.
- Nerger, L., Danilov, S., Hiller, W., Schröter, J. (2006). Using sea-level data to constrain a finite-element primitive-equation ocean model with a local SEIK filter, *Ocean dynamics*, 56(5/6), 634-649. doi:10.1007/s10236-006-0083-0

- Sidorenko, D., Danilov, S., Schröter, J. (2006). Inverse Estimate of the North Atlantic Circulation: Influence of the fine resolution GOCINA dynamic topography, IAG Proceedings / Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, Vol. 25, pp. 141-145.
- Sidorenko, D., Danilov, S., Kivman, G., Schröter, J.(2006).On the use of a deep pressure gradient constraint for estimating the steady state ocean circulation from hydrographic data, Geophysical research letters, doi:10.1029/2005GL024716.
- Wenzel, M., Schröter, J. (2006). Understanding measured sea level rise by data assimilation, Proceedings, ESA Workshop: 15 years of progress in radar altimetry,.
- Ivchenko, V. O., Danilov, S. D., Sidorenko, D. V., Schröter, J., Wenzel, M., Aleynik, D. L. (2007). Comparing the steric height in the Northern Atlantic with satellite altimetry, Ocean Sci., 3, 485–490, 2007.
- Nerger, L., Danilov, S., Kivman, G., Hiller, W., Schröter, J. (2007). Data assimilation with the Ensemble Kalman Filter and the SEIK filter applied to a finite element model of the North Atlantic, Journal of marine systems, 65(1/4), 288-298. doi:10.1016/j.jmarsys.2005.06.009
- Wenzel, M., Schröter, J. (2007). The global ocean mass budget in 1993--2003 estimated from sea level change, Journal of physical oceanography, 37(2), 203-213. doi:10.1175/JPO3007.1
- Wenzel, M., Schröter, J. (2007). Combined assimilation of GEOSAT and TOPEX/Poseidon data, "Observation of the System Earth from Space" Status Seminar, 22-23 Nov 2007, Munich, GEOTECHNOLOGIEN Science Report, 11, 56-59.
- Böning, C., Timmermann, R., Macrandar, A., Schröter, J. (2008). A pattern-filtering method for the determination of ocean bottom pressure anomalies from GRACE solutions, Geophysical Research Letters, 35, L18611. doi:10.1029/2008GL034974
- Danilov, S., Wang, Q., Losch, M., Sidorenko, D., Schröter, J.(2008).Modeling ocean circulation on unstructured meshes: Comparison of two horizontal discretizations, Ocean Dynamics, 58(5-6), 365-374., doi:10.1007/s10236-008-0138-5.
- Ivchenko, V. O., Danilov, S., Sidorenko, D., Schröter, J., Wenzel, M., Aleynik, D. L. (2008). Steric height variability in the Northern Atlantic on seasonal and interannual scales, J. Geophys. Res., 113, C11007, doi:10.1029/2008JC004836.
- Schodlok, M.P., Wenzel, M., Schröter, J. , Hellmer, H.H. (2008). Regional and Global Effects of Southern Ocean Constraints in a Global Model, Ocean Dynamics. doi:10.1007/s10236-008-0143-8
- Sidorenko, D., Danilov, S., Wang, Q., Huerta-Casas, A., Schröter, J. (2008). On computing transports in finite-element models, Ocean Modelling, doi:10.1016/j.ocemod.2008.09.001. doi:10.1016/j.ocemod.2008.09.001.
- Sidorenko, D., Danilov, S., Schröter, J. (2008). Inverse solution for pentadal variability in the North Atlantic, Geophysical Research Letters,35, L02603. doi:10.1029/2007GL032463
- Skachko, S., Danilov, S., Janjic, T., Schröter, J., Sidorenko, D., Savcenko, R., Bosch, W. (2008). Sequential assimilation of multi-mission dynamical topography into a global finite-element ocean model, Ocean Science, 4, 307-318.
- Wang, Q., Danilov, S., Schröter, J. (2008). Finite element ocean circulation model based on triangular prismatic elements, with application in studying the effect of topography representation, J. Geophys. Res., 113, C05015. doi:10.1029/2007JC004482
- Timmermann, R., Danilov, S., Schröter, J., Böning, C., Sidorenko, D., Rollenhagen, K.(2009).Ocean circulation and sea ice distribution in a finite element global sea ice -- ocean model, Ocean Modelling, doi:10.1016/j.ocemod.2008.10.009.

3.2.4 Vorträge

- Schröter, J. (2005). Modellierung der thermohalinen Zirkulation des Ozeans mit finiten Elementen, Kolloquium 30.06.2005, Technische Universitaet Kaiserslautern.
- Schröter, J. (2005). Data assimilation in oceanography, Technical University Delft.
- Harig, S., Sein, D. V., Sidorenko, D., Behrens, J., Schröter, J. (2006). Influence of bottom topography resolution on tsunami wave modelling, 5th International Workshop on Unstructured Grid Numerical Modelling of Coastal, Shelf and Ocean Flow, Nov. 13-15 2006, Miami, Florida.

- Sidorenko, D., Danilov, S., Wenzel, M., Schröter, J. (2006). Data-model synthesis at AWI, CLIVAR/GODAE Meeting on A Pilot Evaluation Effort of Global Ocean Syntheses, August 31 - September 1 2006, ECMWF in Reading, UK.
- Timmermann, R., Danilov, S., Schröter, J. (2006). A finite element global coupled sea ice -- ocean model, European Geosciences Union General Assembly, 02–07 April 2006, Vienna, Austria.
- Wenzel, M., Schröter, J. (2006). Understanding measured sea level rise by data assimilation, ESA Workshop: 15 Years of Progress in Radar Altimetry, 13-16 March 2006, Venice, Italy.
- Rollenhagen, K., Timmermann, R., Janjic, T., Schröter, J. (2007). Sea Ice Drift Data Assimilation in a Finite Element Sea Ice Model using a Singular Evolutive Interpolated Kalman Filter, IICWG Workshop on Sea Ice Modeling and Data Assimilation, Oslo, 14-16 May 2007.
- Rollenhagen, K., Timmermann, R., Janjic, T., Schröter, J. (2007). Sea Ice Drift Assimilation in a Finite Element Sea Ice Model using a Singular Evolutive Interpolated Kalman Filter, General Assembly of the European Geophysical Union, Vienna, Austria, April 2007.
- Schröter, J., Danilov, S., Timmermann, R., Sidorenko, D., Wang, Q., Harig, S. (2007). Ocean Model Development at AWI, 6th International Workshop on unstructured grid modelling in oceanography, Sept. 22-24 2007, Imperial College London.
- Schröter, J., Wenzel, M., Sidorenko, D., Trumm, F. (2007). Sea Level Rise and its Complications, HGF summer school "Earth Observing System", Helgoland, 24.-31.07.2007.
- Schröter, J. (2007). Finite Element Ocean Modelling, University of Kiel, 26.07.2007.
- Schröter, J. (2007). Finite Element Ocean Modelling: Status and Plans, Hamburger Geophysikalisches Kolloquium, 26.7.2007, Universität Hamburg.
- Schröter, J. (2007). Klimaänderungen und Auswirkungen auf den Meeresspiegel, Klimawandel und Küstenschutz, Oldenburg den 06.07.2007, Niedersächsisches Ministerium für Umweltschutz,.
- Sidorenko, D., Danilov, S., Schröter, J., Wang, Q. (2007). The inverse finite-element ocean circulation model (IFEOM) and its sensitivity to control parameters, The Sixth International Workshop on Unstructured Mesh Numerical Modelling of Coastal, Shelf & Ocean Flows 19-21 September 2007, Imperial College, London, UK.
- Sidorenko, D., Losch, M., Danilov, S., Wenzel, M., Schröter, J.(2007).State of inverse ocean modelling, HELCOM-EuroGOOS Workshop on operational models in the service of the HELCOM Baltic Sea Action Plan, Espoo, Finland, 21-22 May 2007.
- Sidorenko, D., Danilov, S., Schröter, J., Wenzel, M., Ivchenko, V., Reinhardt, H., Richter, F., Wang, Q.(2007).Inverse modelling of the North Atlantic Ocean from ocean observations and tide gauge data, Observation of the System Earth from Space", Geotechnologien Status Seminar, 22-23 Nov 2007, Munich, Germany.
- Wang, Q., Danilov, S., Schröter, J. (2007). Representing the ocean bottom topography with z , z -sigma and sigma vertical grids, European Geosciences Union General Assembly, April 2007, Vienna, Austria..
- Wenzel, M., Schröter, J. (2007). Combined assimilation of GEOSAT and TOPEX/Poseidon data, "Observation of the System Earth from Space", Geotechnologien Status Seminar, 22-23 Nov 2007, Munich Germany.
- Maßmann, S., Androsov, A., Danilov, S., Schröter, J. (2008). Modelling Tides in the North Sea on Unstructured Grids, CLISAP Workshop on Ocean Tides, Hamburg, Germany, June 30 - July 1, 2008.
- Maßmann, S., Androsov, A., Danilov, S., Schröter, J. (2008). Intercomparison between several finite element and finite volume approaches to model the North Sea tides, Seventh International Workshop on Unstructured Grid Numerical Modelling of Coastal, Shelf and Ocean Flows, Halifax, Canada, September 17-19, 2008.
- Rietbroek, R., Kusche, J., Dahle, Ch., Schmidt, R., Flechtner, F, Schröter, J., Jansen, M. J. F., Gunter, B., Böning, C., Brunnabend, S. -E. (2008). Surface mass estimation from GPS site displacements, modeled Ocean bottom pressure and GRACE, General assembly of the European Geophysical Union, EGU2008-A-07928.
- Schröter, J., Timmermann, R., Androsov, A., Boening, C., Danilov, S., Huerta-Casas, A., Maßmann, S., Sidorenko, D., Rollenhagen, K., Wang, Q. (2008). EGU2008-A-09296; A global finite-element sea ice and ocean model, General assembly of the European Geophysical Union, EGU2008-A-09296;.

Schröter, J., Danilov, S., Sidorenko, D., Wang, Q., Timmermann, R., Nerger, L., Huerta-Casas, A., Maßmann, S., Böning, C., Janjic, T., Behrens, J., Androssov, A., Richter, F., Hiller, W., Harig, S., Brunnabend, S. (2008). FEOM, status and plans, Seventh International Workshop on Unstructured Grid Numerical Modelling of Coastal, Shelf and Ocean Flows, September 17-19 2008, Halifax, Canada..

3.2.5 Poster

- Danilov, S., Kivman, G., Schröter, J. (2005). A global finite-element ocean circulation model, 2nd EGU General Assembly, 24-29 April 2005, Vienna, Austria.
- Nerger, L., Hiller, W., Schröter, J. (2005). The SEIK Filter - an alternative to the Ensemble Kalman Filter!?, 4th WMO International Symposium on Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography, April 18-22, 2005, Prague, Czech Republic.
- Sidorenko, D., Danilov, S., Kivman, G., Schröter, J. (2005). Circulation in the North Atlantic derived from Inverse Finite-Element Ocean Model, EGU General Assembly 24-39 April, Vienna, Austria.
- Sidorenko, D., Danilov, S., Schröter, J. (2005). Inverse Estimate of the North Atlantic Circulation: Influence of the fine resolution GOCINA dynamic topography, 15 Years of progress in Radar Altimetry Symposium, Venice 13-18 March 2005, Venice.
- Sidorenko, D., Danilov, S., Kivman, G., Schröter, J. (2005). Inverse finite-element ocean circulation model (IFEOM), EGU General Assembly 24-39 April, Vienna, Austria.
- Böning, C., Timmermann, R., Danilov, S., Schröter, J., Boebel, O. (2006). A global finite element ocean model: Circulation and bottom pressure anomalies in the South Atlantic, European Geosciences Union, General Assembly, 02-07 April 2006, Vienna, Austria.
- Schodlok, M., Losch, M., Wenzel, M. (2006). Southern Boundaries in Global Ocean Models: Can We Do Better?, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, Dec 11-15, 2006.
- Sidorenko, D., Danilov, S., Schröter, J. (2006). Inverse Estimate of the North Atlantic Circulation: Influence of the fine resolution GOCINA dynamic topography, 15 Years of progress in Radar Altimetry Symposium, 13-18 March, 2006.
- Sidorenko, D., Danilov, S., Ivchenko, V., Schröter, J. (2006). Combining high resolution GOCINA topography with ARGO float data, The 3rd International GOCE User Workshop, 6-8 November 2006, ESA/ESRIN Frascati, Italy.
- Wang, Q., Danilov, S., Sidorenko, D., Schröter, J. (2006). Prismatic version of finite-element circulation model, European Geosciences Union General Assembly, 02-07 April 2006, Vienna, Austria..
- Wenzel, M., Schröter, J. (2006). Can we estimate the global ocean mass balance via sea level change?, EGU 2nd General Assembly, 24.-29. April 2005, Vienna, Austria.
- Wenzel, M., Schröter, J. (2006). Steric and eustatic effects: Understanding measured sea level rise by data assimilation, WCRP conference "Understanding Sea-Level Rise and Variability", 6-9 June 2006, Paris, France.
- Wenzel, M., Schröter, J. (2006). Global ocean heat content variations derived from satellite altimetry and hydrographic data, Ocean Surface Topography Science Team Meeting, 16-18 March 2006, Venice, Italy.
- Wenzel, M., Schröter, J. (2006). Modelling the oceanic heat and freshwater content using a volume constraint, EGU General Assembly, 2.-7. April 2006, Vienna, Austria.
- Ivchenko, V., Danilov, S., Sidorenko, D., Schröter, J., Wenzel, M., Aleynik, D. (2007). Comparing the steric height in the Northern Atlantic with the satellite altimetry, European Geophysical Union, EGU2007-A-02170.
- Janjic, T., Skachko, S., Danilov, S., Schröter, J. (2007). Hybrid SEIK algorithm for oceanographic data assimilation, IUGG
- Rollenhagen, K., Timmermann, R., Janjic, T., Schröter, J. (2007). Assimilation of sea-ice velocity in a Finite Element Sea-Ice Model, North Atlantic Subpolar Gyre Workshop, Kiel, Germany, 19-21 March 2007.
- Schröter, J., Sidorenko, D., Harig, S., Wang, Q., Timmermann, R., Rollenhagen, K., Böning, C., Janjic-Pfander, T., Huerta-Casas, A. (2007). FEOM, an unstructured mesh Finite Element Ocean Model, European Geosciences Union General Assembly, Vienna, 15 - 20 April.

- Sidorenko, D., Danilov, S., Schröter, J. (2007). Variability of the North Atlantic circulation from 1950 to 1994 determined by 3D variational finite element inverse ocean model, North Atlantic Subpolar Gyre Workshop, 19-21 March 2007, Kiel, Germany.
- Skachko, S., Danilov, S., Janjic, T., Schröter, J., Sidorenko, D. (2007). Estimating circulation in Antarctic Circumpolar Current via sequential assimilation of multi-mission altimetry data, Joined International Symposium GSTM/ DFG-SPP1257, GFZ Potsdam Germany, 15-17 October 2007.
- Timmermann, R., Böning, C., Schröter, J., Danilov, S. (2007). On the representation of the Southern Ocean in a finite-element coupled sea ice-ocean model, Geophysical Research Abstracts 9, EGU2007-A-07368.
- Timmermann, R., Böning, C., Wang, Q., Schröter, J. (2007). Southern Ocean water mass formation in a finite-element coupled sea ice--ocean model, IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy, July 1-13, 2007.
- Timmermann, R., Böning, C., Danilov, S., Schröter, J. (2007). Representation of Southern Ocean circulation variability in a global finite-element coupled sea ice--ocean model, Polar Dynamics Conference, Bergen, Norway, August 29-31, 2007.
- Wang, Q., Danilov, S., Schröter, J. (2007). On the influence of bottom topography representation on modelling overflows, North Atlantic Subpolar Gyre Workshop, Kiel, Germany, 19-21 March 2007.
- Ivchenko, V., Danilov, S., Sidorenko, D., Schröter, J., Wenzel, M., Aleynik, D. L. (2008). Steric height variability in the North Atlantic on seasonal and interannual scales., General assembly of the European Geophysical Union, EGU2008-A-03963.
- Janjic, T., Nerger, L., Schröter, J. (2008). On domain localization in ensemble based Kalman Filter algorithms, WWRP Workshop, 10-13 November 2008, Buenos Aires, Argentina.
- Reinhardt H., Schröter J. , Die Entwicklung des Meeresspiegels abgeleitet aus Pegeldata, Geodätische Woche, Bremen, 30.9.-2.10.2008
- Richter F., Sidorenko, D., Schröter, J., Using dynamic topography to assess the quasi stationary circulation in the North Atlantic, Geodätische Woche, Bremen, 30.9.-2.10.2008
- Richter F., Sidorenko, D., Reinhardt H., Schröter, J., Using ARGO and altimetry to assess the quasi stationary circulation in the North Atlantic, GODAE Final Symposium, Nice, 12-15 November 2008, France
- Sidorenko, D., Danilov, S., Wang, Q., Huerta-Casas, A., Schröter, J. (2008). On computing transports in finite-element models, Seventh International Workshop on Unstructured Grid Numerical Modelling of Coastal, Shelf and Ocean Flows, September 17-19 2008, Halifax, Canada.
- Wang, Q., Danilov, S., Sidorenko, D., Schröter, J. (2008). Continuous linear and nonconforming discretization of horizontal velocity in FEOM: Assessing effects of stabilization, EGU 2008, 14, April -- 19, April, Wien.
- Wenzel, M., Schröter, J. (2008). Combined Assimilation of GEOSAT, TOPEX/Poseidon and tide gauge reconstruction data into a global OGCM, General Assembly of the European Geophysical Union,.
- Wenzel, M., Schröter, J. (2008). Reconstruction of regional mean sea level anomalies from tide gauges using the neural network approach, OSTST Meeting, "Observing and Forecasting the Ocean", 10-15 Nov, Nice France.