

Das DFG-Schwerpunktprogramm SPP1257 »Massentransporte und Massenverteilungen im System Erde«

Jürgen Kusche, Annette Eicker, Wolfgang Bosch und Frank Flechtner

Zusammenfassung

Für die wissenschaftliche Nutzung der neuen Generation von Schwerefeld- und Altimetersatellitenmissionen wurde im Jahr 2006 durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) das Schwerpunktprogramm SPP1257 »Massentransporte und Massenverteilungen im System Erde« eingerichtet, das eine Laufzeit bis 2012 hat. Im SPP1257 arbeiten deutsche Hydrologen, Glaziologen, Ozeanographen, Geophysiker, Geodäten und Mathematiker gemeinsam daran, das Verständnis von Prozessen im Erdsystem zu verbessern. Das multidisziplinär angelegte Programm hat wesentlich dazu beigetragen, dass deutsche Wissenschaftler auf vielen Teilgebieten der Erdsystemforschung inzwischen zur Weltspitze zählen. In diesem Beitrag werden die Zielsetzungen des Programms, seine Struktur und Strategie, eine Auswahl von bisherigen Ergebnissen sowie mögliche zukünftige Entwicklungen geschildert.

Summary

In 2006, the senate of the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) has established the priority research program SPP1257 »Mass transport and mass distribution in the system Earth«, in order to enable scientific analysis and interpretation of the data from the new generation of gravity and altimetry satellite missions. In the SPP1257, German hydrologists, glaciologists, oceanographers, geophysicists, geodesists and mathematicians work together towards the understanding of Earth system processes. Running for six years, the program has enabled German research groups to play their part in the world's top groups in various areas of Earth system research. Here, we will discuss the objectives of the research program, its structure and strategy, a selection of results achieved so far, and future lines of investigation.

1 Eine neue Generation von Satellitenmissionen

Die Geodäsie befindet sich momentan in der besonderen Situation, dass zugleich eine Vielzahl von geodätischen Satellitenmissionen globale und zueinander komplementäre Beobachtungsdatensätze bereitstellen. Dadurch öffnet sich die einzigartige Möglichkeit, signifikant zu einem verbesserten Verständnis des Systems Erde beizutragen.

Einen wichtigen Beitrag liefert dabei eine Serie von drei neuen Schwerefeldmissionen. Die erste dieser Missionen ist der Satellit CHAMP (CHAllenging Minisatellite Payload, siehe Reigber et al. 2006), der im Jahr 2000 gestartet wurde und mit dessen kontrollierter Bahnabsenkung zum Missionsende mittlerweile begonnen wurde. Primäres Ziel der Mission war und ist die Vermessung des langwelligen Gravitations- und Magnetfeldes der Erde. Bei der Gravitationsfeldbestimmung dient der Satellit selbst als Sensor: die Positionen des Satelliten werden mit einem GPS-Empfänger an Bord kontinuierlich sehr genau gemessen, und durch die Analyse der Bahnstörungen sowie direkt gemessener Störbeschleunigungen kann auf die Struktur des Gravitationsfeldes rückgeschlossen werden. Die Zwillingssatellitenmission GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment, Tapley et al. 2004) liefert seit Mitte 2002 wissenschaftliche Daten zur Schwerefeldbestimmung. Die wichtigste Messgröße bei dieser Mission ist die genaue Bestimmung des Abstands und seiner Änderung zwischen den beiden hintereinander fliegenden Zwillingssatelliten GRACE-A und GRACE-B. Die Abstandsmessung erfolgt mit einem Mikrowelleninstrument im K-Band mit einer Genauigkeit von wenigen μm . Das Ziel der Mission ist insbesondere die Bestimmung der mittel- und langwelligen Gravitationsfeldanteile und deren zeitlichen Variationen. Die kurzweligen Anteile des mittleren Gravitationsfeldes werden durch die Satellitenmission GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer, Rummel et al. 2009a) gemessen, die sich seit März 2009 im Orbit befindet und deren Beobachtungen auf dem Prinzip der Satelliten-Gravitationsradiometrie beruhen.

Zusätzlich zum zeitvariablen Schwerefeld liefern gemessene Änderungen der Oberflächengeometrie von Ozeanen und Eismassen einen komplementären Beobachtungsdatensatz. Auf globaler Skala werden solche



Abb. 1: Geodätische Satellitenmissionen zur Erdbeobachtung (von links): GRACE, GOCE, Jason-2, Cryosat-2

Messungen mithilfe von Altimetersatelliten durchgeführt. Dabei werden senkrecht vom Satelliten aus nach unten abgestrahlte Radioimpulse von der (Meeres-)Oberfläche reflektiert; aus einer genauen Kenntnis der Satellitenbahn und der gemessenen Impulslaufzeiten kann die Oberflächengeometrie rekonstruiert werden. Aktuelle Meeres-Altimetermissionen sind z.B. Jason-2 oder Envisat. Speziell mit der Vermessung der polaren Eisschilde, der Landgletscher und der Meereisbedeckung befassen sich Eisaltimetersatelliten wie ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation SATellite, Zwally et al. 2002) oder Cryosat (Wingham et al. 2006). Letzterer wurde als aktuellste Mission im April 2010 erfolgreich gestartet und trägt ein spezielles Radaraltimeter zur Bestimmung der Dicke von Meereis sowie der Oberflächenhöhen von Landeis in der Arktis und Antarktis (siehe Wingham et al. 2006). Damit sollen Auswirkungen von Klimaschwankungen auf die Eismassen der Erde beobachtet werden.

Eine Ergänzung der Satellitenbeobachtungen stellen terrestrische Messverfahren dar, wie beispielsweise die Supraleit- und Absolutgravimetrie oder die Bestimmung der Oberflächengeometrie mithilfe von GPS. Da diese vollkommen unabhängige Beobachtungen liefern, werden sie auch zur Validierung der Satellitenergebnisse verwendet (Weise et al. 2009).

Für die wissenschaftliche Auswertung der neuartigen Satellitendaten in einem interdisziplinären Ansatz wurde Ende 2006 durch die DFG das Schwerpunktprogramm SPP1257 Massenverteilung und Massentransporte im System Erde eingerichtet.

2 Massentransporte und Massenverteilungen im System Erde

Änderung des Grundwasserstandes und der Bodenfeuchte, das Abschmelzen kontinentaler Eisschilde, der Abfluss von Flusssystemen, Meeresströmungen und die Änderungen des Meeresspiegels, glazial-isostatische Ausgleichsmechanismen und Konvektionsströme im Erdmantel verursachen Transporte und Umverteilung von Massen, die in zeitlichen Variationen des Schwerefeldes und der Geometrie der Erd- und Meeresoberfläche sichtbar werden. Die zeitlichen Schwereänderungen sind allerdings klein, gemessen an den räumlichen Variationen des mittleren Schwerefeldes, das die stationäre Massenverteilung der Erde, Ozeane, Eismassen und Atmosphäre widerspiegelt. Ebenso sind Deformationen der Erdoberfläche und zeitliche Veränderungen in Eis- und Meeresoberfläche sehr klein im Vergleich zur räumlichen Variabilität dieser Topographien, sodass für den Rückschluss auf Erdsystemprozesse neben hochgenauen geodätischen Beobachtungssystemen ein konsistenter und hochgenauer Bezugsrahmen wie auch »state-of-the-art«-Auswertemethoden verfügbar sein müssen.

Eine vertiefte Diskussion setzt zunächst einige Begriffsbestimmungen voraus: Unter »Massenverteilung« ist die raum-zeitliche Verteilung von Masse im Erdsystem zu verstehen, was mathematisch am Einfachsten durch eine orts- und zeitabhängige Dichtefunktion repräsentiert werden kann. Die zeitlich mittlere Massenverteilung in Erdkern, Mantel, Kruste, Ozeanen und Atmosphäre bildet sich in das mittlere Schwerefeld ab, das in der Geodäsie die Basis für physikalische Höhenbezugsflächen und für die Definition von Begriffen wie »horizontal« und »vertikal« bildet. In der Geophysik lassen sich durch Kombination von seismischen, magnetischen, petrologischen und anderen Daten mit dem Schwerefeld in einer Inversion Dichtemodelle ableiten, was wiederum die Erforschung von Georisiken wie Erdbeben und Tsunamis erlaubt (Casten und Snopek 2006). »Massentransporte« bedingen dagegen den Transport von Materieteilchen – in aller Regel Wasser –, was nur im Fall von instationären Strömungen zu einer Änderung der Massenverteilung führt. Aus der Ausmessung von Schwerefeldänderungen mit GRACE lassen sich also nur Änderungen von Transporten direkt bestimmen. Stationäre Ozeanströmungen führen aber zu einer Neigung der Meeresoberfläche gegenüber dem Geoid, sodass bei Kenntnis beider Flächen auch diese ermittelt werden können. Als »Massenbilanz« bezeichnet man ferner die zeitliche Änderung der Gesamtmasse in einem räumlich begrenzten Volumen, wie etwa einem Ozeanbecken oder einem Flusseinzugsgebiet. Änderungen von Transporten werden so in Änderungen von Bilanzen sichtbar.

Einige Zahlenwerte sollen das Gesagte verdeutlichen: Die gesamte Masse der Hydrosphäre – Ozeane, Atmosphäre, terrestrische Wasserspeicher einschließlich der Eismassen – wird auf etwa $1,4 \times 10^9$ Gt geschätzt ($1\text{ Gt} = 1 \times 10^{12}$ kg entspricht etwa 1 km^3 Wasser). Dies bedeutet, dass 0,023 % der Erde aus Wasser besteht, wovon wiederum nur ein geringer Anteil (2,5–3 %) Süßwasser ist. Dieses ist zu etwa zwei Dritteln in polarem Eis, Gletschern und Schnee gebunden und zu etwa einem Drittel in Form von Grundwasser verfügbar. Etwa 0,05 % des Süßwassers (13×10^3 Gt, Oki und Kanae 2006) sind als Wasserdampf in der Atmosphäre vorhanden, was gering erscheint im Vergleich zur Masse der trockenen Luft ($5,1 \times 10^6$ Gt), aber viel gemessen beispielsweise an der terrestrischen Biomasse (geschätzt zu $1\text{--}2 \times 10^3$ Gt) oder etwa dem CO₂-Gehalt der Atmosphäre mit etwa 3×10^3 Gt.

Die größten Massentransporte im hydrologischen Kreislauf treten als Evaporation (etwa 13 Sverdrup oder 410×10^3 Gt/a, $1\text{ Sv} = 1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) und Niederschlag (etwa 12 Sverdrup oder 380×10^3 Gt/a) über dem Ozean (Oki und Kanae 2006, Schmitt 2008) oder in Ozeanströmungen auf. Eine quasi-stationäre Ozeanströmung wie der Golfstrom transportiert etwa 15 Sverdrup Wasser bei 41° nördlicher Breite (Willis 2010). Saisonale Schwankungen der Ozeanmassen (Amplitude $2,5 \times 10^3$ Gt, Rietbroek et al. 2009) aufgrund jahreszeitlich unterschiedlicher Zuflüsse, Niederschlag und Verdunstung erscheinen

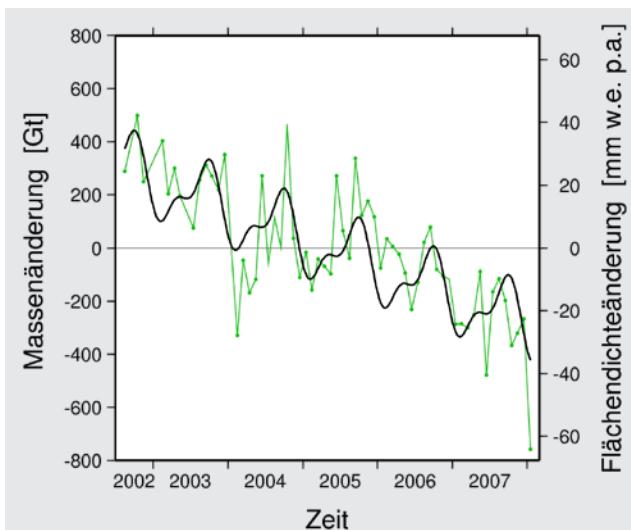


Abb. 2: Eismassenänderung Antarktis (aus Horwath und Dietrich 2009). Grün: GRACE-Zeitreihe, schwarz: jährlicher und halbjährlicher periodischer Anteil

damit als kleine Variationen vor dem Hintergrund eines gewaltigen stationären Masseflusses. Damit wird auch offenbar, dass die Beobachtung beispielsweise der gegenwärtigen Massenbilanzänderung Grönlands (auf bis zu 240 Gt/a geschätzt, Wouters et al. 2008), der Antarktis (auf etwa 109 Gt/a geschätzt, Horwath und Dietrich 2009, siehe auch Abb. 2) oder konsumtiver Grundwasserentnahmen (z.B. für Bewässerungsmaßnahmen, im Norden Indiens etwa auf 18 Gt/a geschätzt, Rodell et al. (2009)) dem Auffinden der sprichwörtlichen Stecknadel im Heuhaufen gleicht.

In der Diskussion um den Klimawandel spielen die Ozeane und die polaren Eisschilde eine große Rolle. Wie weit wird der Meeresspiegel bis zum Ende dieses Jahrhunderts ansteigen? Wie reagieren die Eismassen auf die Klimaerwärmung? Kann es sein, dass sich der Golfstrom verlangsamt und irgendwann zum Stillstand kommt? Diese Fragen können heute noch nicht mit Sicherheit beantwortet werden. Das vollständige Abschmelzen des

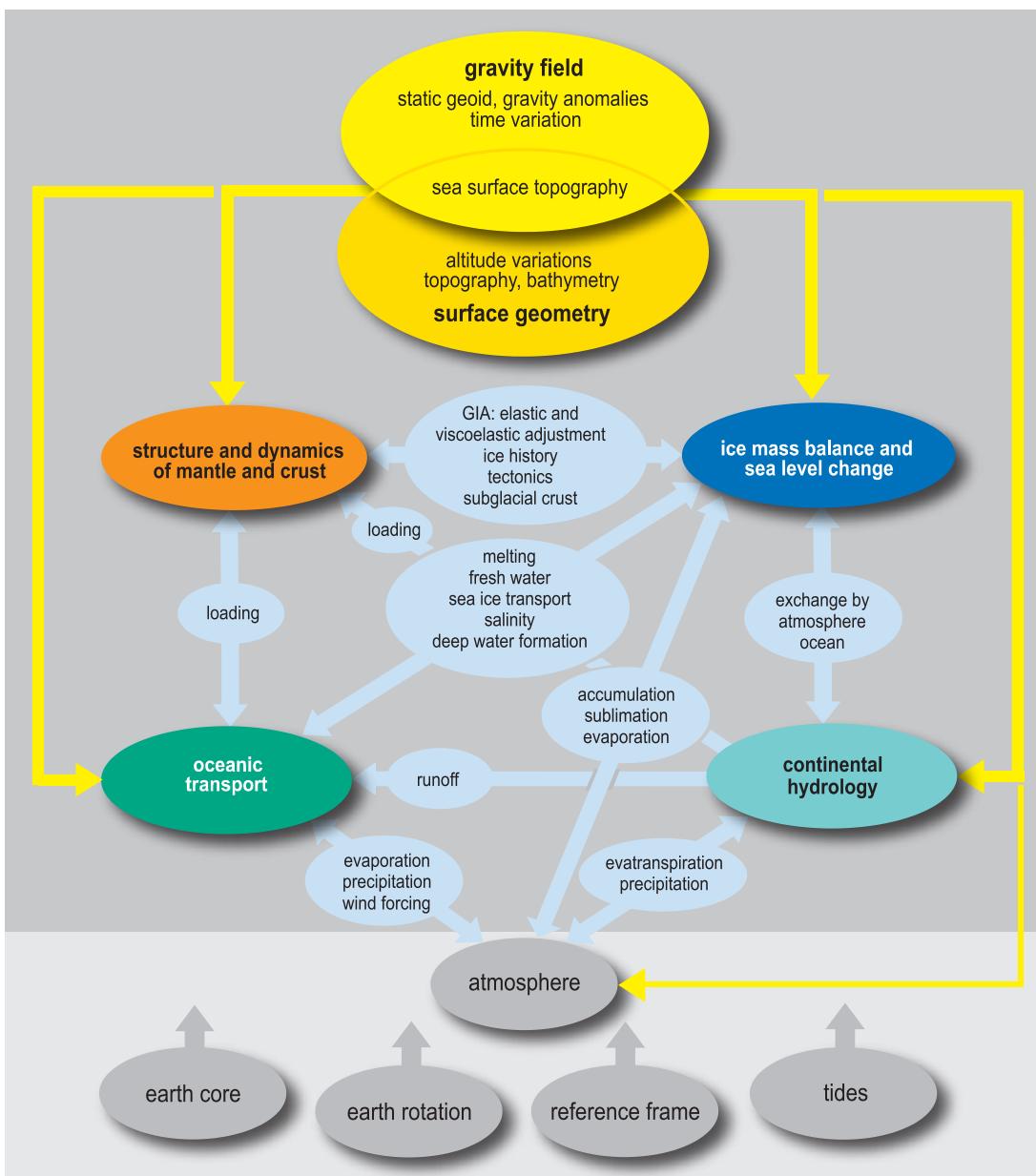


Abb. 3:
Zusammenhänge
zwischen Erd-
systemprozessen
und den Beob-
achtungen des
Erdschwerefeldes
und der Ober-
flächengeometrie
(modifiziert aus
Ilk et al. 2005)

Westantarktischen Eisschildes, ein extremes Szenario, könnte einen globalen Meeresspiegelanstieg von durchschnittlich 3,3 m hervorrufen (Bamber et al. 2009). Um Vorhersagen über die zukünftige Entwicklung der Eisschilde und des Meeresspiegels machen zu können, muss man jedoch zunächst deren früheres und heutiges Verhalten verstehen. Dazu gehört neben der Ausmessung der Meeres- und Eisoberfläche auch die Kenntnis von Strömungen sowie Volumen- und Massentransporten im Ozean, von Fließgeschwindigkeiten und Dicken von Eis, der Balance von Niederschlag und Evaporation, die Separation von wärmebedingtem und eustatischem (durch Zufluss bedingtem) Anteil des Meeresspiegelanstiegs und der Einfluss von Süßwassereintrag auf die Ozeanströmungen. Im IPCC-Bericht des Jahres 2007 wird der Einfluss des Menschen auf den Klimawandel klar herausgestellt; die Wissenschaftler beklagen aber die oft noch unzureichende Datenbasis, wie auch die andauernden Diskussionen der letzten Zeit zeigen. Während man in vielen Fällen bislang auf lokale Messungen angewiesen war, schaffen Schwerefeld- und Altimetersatellitenverfahren nun im Verbund mit dem globalen geodätischen Beobachtungssystem GGOS (Global Geodetic Observing System) die Grundlage für die kontinuierlichen und integralen Erfassungen von Veränderungen von Prozessen und realisieren gewissermaßen die »Metrik« im Erdsystem (Rummel et al. 2009b).

Die Zusammenhänge zwischen Erdsystemprozessen und den Beobachtungen des Erdschwefeldes und der Oberflächengeometrie sind in Abb. 3 dargestellt.

3 Das DFG-Schwerpunktprogramm SPP1257

3.1 Struktur des Programms

Seit den 90er-Jahren besteht in Deutschland eine koordinierte Förderung der Forschung auf dem Gebiet der Nutzung von Schwerefeld-Satellitenmissionen, zunächst im DFG-Bündelprogramm »Geowissenschaftliche Nutzung der Schwerefeldmissionen CHAMP, GRACE und GOCE« und später im Rahmen des BMBF-Programms »Geotechnologien: Beobachtung des Systems Erde aus dem Weltraum«. Ende 2006 wurde dann das DFG-Schwerpunktprogramm SPP1257 »Massenverteilungen und Massentransporte im System Erde« eingerichtet, das in drei zweijährigen Förderphasen bis 2012 läuft.

Das SPP1257 ist multidisziplinär angelegt; es arbeiten Wissenschaftler verschiedener Disziplinen zusammen, die auch erst eine »gemeinsame Sprache« finden mussten. In

den ersten Jahren (Ende 2006 bis Ende 2010) konzentrierte sich das SPP1257 auf das Verständnis der Messsignale, auf vorbereitende Arbeiten innerhalb der Modellierungsdisziplinen und auf erste Experimente zur Kombination von Daten und Modellierungsergebnissen. Um die interdisziplinäre sowie die projektübergreifende Zusammenarbeit zu fördern, wurde zu Beginn der zweiten Förderphase beschlossen, die Arbeiten innerhalb des Schwerpunktpro-

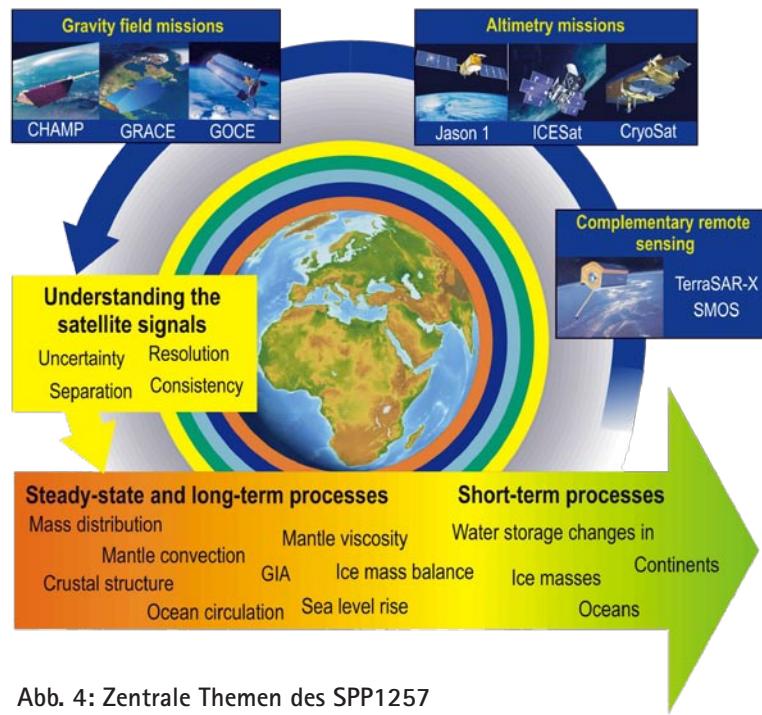


Abb. 4: Zentrale Themen des SPP1257

gramms auf drei zentrale Themen zu fokussieren (siehe Abb. 4). Diese geben nun den inhaltlichen Rahmen für alle im SPP1257 tätigen Projekte vor. Die Themen sind im Einzelnen:

1. Verständnis der Satellitensignale (Understanding the satellite signals)

Ziel ist es hier, den in den Satellitendaten vorhandenen Signalthalt noch besser als bisher auszuschöpfen. Dabei spielen die Gesichtspunkte Unsicherheit, Auflösung, Konsistenz und Signaltrennung (Separation in die Einzelsignale verschiedener Prozesse) eine besondere Rolle. Verbesserte Analysemethoden sind dabei ebenso Gegenstand der Untersuchungen wie die Verbesserung der in der Prozessierung verwendeten Hintergrundmodelle und die Optimierung von Methoden, um die integrierten Massensignale den einzelnen geophysikalischen Phänomenen zuzuordnen. Damit nimmt das Thema »Understanding the satellite signals« eine Querschnittsrolle innerhalb des SPP1257 ein, da nahezu alle Projekte von einer verbesserten Prozessierung der Satellitensignale profitieren.

2. Gleichgewichts- und Langzeitprozesse (Steady-State and long-term processes)

Statische Massenverteilungen und stationäre Prozesse der festen Erde (wie Krustenstrukturen und Mantelkonvektion) bilden sich im Schwerefeld ab, während

sich die stationären Ozeanströmungen in der mittleren Meerestopographie widerspiegeln. Reprozessierte Altimeterdaten und die Gradiometerbeobachtungen des im Jahr 2009 gestarteten GOCE-Satelliten tragen durch gesteigerte Auflösungen und Genauigkeiten zum besseren Verständnis dieser Prozesse bei. Die Analyse von GRACE-Zeitreihen ermöglicht die Bestimmung langzeitiger Massenvariationen. Beispiele sind die postglaziale Landhebung, Eismassenverluste oder der Anstieg des Meeresspiegels.

3. Kurzzeitige Prozesse (Short-term processes)

In diesem dritten integrativen Thema werden disziplinübergreifend diejenigen Massentransportphänomene untersucht, die sich auf Zeitskalen von wöchentlich bis dekadisch abspielen. Dieser Zeitbereich wird dominiert von Umverteilungen der Wassermassen in oberflächennahen Subsystemen wie den Ozeanen, der Kryosphäre oder der kontinentalen Hydrologie und von Wechselwirkungen zwischen diesen Subsystemen. Das Ziel besteht darin, alle relevanten Beiträge zu Wassermassentransporten im globalen hydrologischen Kreislauf konsistent zu integrieren.

3.2 Die Projekte

Aktuell werden im Rahmen des SPP1257 in der zweiten Phase 18 verschiedene Projekte gefördert. Die Themen der Projekte und die jeweils beteiligten wissenschaftlichen Einrichtungen sind in Tab. 1 aufgelistet.

3.3 Vernetzung und Aktivitäten

Zwischen den einzelnen Teilprojekten (Abschnitt 3.2) des SPP1257 besteht eine vielfältige Vernetzung. So nutzen die meisten Projekte neben den frei verfügbaren Modellen und Standard-Satellitendatenprodukten verbesserte, durch andere SPP1257-Gruppen erzeugte Datenprodukte und Modelle. Diese werden den anderen Projekten auf der Internetseite www.massentransporte.de zur Verfügung gestellt. Durch regelmäßig durchgeführte Workshops ist darüber hinaus dafür gesorgt, dass alle beteiligten Projektleiter und -mitarbeiter regelmäßig persönlich zusammenkommen. Vorlesungen und Gruppenarbeit im Rahmen dieser Workshops tragen darüber hinaus zur gegenseitigen Information und Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses bei.

In Tab. 2 ist eine exemplarische Zusammenstellung der durch die Projekte des SPP1257 erzeugten Datenprodukte und Modelle gegeben.

Die Koordination des SPP1257 liegt bei der Professur für Astronomische, Physikalische und Mathematische Geodäsie am Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn. Zur Unterstützung wurde ein Koordinationsgremium mit Wissenschaftlern aus den Bereichen Geodäsie, Ozeanographie, Hydrologie, Kryosphäre, Meeresspiegel, Geodynamik und Geophysik gebildet. Weitere Einzelheiten, Termine sowie wissenschaftliche Resultate des Schwerpunktprogramms (in Form kurzer »Hot Stories«) können der Webseite www.massentransporte.de entnommen werden.

4 Ergebnisse

Die bisher erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse werden derzeit in einem Sonderband für ein internationales Journal aufbereitet. Sie wurden auch bereits anlässlich des »Joint International GRACE Science Team Meeting and DFG SPP1257 Symposium« 2007 am GFZ in Potsdam und der Session »Mass Transport and Mass Distribution in the System Earth« bei den Generalversammlungen der European Geosciences Union (EGU) 2009 und 2010 in Wien dem internationalen Fachpublikum vorgestellt. Eine auch nur annähernd vollständige Auflistung von wissenschaftlichen Ergebnissen ist, wie man auch an den vielfältigen Datenprodukten und Modellen in Tab. 2 ablesen kann, in diesem Rahmen natürlich nicht möglich.

Im Rahmen der Session 9.1 (»Mass Transport and Mass Distribution in the System Earth«) der Generalversammlung der EGU 2010 wurde eine ganze Anzahl von aktuellen Arbeiten aus dem SPP1257 vorgestellt, die wir nachfolgend kurz zusammenfassen. Roman Savcenko und Wolfgang Bosch (München) arbeiten derzeit an der Verbesserung von Meeresgezeitenmodellen mithilfe von Multimissions-Altimeterdaten. Das neueste Resultat aus diesem Projekt ist das globale Gezeitenmodell EOT10a (siehe auch Bosch et al. 2009). Abb. 5 zeigt die residualen

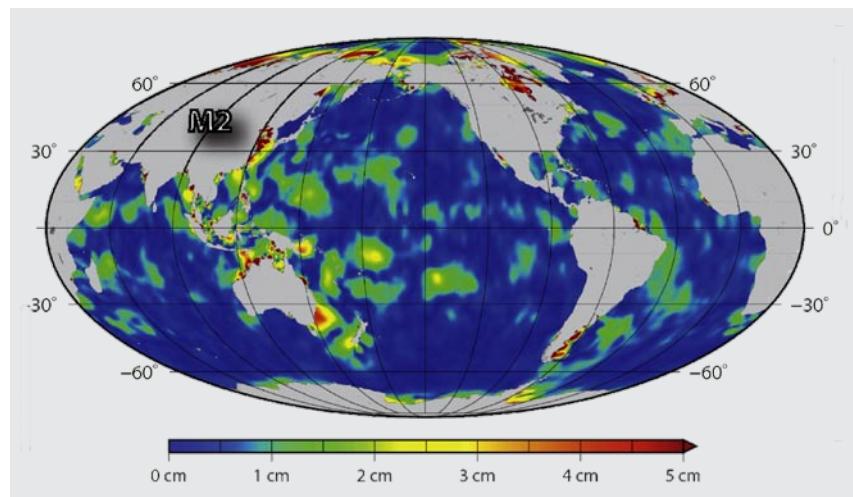


Abb. 5: Residuale Amplituden von EOT08a bezüglich des Modells FES2004, globale M2-Tide

Tab. 1: Projekte der zweiten Förderphase des SPP1257

Acronym	Projektthema	Beteiligte Einrichtungen
AGIA	Antarctic glacial-isostatic adjustment from GRACE and numerical modelling	GFZ Potsdam
Antarctic-IMB	The Antarctic ice sheet mass balance from satellite geodesy and modeling	TU Dresden, AWI Bremerhaven
CASE	Constraints on Tien Shan structure and dynamics from integrative modelling of new satellite gravity, GPS, SAR and seismic data	GFZ Potsdam, TU Berlin
DAROTA	Modeling ocean tides by hydrodynamics and combined analysis of altimetry and GRACE data	Uni Hamburg, DGFI München, Uni Bonn, GFZ Potsdam
DirectWB	The global continental water balance using GRACE spaceborne gravimetry and high-resolution consistent geodetic-hydrometeorological data analysis	Uni Stuttgart, IMK Garmisch-Partenkirchen
FIGO	Fingerprints of ice melting in geodetic GRACE and ocean models	Uni Bonn, AWI Bremerhaven
GEO-TOP	Sea surface topography and mass transport of the Antarctic Circumpolar Current	TU München, AWI Bremerhaven, DGFI München
GREENLAND-ISE	Assessing the current evolution of the Greenland ice sheet	TU Dresden, AWI Bremerhaven
IDEAL-GRACE	Improved de-aliasing for gravity field modelling with GRACE	TU München, GFZ Potsdam, DLR, Uni Hamburg
IDEM	Modelling of the dynamic Earth from an integrative analysis of potential fields, seismic tomography and other geophysical data	GFZ Potsdam
JIGOG	Surface mass redistribution from joint inversion of GPS site displacements, ocean bottom pressure (OBP) models, and GRACE global gravity models	Uni Bonn, AWI Bremerhaven, GFZ Potsdam, TU Dresden
NOGAPSGRAV	Novel geophysical and petrological applications of new-generation satellite-derived gravity data with a focus on hazardous and frontier regions	Uni Kiel, Uni Jena, Uni Potsdam
PROMAN	Program management and scientific networking	Uni Bonn, DGFI München
REGHYDRO	Combined hydrological modelling and regional geodetic estimation of water storage variations in large river basins using GRACE data	Uni Frankfurt, Uni Bonn, Uni Potsdam
RIFUGIO	Rigorous fusion of gravity field into stationary ocean models	Uni Bonn, AWI Bremerhaven
STREMP	Spatial and temporal resolution limits for regional mass transport and mass distribution	TU Darmstadt, Uni Oldenburg, Uni Kassel
TASMAGOG	Temporal and spatial multiscale assessment of mass transport by combination of gravity observations from GRACE and terrestrial stations	GFZ Potsdam, BKG Frankfurt, Uni Jena
VILMA	Development and validation of a three-dimensional viscoelastic lithosphere and mantle model for reducing GRACE gravity data	GFZ Potsdam

Amplituden des Vorgängermodells (EOT08a) bezüglich des älteren Modells FES2004 für die globale M2-Tide, sodass deutlich wird, in welchen Ozeanregionen Verbesserungen erzielt werden können. In derselben Gruppe werden

auch durch Schwatke und Bosch die Eigenschaften von Radar- und Lasermessungen zur Bestimmung von Landgewässerhöhen analysiert und verglichen, und die Entwicklung der neuen Altimeterdatenbank OpenADB wird

Tab. 2: Exemplarische Zusammenstellung der durch die Projekte des SPP1257 erzeugten Datenprodukte und Modelle

Gebiet	Produkte
Schwerefeld	Tägliche, wöchentliche und verbesserte monatliche GRACE-Schwerefeldmodelle Verbesserte De-Aliasingmodelle für die GRACE-Prozessierung Optimierte Filterverfahren und gefilterte GRACE-Schwerefeldmodelle Zeitreihen der Geozentrumsvibration Zeitreihen lokaler Schwerevariationen, basierend auf Supraleitgravimetrie Modelle der oberflächennahen Massenumverteilung basierend auf GRACE-Schwerefeldmodellen und komplementären Daten
Feste Erde	Modelle der Dichte, elastischer (Biegesteifigkeit), petro-physikalischer, thermo-mechanischen Eigenschaften der Erdkruste und des oberen Mantels, tektonische Modelle Verbesserte Modelle der Viskosität des Erdmantels Verbesserte Modelle des glazial-isostatischen Ausgleichs
Ozean und Meeresspiegel	Karten der stationären und zeitvariablen dynamischen Meerestopographie Multimissions-Altimetrie (z. B. Mittelmeerraum) Modelle der 4D-Ozeanzirkulation (z. B. Antarktischer Zirkumpolarstrom) Verbesserte Separation der Einzelbeiträge zum Meeresspiegelanstieg (Eisschilde, thermische Ausdehnung, postglaziale Landhebung, hydrologische Zuflüsse) Verbesserte Ozeangezeitenmodelle
Kryosphäre	Trends und saisonale Eismassenänderungen der polaren Eisschilde, Volumenänderung, Oberflächenneigung und -änderung Schneeakkumulation aus Synthetic Aperture Radar (SAR)
Terrestrische Hydrosphäre	Validierte und kalibrierte hydrologische Modelle Verbesserte Schätzungen der Niederschlags-Evapotranspirations-Bilanz und der Abflüsse für hydrologische Einzugsgebiete

vorangetrieben. In Bremerhaven befassen sich Andreas Macrander und Kollegen mit der Validierung von GRACE-Schwerefeldlösungen mittels Datensätzen von Ozeanbodendruckmessungen. Mittlerweile liegen Datenreihen von einigen hundert Sensoren vor, sodass sich differenzierte Aussagen zu den Schwerefeldlösungen treffen lassen. Roelof Rietbroek (Bonn) und Kollegen untersuchen die Identifikation von räumlichen Mustern im Meeresspiegel mithilfe von GRACE und Altimetrie. Sie konnten anlässlich der EGU 2010 in Wien neue Schätzungen für die Beiträge der großen Eisschilde zum Meeresspiegelanstieg präsentieren. Im selben Projekt wird auch an neuen Ergebnissen für die Schätzung der Massenvariabilität mithilfe von reprozessierten GPS- und GRACE-Lösungen gearbeitet. Sandra Brunnabend (Bremerhaven) und Kollegen können inzwischen den Einfluss von verbesserten Fehlermodellen für den modellierten Ozeanbodendruck in derartigen Dateninversionen quantifizieren. Die Einbeziehung von »state-of-the-art«-Geoidmodellen in Schätzungen des Ozeanzustands wird von Grit Freiwald (Bremerhaven) und Kollegen bearbeitet. Aus demselben Projekt präsentierten Silvia Becker (Bonn) et al. in Wien neue Resultate zur Bestimmung der mittleren Meerestopographie mithilfe sogenannter vollständiger Schwerefeldmodelle.

In Stuttgart können Mohammad Tourian und Kollegen inzwischen das Problem scheinbarer globaler Korrelationen zwischen GRACE-Monatslösungen im Ortsbereich auflösen. In der Stuttgarter Gruppe wird außerdem an Ausreißertests und weiteren Korrekturen für GRACE-Lösungen zur verbesserten Bestimmung der kontinentalen Wasserbilanzen gearbeitet. Schließlich analysieren und vergleichen Luciana Fenoglio-Marc (Darmstadt) und Kollegen altimetrische und gravimetrische Massenvariationen im Mittelmeer und im Schwarzen Meer, beides Ozeanbecken die an der Grenze der GRACE-Auflösung liegen, und diskutieren die Rolle der sterischen Effekte (dieselbe Größenordnung wie die Massenvariation) und der kontinentalen Wasserspeicherung.

Weitere Beiträge aus dem SPP1257 wurden in den Sessions G7 (»Satellite Gravimetry: GRACE, GOCE and Future Missions«), G9.2 (»Mass Transport involving Ground Gravity and Deformation Observations«) und G10/CL1.23/GD2.7/GMPV45 (»Glacial Isostatic Adjustment: Observations and Modeling for Earth Rheology, Dynamics, and Environmental Change«) präsentiert.

5 Kontext und Ausblick

Ein zentrales Problem in der Modellierung zahlreicher Prozesse der festen Erde und des globalen Wasserkreislaufs ist die ungenaue Kenntnis der Massenverteilung sowie der stationären und zeitvariablen Massentransporte im Erdsystem. Um dieses Defizit zu beheben und erstmals Verteilung und Transport von Masse direkt auszumessen, wurden – mit wesentlicher deutscher Beteiligung – die Satellitenmissionen CHAMP, GRACE und GOCE konzipiert und 2000, 2002 bzw. 2009 realisiert. Für die wissenschaftliche Datenauswertung dieser Missionen sowie der neuen Generation von Altimetersatelliten (Jason-Satelliten, Cryosat-2) in einem interdisziplinären Ansatz wurde Ende 2006 durch die DFG das Schwerpunktprogramm SPP1257 »Massenverteilung und Massentransport im System Erde« mit einer Laufzeit bis Ende 2012 eingerichtet.

Im SPP1257 arbeiten Hydrologen, Glaziologen, Ozeanographen, Geophysiker, Geodäten und Mathematiker gemeinsam am Verständnis von Prozessen im Erdsystem. Das multidisziplinär angelegte Programm hat wesentlich dazu beigetragen, dass deutsche Wissenschaftler auf Teilgebieten der Erdsystemforschung inzwischen zur Weltspitze zählen. Dank dieses Förderinstruments können so nicht nur Forschungszentren, sondern vor allem auch universitäre Forschergruppen die für die Forschungsarbeiten zwingend erforderliche Satelliten-dateninfrastruktur optimal nutzen. Durch die intensive Einbindung der Universitäten war und ist das SPP1257 das entscheidende Förderinstrument, um den akademischen Nachwuchs in Deutschland für die interdisziplinäre Modellierung von Massenverteilungen und -transporten zu sensibilisieren und kommende Generationen von Wissenschaftlern auszubilden.

In den ersten Jahren konzentrierte sich das SPP1257 auf das Verständnis der Messsignale, auf vorbereitende Arbeiten innerhalb der Modellierungsdisziplinen und auf erste Experimente zur Kombination von Daten und Modellierungsergebnissen. Die in dieser Phase erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse werden derzeit in einem Sonderband in einem internationalen Journal aufbereitet. Sie zeigen, dass in Deutschland eine breit gefächerte, hoch qualifizierte und motivierte Wissenschaftlergruppe existiert, die mithilfe des SPP1257 einen deutlich sichtbaren Beitrag zu den drängenden Fragen der internationalen Erdsystemforschung leistet. In den verbleibenden zwei Jahren wird das SPP1257 seine Arbeiten auf das verbesserte Verständnis der Satellitendaten und auf die Verbesserung des Prozessverständnisses auf unterschiedlichen Zeitskalen fokussieren.

Wie geht es nun weiter?

Bislang wurde in den Arbeiten des SPP1257 der atmosphärische Anteil des globalen Wasser- und Stoffkreislaufs nicht als eigentliches Untersuchungsthema

behandelt, d. h. atmosphärische Variabilität wird im Wesentlichen mithilfe der operationellen Modelldaten des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) oder anderer Quellen reduziert. Es ist aber zu vermuten, dass bereits bei Würdigung der heutigen Genauigkeit der Beobachtungssysteme die Atmosphäredaten nicht mehr als fehlerfrei behandelt werden sollte. Zukünftige Arbeiten werden daher sicherlich die Validierung und Kalibrierung von atmosphärischen Modellen mittels Schwerefelddaten und später vielleicht auch die Assimilierung dieser Daten in numerische Wettermodelle (ähnlich wie heute schon mit Radiookkultations- und anderen geodätischen Daten) im Auge haben.

Operationelle Anwendungen von Datenprodukten der neuen Schwerefeldmissionen setzen, neben der garantierten langzeitlichen Verfügbarkeit von standardisierten Datenprodukten, meist noch eine Steigerung der räumlichen Auflösung voraus. Beispielsweise reicht die Auflösung von hunderten Kilometern für die Nutzung von GRACE-Daten in operationellen Wassermanagementsystemen nicht aus. Assimilationsexperimente zur räumlichen Downscaling auf kleine Skalen (Zaitchik et al. 2008) lassen ein gewisses Potenzial erwarten, hier muss jedoch noch viel Grundlagenforschung geleistet werden. Ein anderer Weg eröffnet sich jedoch, wenn Nachfolgemissionen für GRACE und GOCE konzipiert werden können: die Nutzung neuester Messtechnologien (z.B. Laserinterferometrische Abstandsmessung) und optimierter Satellitenformationskonzepte (Pendel- oder Cartwheel-Konfigurationen) lassen eine deutliche Genauigkeitssteigerung erwarten, selbst wenn man aus Kostengründen nicht mehr als zwei Satelliten in einer Mission realisieren kann. Gemeinsam mit der nächsten Generation von Altimetersatellitenmissionen (Jason-3, ICESat-2) eröffnen sich hier blendende Aussichten für die Erdsystemforschung der kommenden Jahre.

Zur Diskussion dieser Fragen fand im April 2007 in Noordwijk (Niederlande) der internationale Workshop »The Future of Satellite Gravimetry« statt, bei dem sich etwa 50 Wissenschaftler mit zukünftigen Missionskonzepten und neuen Technologien, mit neuen geowissenschaftlichen Anwendungen von Schwerefeld-Satellitenmissionen und mit Problemen der Separierbarkeit und des De-Aliasing befasst haben (Koop und Rummel 2008). Darauf aufbauend wurde Anfang Oktober 2009 in Graz der internationale IAG-GGOS/ICGP565 Workshop »Towards a Roadmap for Future Satellite Gravity Missions« veranstaltet. Der gegenwärtige Status, Empfehlungen zu zukünftigen geowissenschaftlichen Zielsetzungen von Satelliten-Schwerefeldmissionen, zum Missionsdesign und zur Datenprozessierung, Modellierung und Interpretation, zu neuen Technologien sowie möglichen zukünftigen Produkten und Diensten wurden dort diskutiert und dokumentiert (Plag et al. 2009).

Danksagung

Das Schwerpunktprogramm SPP1257 »Massenverteilung und Massentransport im System Erde« wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Ferner möchten wir hier das Engagement von Karl Heinz Ilk (Bonn) als Gründungssprecher des SPP1257 ausdrücklich würdigen, ohne dessen Einsatz dieses Programm sicher nicht zur Realisierung gelangt wäre.

Literatur

- Bamber J.; Riva R.; Vermeersen B.; LeBrocq A.: Reassessment of the potential sea-level rise from a collapse of the West Antarctic Ice Sheet. *Science*, 324 (5929), 901–903, 2009.
- Casten U.; Snopok K.: Gravity modelling of the Hellenic subduction zone – a regional study. *Tectonophysics*, 417, (3–4), 183–200, 2006.
- Bosch W.; Savcenko R.; Flechtner F.; Dahle C.; Mayer-Gürr T.; Stammer D.; Taguchi E.; Ilk K.-H.: Residual ocean tide signals from satellite altimetry, GRACE gravity fields and hydrodynamic modelling. *Geophys. J. Int.*, 178(3): 1185–1192, 2009.
- Horwath M.; Dietrich R.: Signal and error in mass change inferences from GRACE: the case of Antarctica. *Geophys. J. Int.*, 177(3): 849–864, 2009.
- Ilk K.-H.; Flury J.; Rummel R.; Schwintzer P.; Bosch W.; Haas C.; Schröter J.; Stammer D.; Zahel W.; Miller H.; Dietrich R.; Huybrechts P.; Schmeling H.; Wolf D.; Götze H.-J.; Rieger J.; Bardossy A.; Güntner A.; Gruber T.: Mass transport and mass distribution in the Earth system. Contribution of the new generation of satellite gravity and altimetry missions to geosciences. GFZ Potsdam, 2005.
- Koop R.; Rummel R.: The future of satellite gravimetry. Report from the Workshop on The Future of Satellite Gravimetry, 1.–13. April 2007, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands; Institute of Advanced Study, Technische Universität München, 2008.
- Oki T. und Kanae S.: Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313, 1068–1072, 2006.
- Plag H.-P. et al.: Roadmap towards future satellite gravity missions in support of monitoring of mass redistribution, global change and natural hazards. Report from the Workshop Towards a Roadmap for Future Satellite Gravity Missions, September 30–October 2, Graz University of Technology, Graz, Austria, <http://www.igcp565.org/workshops/Graz/>, 2009.
- Reigber C.; Lühr H.; Grunwaldt L.; Förste C.; König R.; Massmann H.; Falck, C.: CHAMP mission 5 years in orbit. Flury J.; Rummel R.; Reigber C.; Boedecker G.; Rothacher M. und Schreiber U. (Hrsg.): *Observation of the Earth System from Space*. Springer, 3–15, 2006.
- Rietbroek R.; Brunnabend S.-E.; Dahle C.; Kusche J.; Flechtner F.; Schröter J.; Timmermann R.: Changes in total ocean mass derived from GRACE, GPS and ocean modeling with weekly resolution. *J. Geophys. Res.*, 114, C11004, doi:10.1029/2009JC005449, 2009.
- Rodell M.; Velicogna I.; Famiglietti J.: Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 460, 999–1002, 2009.
- Rummel R.; Gruber T.; Flury J.; Schlicht A.: ESA's gravity field and steady-state ocean circulation explorer GOCE. *zfv*, 134(3):125–130, 2009a.
- Rummel R.; Beutler G.; Dehant V.; Gross R.; Ilk K.H.; Plag H.-P.; Poli P.; Rothacher M.; Stein S.; Thomas R.; Woodworth P.L.; Zerbini S.; Zlotnicki V.: Understanding a dynamic planet: Earth science requirements for geodesy. In: *Global Geodetic Observing System – Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020* (Eds. H.-P. Plag and M. Pearlman), Springer, 2009b.
- Schmitt R. W.: Salinity and the global water cycle. *Oceanography*, 21(1)12–19, 2008.
- Tapley B.D.; Bettadpur S.; Watkins M.; Reigber Ch.: The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results. *Geophys. Res. Lett.* 31, L09607: doi 10.1029/2004GL019920, 2004.
- Weise A.; Kröner C.; Abe M.; Ihde J.; Jentzsch G.; Naujoks M.; Wilmes H.; Wziontek H.: Gravity field variations from superconducting gravimeters for GRACE validation. *J. Geodynamics*, 48: 325–330, doi:10.1016/j.jog.2009.09.034, 2009.
- Wingham D.J.; Francis C.R.; Baker S.; Bouzinac C.; Cullen R.; de Chateau-Thierry P.; Laxon S.W.; Mallow U.; Mavrocordatos C.; Phalippou L.; Ratier G.; Rey L.; Rostan F.; Viau P.; Wallis D.: CryoSat: A mission to determine the fluctuations in Earth's land and marine ice fields. *Advances in Space Research* 37, 841–871, 2006.
- Wouters B.; Chambers D.; Schrama E. J. O.: GRACE observes small-scale mass loss in Greenland. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L20501, 2008.
- Zaitchik B.F.; Rodell M.; Reichle R.H.: Assimilation of GRACE terrestrial water storage into a land surface model: results for the Mississippi river basin. *Journal of Hydrometeorology*, 9, 535–548, 2008.
- Zwally H.J.; Schutz B.; Abdalati W.; Abshire J.; Bentley C.; Brenner A.; Bufton J.; Dezio J.; Hancock D.; Harding D.; Herring T.; Minister B.; Quinn K.; Palm S.; Spinhirne J.; Thomas R.: ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land. *Journal of Geodynamics* 34, 405–445, 2002.

Anschrift der Autoren

Prof. Dr. Jürgen Kusche | Dr. Annette Eicker
 Universität Bonn
 Institut für Geodäsie und Geoinformation
 Astronomische, Physikalische und Mathematische Geodäsie
 Nußallee 17, 53115 Bonn
 jkusche@geod.uni-bonn.de
 eicker@geod.uni-bonn.de

Dr. Wolfgang Bosch
 Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI)
 Alfons-Goppel-Straße 11, 80539 München
 bosch@dgfi.badw.de

Dr. Frank Flechtner
 Helmholtz-Zentrum Potsdam GFZ – Deutsches GeoForschungsZentrum
 Dept. 1: Geodäsie und Fernerkundung
 c/o DLR
 München Straße 20, 82234 Wessling
 frank.flechtner@gfz-potsdam.de