

Reinhard Dietrich, Martin Horwath und Andreas Groh

Beitrag der polaren Eismassen zum globalen Meeresspiegelanstieg aus Daten der Satelliten-Schwerfeldmission GRACE

1 Einleitung

Der mittlere Meeresspiegel ist ein wichtiger Indikator für den globalen Klimawandel. Der durch eine Temperaturzunahme hervorgerufene Anstieg des mittleren Meeresspiegels lässt sich dabei in zwei wesentliche Komponenten zerlegen. Einerseits führt die Erwärmung des Ozeanwassers zu einer temperaturbedingten Volumenzunahme. Andererseits wird das an den kontinentalen Eisschilden und Gletschern entstehende Schmelzwasser in die Ozeane eingeleitet (vgl. Tabelle 1).

Die zeitlichen und räumlichen Variationen des mittleren Meeresspiegels lassen sich mit einer Vielzahl geodätischer Verfahren beobachten. Zeitlich hochaufgelöste, punktuelle Informationen über die Meeresspiegelvariationen können aus Pegelmessungen entlang der Küsten, welche teilweise mehr als 150 Jahre zurückreichen, gewonnen werden. Das Defizit der geringen räumlichen Auflösung wird durch geodätische Satellitenverfahren kompensiert. Satellitenaltimeter liefern Beobachtungen der Meeresspiegelvariationen mit nahezu globaler Abdeckung für den Zeitraum der letzten 15 Jahre. In Ergänzung dazu bieten diese Missionen auch die Möglichkeit, die Volumenänderungen der kontinentalen Kryosphäre und somit deren Beitrag zum globalen Meeresspiegelanstieg zu bestimmen. Ein anderer Ansatz wird mit den Satelliten-Schwerfeldmissionen verfolgt. Aus zeitlichen Änderungen des Gravitationsfeldes der Erde lassen sich Massenänderungen in einzelnen Subsystemen der Erde bestimmen.

Der Beitrag stellt die am Institut für Planetare Geodäsie durchgeführten Analysen zur Bestimmung von Eismassen-

änderungen in Grönland und Antarktika aus Daten der Schwerfeldmission GRACE vor. Die Eismassenänderungen der zwei größten kontinentalen Eisschilder und deren Beitrag zum globalen Meeresspiegelanstieg werden bestimmt und mit den Ergebnissen des dritten Berichts des IPCC verglichen.

2 Die Schwerfeldmission GRACE und ihre Produkte

2.1 Missionsbeschreibung

Das *Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)* ist eine gemeinsame Schwerfeldmission von NASA und DLR, welche im März 2002 gestartet wurde und voraussichtlich bis 2013 andauern wird. Die Mission hat das Ziel, das Gravitationsfeld der Erde mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 400 km in einem Intervall von 30 Tagen wiederholt zu bestimmen [2]. GRACE besteht aus zwei identischen Satelliten, die sich in einem Abstand von ~220 km auf einem fast kreisförmigen, polnahen Orbit mit einer Anfangshöhe von ~500 km bewegen. Diese Orbitkonfiguration stellt einen Kompromiss zwischen einer möglichst hohen Sensitivität auf Variationen des Schwerfeldes und der Reduktion von nichtgravitativen Störeinflüssen dar.

Als Beobachtungsgrößen liefert das System die Änderungen der im Gravitationsfeld der Erde variierenden Satellitenbahnen. Diese werden durch die mitgeführten GPS-Empfänger und die kontinuierliche Entfernungsmessung zwischen beiden Satelliten bestimmt. Nichtgravitative Störkräfte können mithilfe von 3-D-Beschleunigungsmessern erfasst werden.

Die mit dem globalen Klimawandel einhergehende Zunahme der mittleren Jahrestemperatur führt zu einem Anstieg des mittleren Meeresspiegels. Hierzu trägt auch das Schmelzwasser der kontinentalen Eismassen bei. Über die Bestimmung der kontinentalen Eismassenänderungen kann somit auf deren Beitrag zum globalen Meeresspiegelanstieg geschlossen werden. Eismassenänderungen spiegeln sich in Variationen des Gravitationsfeldes der Erde wieder. Diese Variationen werden durch die Satelliten-Schwerfeldmission GRACE monatlich bestimmt. Am Institut für Planetare Geodäsie wurden die Eismassenänderungen des Antarktischen und Grönländischen Eisschildes aus 61 GRACE-Monatslösungen für den Zeitraum August 2002 bis Januar 2008 abgeleitet. Sie belaufen sich auf -109 ± 48 bzw. -193 ± 22 Gt/a, was einem äquivalenten Meeresspiegelanstieg von 0.31 bzw. 0.55 mm/a entspricht.

The mean annual temperature rise which goes hand in hand with global warming results in a mean sea level rise. Meltwater influx from continental ice masses is one component of this phenomenon. Hence, the determination of continental ice mass changes makes it possible to infer their contribution to the global mean sea level rise. Such mass variations induce changes in the Earth's gravity field, as observed on a monthly basis by the gravity field satellite mission GRACE. At the Institut für Planetare Geodäsie, mass changes across the ice sheets of Greenland and Antarctica have been derived from 61 GRACE monthly solutions for the period 08/2002 – 01/2008. These ice mass changes add up to -109 ± 48 and -193 ± 22 Gt/a, respectively. This equates to a sea level rise of 0.31 or 0.55 mm/a.

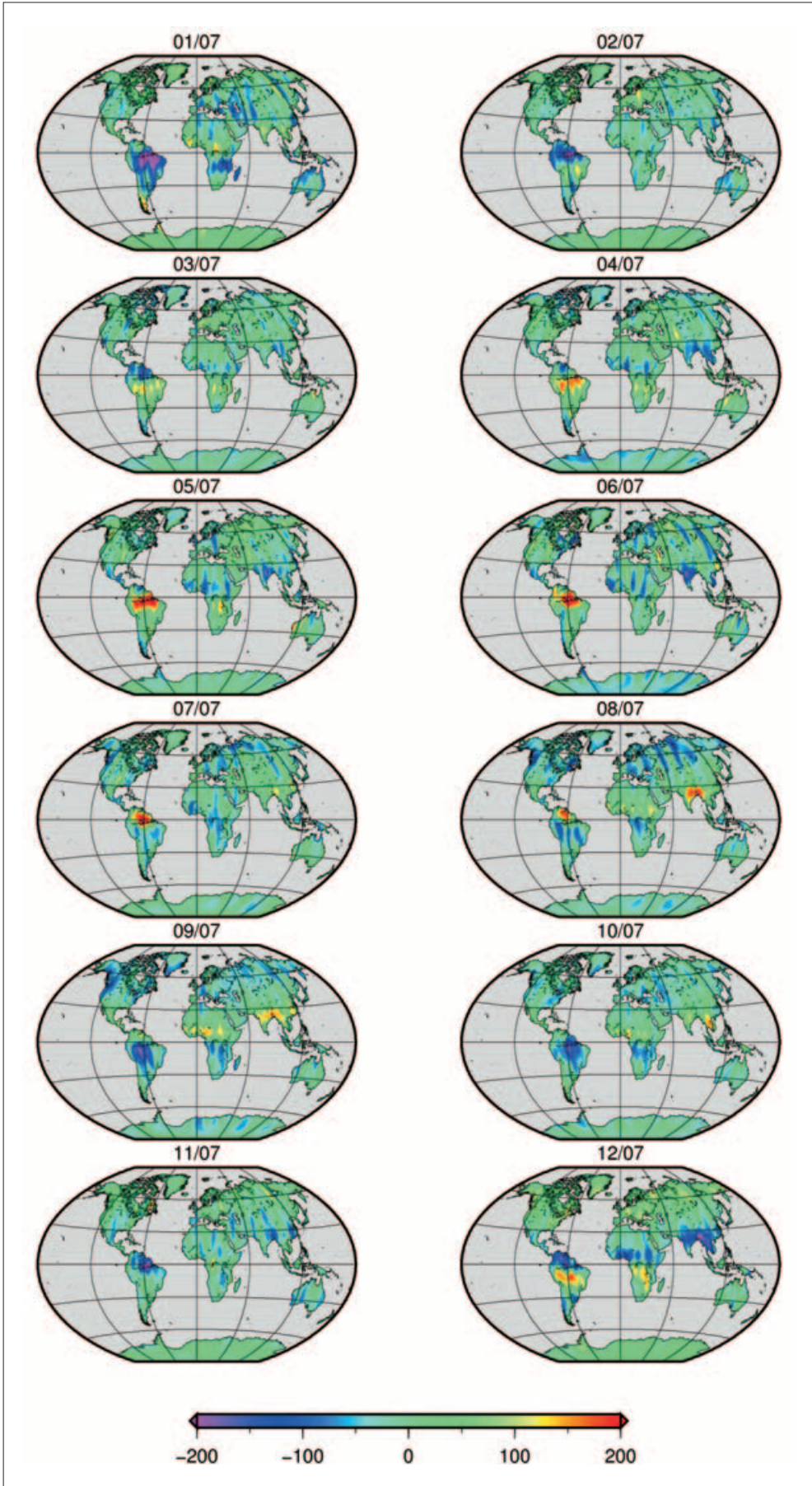


Bild 1. Kontinentale Massenvariationen im Jahr 2007 aus GRACE-Daten (mm Wasseräquivalent). Mittelwert und Trend dieses Jahres wurden reduziert und die Daten mit einem isotropen Gaussfilter der Länge 400 km geglättet.

Tabelle 1
Beiträge zum globalen Meeresspiegelanstieg im Zeitraum 1993 bis 2003 [1]

Quelle des Meeresspiegelanstiegs	Meeresspiegelanstieg im Zeitraum 1993–2003 [mm/a]
Thermische Ausdehnung	1.6 ± 0.5
Gletscher und Eiskappen	0.77 ± 0.22
Grönländischer Eisschild	0.21 ± 0.07
Antarktischer Eisschild	0.21 ± 0.35
Summe der Einzelbeiträge	2.8 ± 0.7

2.2 Missionsprodukte

Die Bahnkonfiguration der Mission ermöglicht die Bestimmung des Gravitationsfeldes der Erde mit einer zeitlichen Auflösung von 30 Tagen. Um zu verhindern, dass Schwerefeldvariationen mit kürzeren Perioden die Monatslösungen verfälschen, werden diese im Rahmen des De-Aliasing während der Prozessierung als a-priori bekannte Größen aus Modellen eingeführt. Hierzu zählen unter anderem Gezeiteneffekte (Ozean-, Festerde- und Polgezeiten) sowie nicht durch Gezeiten hervorgerufene Massenvariationen der Ozeane und der Atmosphäre [3]. Die so bestimmten monatlichen Schwerefeldlösungen liegen in Form von sphärisch-harmonischen Koeffizienten (Stokes-Koeffizienten) bis Grad und Ordnung 120 vor, was einer Wellenlänge von ~ 330 km entspricht. Im Vergleich zu den Modellen der pre-GRACE Ära zeichnen sich die aus der GRACE-Mission abgeleiteten Modelle durch eine Genauigkeitssteigerung von mehr als einer Größenordnung aus. Am genauesten lassen sich die räumlich langperiodischen Signalanteile, also die niederen harmonischen Grade, bestimmen. Die größten Unsicherheiten treten bei der Bestimmung kleinskaliger räumlicher Signale auf.

Aufgrund der beschriebenen Prozessierungsstrategie enthalten die Monatslösungen nur residuale atmosphärische und ozeanische Massenvariationen. Der Hauptanteil der Schwerefeldvariationen lässt sich in einen periodischen (saisonalen) und einen langzeitlichen Anteil unterteilen. Die saisonalen Variationen können überwiegend den jahreszeitlichen

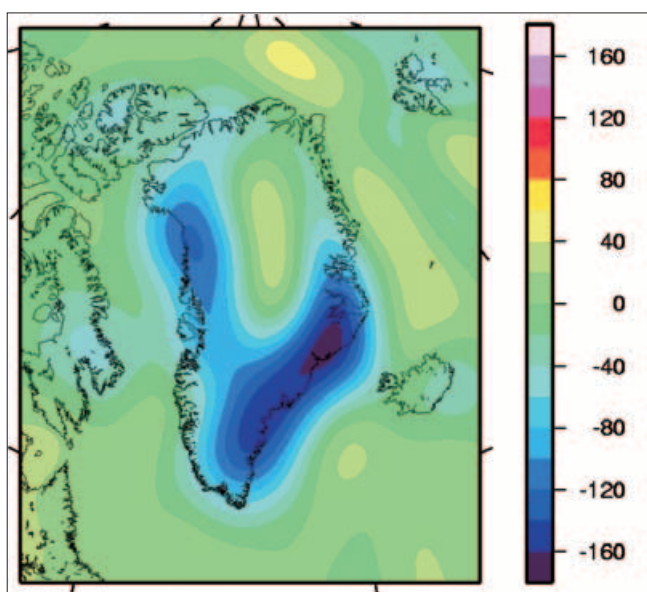


Bild 2. Massenänderung des Grönländischen Eisschildes (linearer Trend) aus GRACE-Daten für den Zeitraum August 2002 bis Januar 2008 (in mm Wasseräquivalent/a)

Änderungen der Massenverteilung der kontinentalen Hydrologie zugeschrieben werden. Bild 1 stellt diesen Signalanteil beispielhaft für das Jahr 2007 in der Einheit „Millimeter Wasseräquivalent“ dar. Es lassen sich deutliche saisonale Variationen in den Einzugsgebieten der großen Flusssysteme der Erde identifizieren. Bei den zu erkennenden Streifenmustern in Nord-Süd-Richtung handelt es sich um Artefakte der GRACE-Fehler, welche bereits durch eine räumliche Glättung der Daten reduziert wurden. Die langzeitliche Komponente der Massenvariationen wird beispielsweise durch die postglaziale Landhebung in den früheren Vereisungsgebieten wie Fennoskandien verursacht. Aber auch rezente Eismassenänderungen der Eisschilde Grönlands und Antarktikas tragen zu dieser Komponente bei. Auf deren Bestimmung sowie die Separation von anderen Signalanteilen soll im nachfolgenden Abschnitt eingegangen werden.

3 Eismassenänderungen aus GRACE-Daten

3.1 Methodik

Die am Institut für Planetare Geodäsie durchgeführten Analysen zur Bestimmung der rezenten Eismassenänderungen Antarktikas [4] und Grönlands basieren auf 61 GRACE-Monatslösungen des Release-4 vom GeoForschungsZentrum Potsdam und überdecken den Zeitraum August 2002 bis Januar 2008.

Da GRACE den integralen Effekt aller Massenänderungen im System Erde beobachtet, besteht die Notwendigkeit, die GRACE-Lösung um all diejenigen Signalanteile zu reduzieren, die nicht mit analysiert werden sollen. Im Fall der kontinentalen Eismassenänderungen handelt es sich dabei hauptsächlich um die kontinentale Hydrologie und den Effekt der postglazialen Landhebung. Für die Reduktion hydrologischer Signale kam das WaterGAP Global Hydrology Model (WGHM) [5] zum Einsatz. Die Komponente der postglazialen Landhebung wurde im Falle Grönlands mithilfe des ICE-4G-Modells [7] und für Antarktika auf Grundlage des IJ05-Modells [6] reduziert.

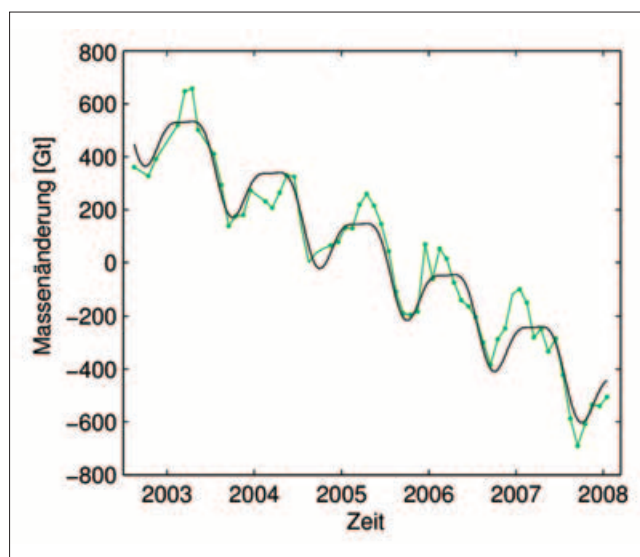


Bild 3. Zeitreihe der Gesamtmasse des Grönländischen Eisschildes aus GRACE-Daten (grün) und angepasstes lineares und saisonales Modell (schwarz)

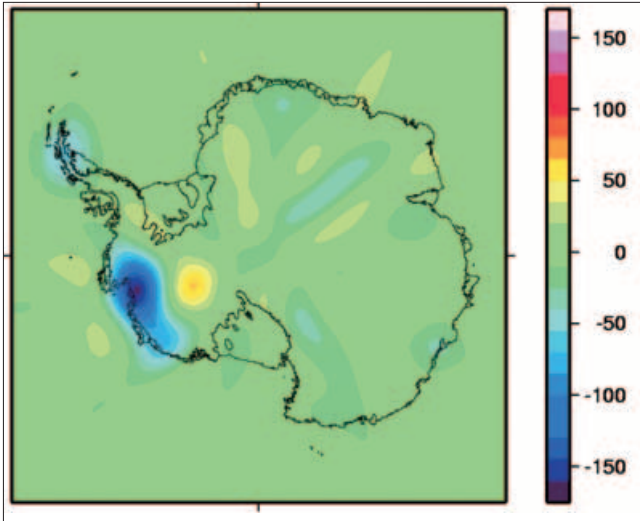


Bild 4. Massenänderung des Antarktischen Eisschildes (linearer Trend) aus GRACE-Daten für den Zeitraum August 2002 bis Januar 2008 (in mm Wasseräquivalent/a).

Nach erfolgter Reduktion der Modelle und eines mittleren Schwerefeldes für den zu untersuchenden Zeitraum sowie einer räumlichen Filterung der Daten kann die räumliche Massenverteilung innerhalb des Gebietes für jeden verfügbaren Monat bestimmt werden. Aus der räumlichen Integration über das Untersuchungsgebiet wird eine entsprechende Zeitreihe der gesamten Eismasse des Gebietes abgeleitet. Die linearen und saisonalen Massenvariationen ergeben sich aus der Anpassung eines entsprechenden Modells an die Zeitreihe der Monatslösungen. Daraus lässt sich unter der vereinfachten Annahme einer gleichförmigen Verteilung des entstehenden Schmelzwassers über die Ozeane die äquivalente globale Meeresspiegeländerung ermitteln.

3.2 Ergebnisse und Interpretation

Bild 2 zeigt die linearen Massenänderungen Grönlands mit der für die GRACE-Daten typischen räumlichen Glättung. Es wird deutlich, dass sich die Massenverluste auf die Küstenregionen konzentrieren und ihr Maximum im Südosten Grönlands erreichen. Mithilfe von Messverfahren der Satellitenfernerkundung konnte in diesem Bereich ein beschleunigtes Fließen und eine Volumenabnahme der großen Grönländischen Gletscher, wie des Kangerdlugssuaq und des Helheim Gletschers, während der letzten Dekade beobachtet werden. Diese mit dem globalen Anstieg der mittleren Jahrestemperatur und der Temperatur des Ozeanwassers einhergehenden Phänomene [1] führen zu einem Massenverlust, wie er mit dem hier vorgestellten Verfahren unabhängig nachgewiesen werden kann. In den

höher gelegenen, küstenfernen Regionen Grönlands ist hingegen eine geringfügige Massenzunahme zu verzeichnen. Diese Akkumulationsgebiete konnten auch durch die wiederholte Bestimmung der Eishöhen mit Verfahren der satellitengestützten Radaraltimetrie identifiziert werden. Bezüglich der zeitlichen Entwicklung der Gesamtmasse des Grönländischen Eisschildes (vgl. Bild 3) wurde ein signifikanter negativer Trend von -193 ± 22 Gt/a ermittelt. Dieses Ergebnis weist eine gute Übereinstimmung mit den aus alternativen Messverfahren abgeleiteten Resultaten auf. So wurde aus Daten der satellitengestützten Laseraltimetermission ICESat eine Massenänderungsrate von -139 ± 68 Gt/a für den Zeitraum Februar 2003 bis April 2007 bestimmt [8]. Überlagert wird dieser lineare Trend von einem ausgeprägten saisonalen Signal. Dieses erreicht sein Maximum zwischen den Monaten Februar und April, am Ende der während der Wintermonate stattfindenden Akkumulationsphase. Im Monat September, am Ende der Ablationsphase, lässt sich das Minimum des saisonalen Signals detektieren.

Neben den linearen Massenänderungen des Antarktischen Eisschildes sind in Bild 4 auch die streifenförmigen Strukturen der GRACE-Fehler erkennbar. Dennoch ist eine deutliche räumliche Variation der Trends auszumachen. Während der östliche Teil Antarktikas eine nahezu ausgeglichene Massenbilanz aufweist, ist der westliche Teil durch einen signifikanten Massenverlust gekennzeichnet. Dieser konzentriert sich auf die weit nach Norden reichende antarktische Halbinsel und den Amundsen-See-Sektor. In letztgenannter Region sorgen vor allem die beschleunigten Abflüsse von Pine-Island- und Thwaites-Gletscher für eine negative Massenbilanz. Für den gesamten Antarktischen Eisschild ergibt sich ein linearer Trend von -109 ± 48 Gt/a. Das saisonale Signal der Massenänderung, welches in Bild 5 dargestellt ist, erreicht sein Maximum im Oktober und sein Minimum im Februar. Diese Zeitpunkte markieren wiederum den Übergang zwischen den Akkumulations- und Ablationsphasen gegen Ende des südpolaren Sommers bzw. Winters.

Der aus den Eismassenänderungen des Grönländischen und Antarktischen Eisschildes abgeleitete Beitrag zum globalen Meeresspiegelanstieg beläuft sich auf 0.55 ± 0.06 bzw. 0.31 ± 0.13 mm/a (Tabelle 2). Im Vergleich dazu scheint der aktuelle IPCC-Report den globalen Meeresspiegelanstieg, welcher durch die kontinentalen Eisschilde verursacht wird (vgl. Tabelle 1), zu unterschätzen. Diese Schlussfolgerung kann auch unter Berücksichtigung der geringfügig unterschiedlichen Analysezeiträume aufrechterhalten werden.

Die sowohl für die Eismassen- als auch für die Meeresspiegeländerungen angegebenen Fehlermaße beinhalten neben den eigentlichen GRACE-Fehlern auch Fehlerabschätzungen für die reduzierten Modelle. Der dominierende Anteil des Fehlerhaushalts kann den noch erheblichen Unsicherheiten in den Modellen der postglazialen Landhebung zugeschrieben werden.

	Eismassenänderung [Gt/a]	äquivalenter Meeresspiegelanstieg [mm/a]
Grönländischer Eisschild	-193 ± 22	0.55 ± 0.06
Antarktischer Eisschild	-109 ± 48	0.31 ± 0.13

Tabelle 2
Eismassen- und äquivalente Meeresspiegeländerungen aus GRACE-Daten für den Zeitraum August 2002 bis Januar 2008.

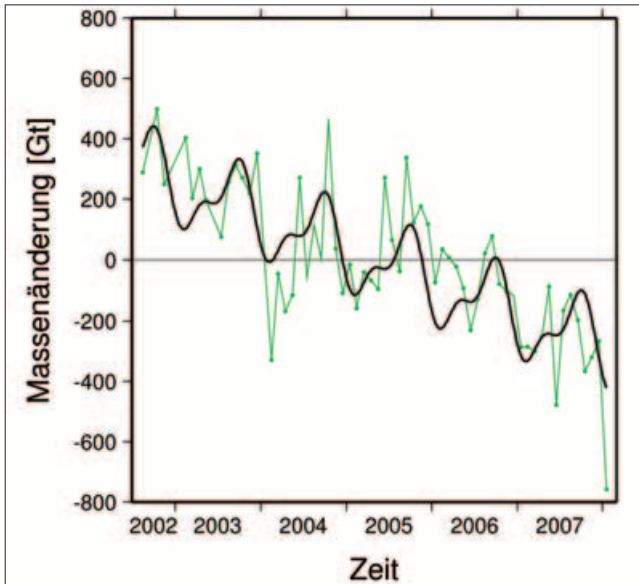


Bild 5. Zeitreihe der Gesamtmasse des Antarktischen Eisschildes aus GRACE-Daten (grün) und angepasstes lineares und saisonales Modell (schwarz).

4 Zusammenfassung

Mit der Schwerefeldmission GRACE verfügt die Wissenschaft über ein Werkzeug, das zur globalen Überwachung von Massentransporten geeignet ist. Unter Verwendung von Reduktionsmodellen lassen sich für einzelne Subsysteme der Erde Massenverteilungen und deren zeitliche Variation als Reaktion auf veränderte Klimabedingungen bestimmen. Im vorliegenden Beitrag wurde dieses Vorgehen für die re-

zenten Eismassenänderungen der kontinentalen Eisschilde und deren Beitrag zum globalen Meeresspiegelanstieg demonstriert. Aber auch großskalige Massenvariationen der kontinentalen Hydrologie lassen sich mithilfe der GRACE-Mission sehr gut untersuchen. Mit der zukünftigen Anwendung verfeinerter Prozessierungsstrategien und der kontinuierlichen Verbesserung der verwendeten Reduktionsmodelle ist mit einer weiteren Genauigkeitssteigerung der abgeleiteten Ergebnisse zu rechnen.

Literatur

- [1] Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M.; Miller, H. L.: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [2] Tapley, B.; Bettadpur, S.; Watkins, M.; Reigber, C.: The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. In: Geophysical Research Letters **31** (2004) 9, 10.1029/2004GL019920
- [3] Bettadpur, S.: GRACE Level-2 Gravity Field Product User Handbook, Rev. 2.3. Technical Report GRACE 327-734 (CSR-GR-03-01). Austin: The University of Texas, 2007
- [4] Horwath, M.; Dietrich, R.: Signal and error in mass change inferences from GRACE: the case of Antarctica. In: Geophysical Journal International **177** (2009), S. 849 – 864, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04139.x
- [5] Döll, P.; Kaspar, F.; Lehner, B.: A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. In: Journal of Hydrology **270** (2003), S. 105 – 134
- [6] Ivins, E.; James, T. J.: Antarctic glacial isostatic adjustment: a new assessment. In: Antarctic Science **17** (2005) 4, S. 541 – 553
- [7] Peltier, W. R.: Global Glacial Isostatic Adjustment: Paleogeodetic and Space-Geodetic Tests of the ICE-4G (VM2) Model. In: J. Quat. Sci. **17** (2002), S. 491 – 510
- [8] Slobbe, D. C.; Ditmar, P.; Lindenberg, R. C.: Estimating the rates of mass change, ice volume change and snow volume change in Greenland from ICESat and GRACE data. In: Geophysical Journal International **176** (2009), S. 95 – 106, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03978.x

Manuskripteingang: 15.6.2009
 Angenommen am: 29.7.2009



Dietrich, Reinhard
 Prof. Dr.-Ing. habil.

Studium Geodäsie von 1968 bis 1974 an der TU Dresden ♦ 1976 Promotion zum Dr.-Ing. ♦ 1991 Habilitation zum Dr.-Ing. habil. ♦ von 1976 bis 1991 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentralinstitut für Physik der Erde in Potsdam ♦ 1992 Projektbereichsleiter am GeoForschungsZentrum Potsdam ♦ seit 1992 Professor für Theoretische und Physikalische Geodäsie und Direktor des Instituts für Planetare Geodäsie, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden



Groh, Andreas
 Dipl.-Ing.

Studium Geodäsie von 2001 bis 2006 an der TU Dresden ♦ 2006 Studienabschluss als Diplom-Ingenieur ♦ seit 2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Planetare Geodäsie, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden



Horwath, Martin
 Dr.-Ing.

Studium der Mathematik von 1992 bis 1998 an der TU Dresden und der Moskauer Staatlichen Lomonossow-Universität ♦ 2007 Promotion zum Dr.-Ing. ♦ seit 2008 PostDoc am LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales) in Toulouse, Frankreich