

# „Schwerkraft ist Klima“

## Beobachtung von Massentransporten im System Erde mit GRACE und GRACE-FO

Frank Flechtner und Christoph Förste  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*The twin satellites of the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) were launched on March 17, 2002. With the two satellites orbiting on the same track, the primary mission goal is to map the Earth's gravity field and its temporal variations with unprecedented accuracy. Furthermore, GRACE provides information on vertical temperature and water vapor distribution of the atmosphere.*

*The masses within the Earth and on its surface are not homogeneously distributed. Many long- to short-term processes, such as molten rock flows in the Earth's core and mantle, ice mass loss in the Polar Regions as well as water mass redistribution in the oceans or in large river basins cause permanent mass displacements. Since the force of gravity of an object depends on its mass, this irregular mass distribution causes the inhomogeneous gravity field of our planet. Consequently, regions of slightly stronger gravity will affect the leading GRACE satellite first, pulling it slightly away from the trailing satellite. This is reflected by a small change in the inter-satellite distance. Consequently, by a high-precision tracking of the permanently changing distance, tiny mass variations on ground can be measured and are provided as monthly maps of the Earth's gravity field which provide new insight into many climatological processes in system Earth.*

*But as the lifetime of GRACE is limited and only longtime series can give sufficient accuracy for long-term climate trend estimations, a GRACE-FO (Follow-On) mission, again involving significant GFZ contribution, is currently scheduled to be launched by the end of 2016.*

Satellitentandem GRACE (Abb. Astrium/GFZ)



Aus dem Weltraum betrachtet erscheint unsere Erde als Kugel. Durch die Rotation um die Polachse ist der Erdkörper jedoch nicht rund, sondern abgeplattet. Deshalb ist unser Planet in erster Annäherung ein Rotationsellipsoid, dessen Radius am Äquator mit rund 6378 km etwa 21 km größer ist als an den Polen. An der Oberfläche dieses Rotationsellipsoids wirkt aufgrund der Massenanziehung eine Gravitationsbeschleunigung in Richtung des Mittelpunkts von  $9,81 \text{ m/s}^2$ , die zum Pol hin auf  $9,83 \text{ m/s}^2$  ansteigt. Berücksichtigt man zudem die der Erdanziehung entgegen gerichtete Zentrifugalbeschleunigung von  $-0,03 \text{ m/s}^2$  am Äquator, so ergibt sich eine Schwerebeschleunigung (oder kurz Schwere) von  $9,78 \text{ m/s}^2$  am Äquator. An den Polen hingegen fallen Gravitation und Schwere zusammen. Die Schwere ändert sich auf der Ellipsoidoberfläche, also mit der Breite. Das sogenannte Schwerepotential ist dort überall gleich. Man spricht daher von einer Äquipotentialfläche des Erdschwerefelds.

Die Masse der Erde ist jedoch nicht gleichmäßig verteilt, zudem hat das Erdinnere einen schalenförmigen Aufbau. An den Übergangszonen zwischen diesen Schalen vom Zentrum über den äußeren Erdkern, den Erdmantel bis zur Erdkruste bestehen unregelmäßig verteilte Dichtesprünge und auch innerhalb der Schalen variiert die Dichte. Augenfällig wird die ungleiche Massenverteilung an der Erdoberfläche anhand der Topographie, d. h. des Reliefs. Diese Dichteanomalien bewirken, dass das tatsächliche Schwerefeld vom sogenannten Normalschwerefeld des Rotationsellipsoids abweicht. Daraus folgt, dass die reale Äquipotentialfläche der Erde gegenüber der Ellipsoidoberfläche deformiert ist. Sie weist Beulen und Dellen mit Abweichungen von bis zu 100 m auf und erinnert bei stark überhöhter Darstellung an eine Kartoffel (Abb. 1). Diese Fläche, die man als Geoid bezeichnet, kann man sich auf den Weltmeeren als diejenige vorstellen, die eingenommen würde, wenn das Wasser vollkommen in Ruhe wäre (d. h. ohne Gezeiten, Meeresströmungen und Winde). Deshalb ist das Geoid auch als mittlerer Meeresspiegel bekannt (Hofmann-Wellenhof und Moritz, 2006).

## Globale Schwerefeldbestimmung mit GRACE

Die Feinstruktur des Erdschwerefelds, d. h. das Geoid, lässt sich im globalen Maßstab am genauesten mit Satelliten bestimmen. Wäre die Erde eine homogen aufgebaute Kugel, würden Satelliten auf exakten Ellipsenbahnen um die Erde kreisen. Doch die Abweichung von der Kugelform verursacht auch Abweichungen von den idealen Bahnellipsen der Satelliten. Die Analyse dieser Bahnstörungen ermöglicht umgekehrt,

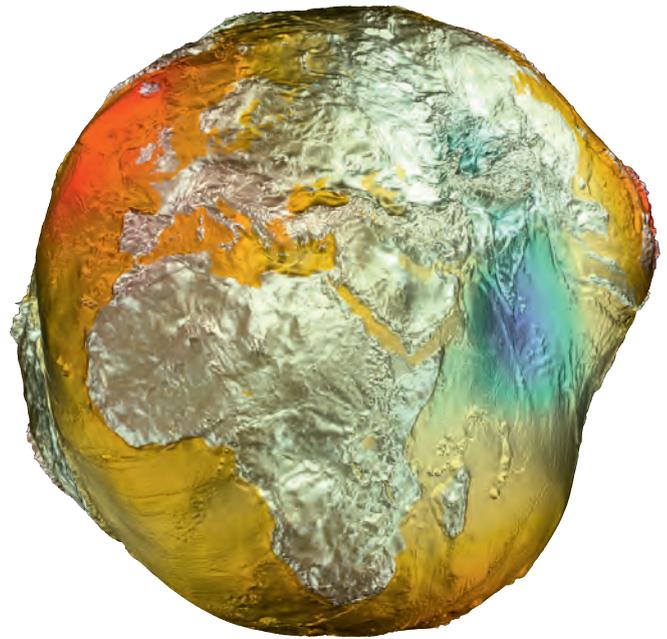


Abb. 1: Das Geoid in stark überhöhter vertikaler Darstellung, bekannt auch als „Potsdamer Schwerekartoffel“

Fig. 1: The geoid in a strongly vertical exaggerated visualization, also known as the “Potsdam gravity potato”

die unregelmäßige Struktur des Erdschwerefelds abzuleiten. Seit Beginn des Raumfahrtzeitalters hat man deshalb Messungen von Bahnstörungen für die Ableitung von Schwerefeldparametern genutzt, beginnend mit der exakten Bestimmung der Erdabplattung bis zu den heutigen hochauflösenden globalen Erdschwerefeldmodellen. Um die Bahnstörungen bestimmen zu können, müssen die Satellitenbahnen hochpräzise vermessen werden. Dies erfolgte früher vom Boden aus fotografisch und später mit Laser-Teleskopen. Seit einigen Jahren werden dazu Empfänger des amerikanischen Navigationssystems GPS (Global Positioning System) an Bord von Satelliten verwendet. GPS gestattet die kontinuierliche Bahnverfolgung mit Zentimetergenauigkeit im Sekundentakt und wurde erstmals ab dem Jahr 2000 auf dem unter Federführung des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ entwickelten Satelliten CHAMP (CHALLENGING Mini-satellite Payload) eingesetzt. Dies bedeutete einen Meilenstein in der Steigerung der Genauigkeit der satellitengestützten Schwerefeldbestimmung.

Das Satellitenpaar GRACE (Tapley et al., 2004) startete am 17. März 2002 seine geowissenschaftliche Raumfahrtmission. Ziel ist die Vermessung der Erdanziehungskraft und erstmals auch ihrer zeitlichen Veränderung mit bisher unerreichter Genauigkeit. GRACE durchleuchtet zudem die Atmosphäre und gibt Auskunft über ihre vertikale Temperaturverteilung und ihren Wasserdampfgehalt (vgl. dazu den Beitrag von Wickert et al. in diesem Heft). Die Mission besteht aus zwei baugleichen Satelliten, die mit einem Abstand von etwa 220 km auf der gleichen Umlaufbahn um die Erde fliegen. Die Satelliten hatten eine Anfangsflughöhe von 500 km und umrunden die Erde in etwa 95 Minuten auf einer nahezu polaren Bahn. Die



Kontakt: F. Flechtner  
(frank.flechtner@gfz-potsdam.de)

Mission ist ein Gemeinschaftsprojekt mit der amerikanischen Weltraumbehörde NASA und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Die wissenschaftliche Datenauswertung erfolgt durch das GFZ sowie beim Center for Space Research der Universität Austin, Texas und beim Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena, Kalifornien.

Wie bei der Vorgängermission CHAMP ist jeder der beiden Satelliten mit einem GPS-Empfänger zur Positionsbestimmung, einem im Vergleich zu CHAMP zehnmal genaueren Beschleunigungsmesser zur Korrektur von Störbeschleunigungen durch die Restatmosphäre und die Sonneneinstrahlung sowie zwei Sternsensoren zur Bestimmung der Satellitenlage im Raum ausgerüstet. Herzstück der Instrumentierung ist das ultrapräzise K-Band-Abstandsmesssystem. Zur Vervollständigung der Instrumente hat das GFZ für jeden der beiden Satelliten einen Laser-Retroreflektor gefertigt und beigelegt, der bereits sehr erfolgreich auf CHAMP im Einsatz war. Damit kann die Entfernung zwischen der Erdoberfläche und den Satelliten auf wenige Millimeter genau bestimmt werden, was der unabhängigen Überprüfung der mit den GPS-Daten errechneten Satellitenbahnen dient.

## Klimaforschung mit GRACE

Da die Anziehungskraft eines Körpers von seiner Masse abhängt, bedingt die ungleiche Massenverteilung unseres Planeten ein ungleichförmiges Feld der Gravitation. Die hintereinander fliegenden GRACE-Satelliten werden daher, zeitlich etwas versetzt, mal stärker und mal schwächer angezogen. Dies zeigt sich unmittelbar in der Distanz zwischen den Satelliten in einer kleinen Entfernungsänderung. Durch die hochpräzise, kontinuierliche Messung dieser Abstandsänderung mit einer Genauigkeit von einigen tausendstel Millimeter (etwa dem Zehntel des Durchmessers eines menschlichen Haars) bei einem Abstand von 220 km können somit auch geringste Massenunterschiede erfasst werden. Damit ist es mit GRACE-Daten erstmals möglich, auf monatlicher Basis Massenveränderungen im System Erde mit einer räumlichen Auflösung von etwa 300 bis 500 km zu beobachten.

Der Name der GRACE-Mission deutet an, dass die hochpräzise Vermessung der Erdanziehung wichtige Informationen über das Klima gibt. Die an der Mission beteiligten Forscherinnen und Forscher ergänzten daher Newtons Feststellung „Masse ist Schwerkraft“ mit „Schwerkraft ist Klima“.

Viele Prozesse im Klimageschehen unseres Planeten sind von weit reichenden Wassermassentransporten begleitet: Ozeanströmungen transportieren Wärme in Richtung der Pole und Kälte in Richtung Äquator, die Ab- oder Zunahme der Eis- und Schneemassen z. B. in den Pol- oder großen Gletschergebieten sind wichtige Faktoren im Klima, hinzu kommen Schwankun-

gen des mittleren Meeresspiegels. Die größten zeitlichen Änderungen des Schwerefelds werden jedoch durch den Transport von Wassermassen auf den Landflächen der Erde verursacht. Der kontinentale Wassergehalt ist letztlich eine Bilanz zwischen Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Speicherung, die jahreszeitabhängig ist (Abb. 2).

Wasser ist jedoch auch Masse, deren Transport Änderungen im Schwerefeld der Erde nach sich zieht. Diese Prozesse lassen sich hervorragend von Satelliten aus beobachten. „Schwerkraft ist Klima“ sagt genau das aus: Die Flugbahnänderungen von Satelliten geben uns Auskunft über die globale Wasserverteilung, einer wesentlichen Bestimmungsgröße des Klimas. Voraussetzung hierzu ist eine so präzise Bestimmung der Flugbahnänderungen, wie es bei GRACE gelungen ist. So umfassend wie bei keinem anderen boden- oder satellitengestützten Beobachtungssystem bilden GRACE-Daten die Speicheränderungen im Grundwasser, im Boden, in der Schneebedeckung und in Flüssen, Seen sowie Überflutungsgebieten ab. Die Analysen von GRACE-Daten zeigen, wie sich die Variabilität der klimatischen Bedingungen (z. B. Niederschlag) auf jahreszeitliche und jährliche Variationen der Wasserspeicherung in großen Flusseinzugsgebieten weltweit auswirkt (Güntner et al., 2007). Unter Berücksichtigung weiterer Beobachtungsdaten sind so auch Wasserflüsse in einzelnen, ausgedehnten Regionen erfassbar, wie beispielsweise die Überflutungsdynamik in Oberflächengewässern. Außerdem können großräumige hydrologische Modelle überprüft und angepasst werden, um ihre Prognosefähigkeit für klimabedingte Änderungen des globalen und regionalen Wasserkreislaufs zu erhöhen (Werth und Güntner, 2010). Vertiefende Einblicke liefern die drei folgenden Beiträge in diesem Heft von Esselborn und Schöne zum Thema Meeresspiegelschwankungen (Seite 16ff), von Sasgen et al. zu Massentransporten in der Antarktis (Seite 20ff) und von Güntner et al. zur Variabilität des kontinentalen Wasserkreislaufs aus GRACE-Schwerefelddaten (Seite 26ff).

## Ausblick

Mit der Satellitenmission GRACE, bei der das GFZ seit 2002 innerhalb des gemeinsamen deutsch-amerikanischen wissenschaftlichen Auswertesystems eine führende Rolle ausübt, konnten erstmals aus der Beobachtung von Massentransporten entscheidende Faktoren für das globale Klima abgeleitet werden. GRACE feierte am 17. März 2012 seinen 10. Geburtstag und arbeitet, wie zuvor CHAMP, bereits doppelt so lange wie ursprünglich geplant (vgl. auch Beitrag zum zehnjährigen Geburtstag in der Rubrik „Netzwerk“). Ein Ende der Mission ist mit Blick auf die technischen Bedingungen gleichwohl absehbar.

Da insbesondere lange Zeitreihen zuverlässige Aussagen über globale Trends im Klimageschehen liefern können, hat das GFZ bereits seit 2009 in eigenen Studien und gemeinsam mit

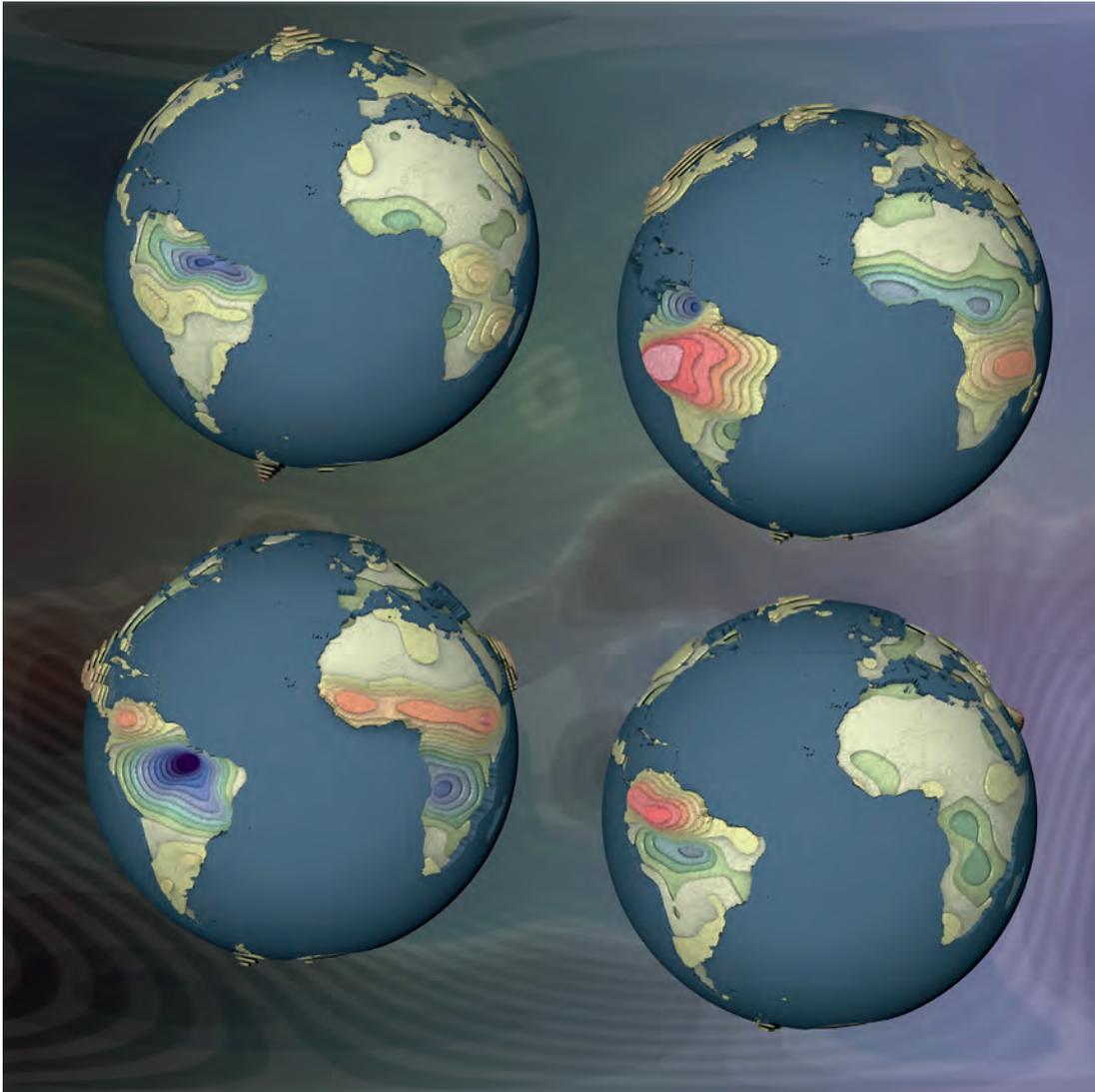


Abb. 2: Wasser-massenänderungen in Südamerika und Afrika im Januar, April, Juli und Oktober 2008 (im Uhrzeigersinn, beginnend oben links) beobachtet mit GRACE

Fig. 2: Water mass redistribution in South America and Africa in January, April, July and October 2008 (clockwise starting top left) observed by GRACE

der europäischen Weltraumbehörde ESA untersucht, wie eine geeignete Nachfolgemission realisiert werden kann. Es hat sich dabei gezeigt, dass insbesondere die Vermessung des Abstands zwischen den beiden Satelliten weiter verbessert werden sollte. Daher wird derzeit gemeinsam mit den US-Kollegen die Nachfolgemission GRACE-FO (GRACE Follow-on) entwickelt, die voraussichtlich Ende 2016 gestartet werden kann. Auf diesem, sonst mit GRACE nahezu identisch aufgebautem Satellitenpaar, soll neben dem erprobten Mikrowellenlink von GRACE auch ein sogenanntes Laser Ranging Instrument (LRI) als Demonstrationsexperiment mitgeflogen werden. Dieses neuartige Entfernungsmessgerät, das zur Zeit in Deutschland gemeinsam mit dem Jet Propulsion Laboratory der NASA entwickelt und gebaut wird, ermöglicht die Verbesserung der Abstandsmessung um etwa eine Größenordnung (Sheard et al., 2012). Zusätzliche weitere Leistungssteigerungen, die auf mit GRACE gewonnenen Erfahrungen in Kombination mit einer optimierten Satellitenbahn basieren, werden eine deutlich höhere räumliche aber auch zeitliche Auflösung in der Schwerefeldberechnung ermöglichen. Dies wird zu einem besseren Verständnis des Klimageschehens und seiner Abhängigkeit von relevanten Erdsystem-Parametern beitragen.

## Literatur

- Güntner, A., Schmidt, R., Döll, P. (2007): Supporting large-scale hydrogeological monitoring and modelling by time-variable gravity data. - *Hydrogeology Journal*, 15, 1, 167-170, 10.1007/s10040-006-0089-1.
- Hofmann-Wellenhof, B., Moritz, H. (2006): *Physical Geodesy*, Wien, XVII, 403 P.
- Sheard, B. S., Heinzel, G., Danzmann, K., Shaddock, D. A., Klipstein, W. M., Folkner, W. M. (2012): Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission. - *Journal of Geodesy*
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., Reigber, C. (2004): The gravity recovery and climate experiment : mission overview and early results. - *Geophysical Research Letters*, 31, L09607, 10.1029/2004GL019920.
- Werth, S., Güntner, A. (2010): Calibration analysis for water storage variability of the global hydrological model WGHM. - *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 1, 59-78, 10.5194/hess-14-59-2010.