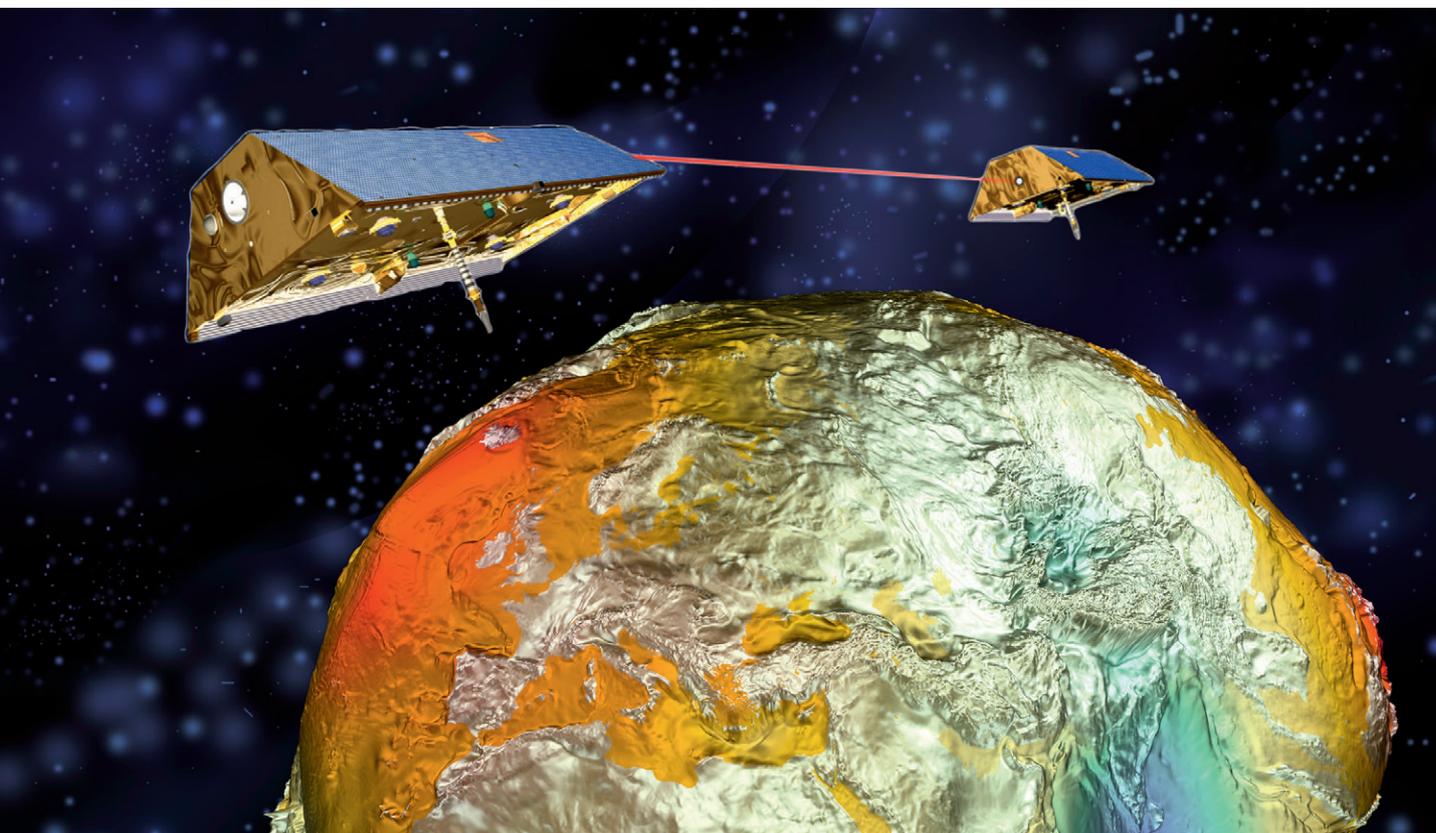


Beobachtung von Massentransporten im System Erde mit GRACE und GRACE-FO

Frank Flechtner, Christoph Dahle, Ludwig Grunwaldt
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Since March 2002 the GFZ German Research Centre for Geosciences, together with NASA's Jet Propulsion Laboratory (JPL) and the German Space Agency (DLR), operates the twin satellite mission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) and is part of the joint US-German Science Data System. Over GRACE's 15+ years of operation, researchers from GFZ and other national/international institutions have developed innovative techniques to use the GRACE mass transport data set and to combine it with other observations and models for new insights into the Earth system. Highlights are the monitoring of changes in the hydrological cycle such as ground water depletion and related droughts, prognosis of floods in large river systems, the melting of Greenland's and Antarctica's ice sheets and large glacier systems, changes in the ocean dynamics and related sea level rise or observation of postseismic relaxation after large earthquakes.

Currently, GFZ implements with JPL/NASA the successor mission GRACE-FO (Follow-on) which is due for launch in early 2018. The primary objective of GRACE-FO is to continue mass transport monitoring as only by long time series reliable conclusions on climate change can be drawn. The secondary objectives are to continue GRACE's radio occultation measurements for provision to Numerical Weather Services and to demonstrate the improvement of the measurement of the inter-satellite separation by an innovative laser ranging interferometer. This is a necessary prerequisite to improve the spatial and temporal resolution by Next Generation Gravity Missions.



Eine der wichtigsten gesellschaftlichen Herausforderungen ist die Erhaltung unserer Lebensräume. Damit einhergehende Fragen lauten: Wie kann der weltweit stetig zunehmende Energiebedarf gedeckt werden, ohne den Klimawandel zu beschleunigen? Mit welchen Modellen können Klimaänderungen verlässlich vorhergesagt werden? Welche Auswirkungen des Klimawandels können beeinflusst werden, an welche muss sich die Gesellschaft anpassen und welche Technologien sind dafür nötig?

An der Beantwortung dieser Fragen wird insbesondere in den Programmen der Forschungsbereiche „Energie“ und „Erde und Umwelt“ der Helmholtz-Gemeinschaft gearbeitet. Vor dem Hintergrund der Notwendigkeit, Strategien für die Anpassung an den globalen Wandel zu entwickeln, wird es immer wichtiger, Systemwissen und wissenschaftliche Daten für die gesellschaftliche Daseinsvorsorge aufzubereiten und verfügbar zu machen. Der Forschungsbereich „Erde und Umwelt“ arbeitet dabei an der Etablierung von Daten- und Wissensplattformen u. a. in den Bereichen Georesourcenmanagement und Erdsystembeobachtung sowie an Frühwarnsystemen und Krisenbewältigungsstrategien für Naturgefahren. Damit wird dringend benötigtes Orientierungs- und Handlungswissen für Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit bereitgestellt und nutzbar gemacht.

Integraler Bestandteil und Voraussetzung dafür ist die großräumige, flächendeckende und multitemporale Erfassung der Landoberflächen, der Ozeane und der Atmosphäre. Nur durch die satellitengestützte Erdbeobachtung können Zusammenhänge innerhalb der und zwischen den unterschiedlichen irdischen Sphären und deren Veränderungen präzise erkannt und die dafür ursächlichen dynamischen Prozesse verstanden werden.

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ betreibt aus diesem Grund neben anderen Satellitenmissionen seit 2002 zusammen mit seinen Partnern, dem Jet Propulsion Laboratory (JPL) der US-Raumfahrtbehörde NASA und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), die Zwillingsatellitenmission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) und realisiert derzeit zusammen

mit der NASA die Nachfolgemission GRACE-FO (Follow-on), die im Frühjahr 2018 gestartet werden soll.

Messprinzip von GRACE

Die völlig neue Idee bei GRACE ist, über die Messung der Masse Informationen über das System Erde zu gewinnen. Je größer die Masse eines Objekts ist, desto größer ist auch dessen Anziehungskraft. So üben die Alpen beispielsweise eine höhere Anziehungskraft aus als die norddeutsche Tiefebene. Die winzigen Unterschiede sind für Menschen nicht spürbar, aber Satelliten können die Veränderung messen. Sobald sie beim Umkreisen der Erde über eine massereiche Region fliegen, beschleunigen sie minimal, wenn sie darauf zufliegen, und werden wieder langsamer, wenn sie sich von der Masse entfernen.

Der weitaus größte Teil der Erdanziehungskraft rührt von der Masse der festen Erde her. Ein kleiner Teil allerdings geht auf das Wasser auf oder nahe der Oberfläche zurück. Ozeane, Flüsse, Seen, Gletscher und Grundwasser verändern sich dabei viel rascher als das zähflüssige Gestein im Erdinneren, denn sie reagieren auf Jahreszeiten, Stürme, Dürren und andere Wettereffekte. Das Konzept für GRACE entstand aus der Erkenntnis, dass es möglich ist, die daraus resultierenden winzigen Schwerkraftänderungen aus dem All zu messen und so die Geheimnisse des Wasserkreislaufs zu erforschen.

GRACE hat diese Massenveränderungen gemessen, indem deren Auswirkungen auf das Satellitenduo aufgezeichnet wurden. Die beiden baugleichen Satelliten umkreisten unseren Planeten bis Oktober 2017 mit 220 km Abstand zueinander in einer Anfangsbahnhöhe von 500 km. Wurde einer der beiden Satelliten schneller, weil er als erstes ein massereiches Objekt überflog, vergrößerte sich der Abstand um den Bruchteil einer Haaresbreite zum anderen Satelliten. Mittels Mikrowellen konnten diese Änderungen im Mikrometerbereich sehr genau gemessen werden. Hinzu kamen GPS-Empfänger und Sternensensoren, um kontinuierlich die Position und Lage der Satelliten zu bestimmen, sowie ein Beschleunigungsmesser im Massenzentrum der Satelliten, um Bremsseffekte zu erkennen, die etwa durch Reibung an atmosphärischen Teilchen entstehen. Aus all diesen Daten berechneten die Forscherinnen und Forscher des GFZ monatliche Karten der regionalen Änderungen der Erdanziehungskraft und der daraus resultierenden Veränderungen der Massen an der Oberfläche.

Links: Satellitenzwillinge GRACE mit dem Schwerfeld der Erde (in stark überhöhter Form), hergeleitet aus Messdaten der Satelliten CHAMP und GRACE sowie aus Daten der Gravimetrie und Satellitenaltimetrie (Abb.: Astrium/GFZ)

Left: Twin-satellites GRACE with the Earth's gravity field



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

Auswahl wissenschaftlicher Ergebnisse der GRACE-Mission

Seit dem Start von GRACE vor mehr als 15 Jahren haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler weltweit Methoden entwickelt und verfeinert, um die GRACE-Schwerefelddaten mit geophysikalischen Modellen und anderen Beobachtungssystemen zu verknüpfen – im Folgenden einige Highlights.

Grundwasserbeobachtung

In Böden und wasserführenden Gesteinsschichten (Aquiferen) gespeichertes Grundwasser kann nur punktuell, z. B. mit Hilfe von Brunnen, gemessen werden. Diese In-situ-Messungen sind aufwendig, teuer und liefern jeweils nur lokale Informationen. GRACE-Massenveränderungen stellen grundsätzlich den integralen Anteil aller hydrologischen Speicherkomponenten dar. Kennt man z. B. aus Satellitendaten wie die der ESA-Mission SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) die oberflächennahe Bodenfeuchte, aus In-situ-Messungen oder Datenarchiven die Abflussdaten der umgebenden Flüsse sowie die Anteile der Oberflächenwasser und der Schneebedeckung, kann man diese

Massenumverlagerungen von den GRACE-Beobachtungen abziehen und erhält somit Informationen über die mit anderen Messmethoden nur schwer zugänglichen globalen Grundwasserressourcen. Kolleginnen und Kollegen vom Projektpartner JPL haben dabei in den letzten zehn Jahren zahlreiche Aquifere identifiziert, die von Menschen rascher entleert werden, als sie sich erneuern können. 2015 publizierten sie eine Übersicht, die zeigte, dass weltweit ein Drittel der größten Grundwasserbecken dramatisch übernutzt werden (Richey et al., 2015).

Hochwasservorhersage

Systeme zur Vorhersage von Hochwasserereignissen und von Überflutungen brauchen möglichst aktuelle Informationen, um die Hochwasserentstehung und Entwicklung von Flutwellen abschätzen zu können. Für große Einzugsgebiete ergeben sich dann Vorwarnzeiten von einigen Tagen oder wenigen Wochen. Die EU fördert zwischen 2015 und 2017 das an der Universität Bern koordinierte Projekt EGSIEM (European Gravity Service for Improved Emergency Management), um genau solche Near-Realtime-Daten zum Schwerfeld und korrespondierende Hochwasserindikatoren zu berechnen. Für beide Themen hat das GFZ die Gesamtverantwortung (Gouweleeuw et al., 2017). Ein Testbetrieb hat im April 2017 gemeinsam mit dem Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformationen (ZKI) des DLR begonnen.

Eisschilde und Gletscher

Die Antarktis und Grönland gehören zu den unwirtschaftlichsten Orten der Welt. Gleichwohl ist es wichtig zu verstehen, wie schnell die Eisschilde dort abschmelzen, auch um die Schwankungen des Meeresspiegels weltweit besser zu verstehen. Forscherinnen und Forscher, die sich mit der Kryosphäre befassen, gehörten zu den Pionieren bei der Nutzung von GRACE-Daten. Es stellte sich schnell heraus, dass der Massenverlust sowohl auf Grönland als auch in der Antarktis weitaus dramatischer ist als vorher angenommen, denn seit dem Start von GRACE hat Grönland durchschnittlich etwa 230 Milliarden Tonnen (Gt) Eis pro Jahr verloren (Abb. 1), die Antarktis rund 120 Gt jährlich.

Forscher des GFZ (Sasgen et al., 2010) haben gezeigt, wie jahreszeitliche Schwankungen des Schneefalls und die damit verbundene Massenzunahme auf der Antarktischen Halbinsel mit der Stärke eines Tiefdrucksystems über der Amundsensee zusammenhängen. Dieses Tiefdruckgebiet wiederum ist mit dem tropischen La-Niña-Phänomen (dem Gegenstück zu El Niño) verknüpft. So haben gravimetrische Verfahren und GRACE-Daten erstmals ermöglicht, Effekte von atmosphärischen „Telekonnektionen“, die das Klima der Tropen sogar mit entlegenen Regionen wie der Antarktis verbinden, zu quantifizieren.

GRACE-Daten offenbaren auch den Massenverlust von Inlandsgletschern in vielen Bergregionen. Dieser geht oft einher mit einer Gefährdung der Wasserversorgung der vorgelagerten Gebiete. So hat ein internationales Team von Forschenden unter der Leitung des GFZ (Farinotti et al., 2015) anhand von GRACE-Daten abge-

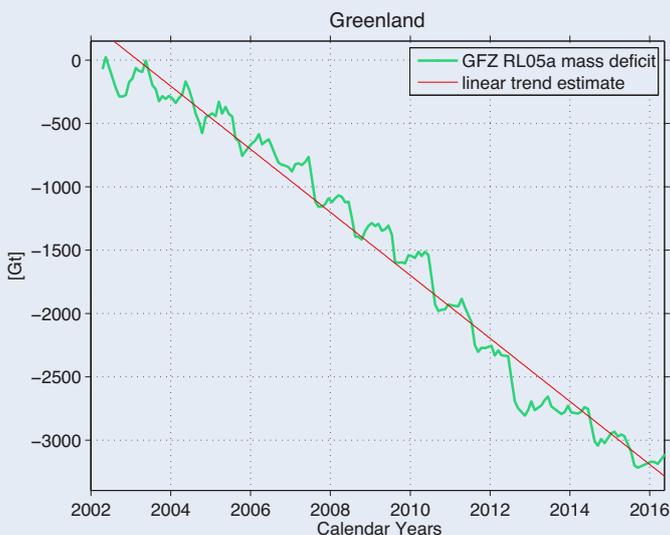


Abb. 1: Eismassenverluste in Grönland 2002 bis 2016 nach Abzug eines Modells zur Korrektur des postglazialen Ausgleichs. Der lineare Trend über die gesamte GRACE-Beobachtungsperiode beträgt etwa -232 Gt pro Jahr. Deutlich erkennbar ist, dass a) der Trend sich in den letzten Jahren deutlich vergrößert hat und b) es im Sommer 2012 zu extremer Eisschmelze gekommen ist.

Fig. 1: Ice mass loss in Greenland from 2002 to 2016 where a model-based correction for post-glacial rebound was applied. The linear trend over the entire GRACE observation period amounts to approximately -232 gigatonnes per year. The graph clearly shows that: a) the trend has significantly increased in recent years; and b) extreme ice melting occurred in the summer of 2012.

schätzt, dass das Tian-Shan-Gebirge in Zentralasien derzeit jährlich doppelt so viel Eis verliert wie ganz Deutschland an Wasser pro Jahr verbraucht.

Ozeandynamik

Die globale Erwärmung bewirkt, dass sich das Meerwasser ausdehnt. Hinzu kommen die erhöhten Zuflüsse aus den Gletscherregionen und Eisschilden der Erde. Beides trägt zum Anstieg der Meeresspiegel weltweit bei. Zwar gibt es seit 1992 hochpräzise Meeresspiegelmessungen z. B. über die US-französische Topex-Poseidon- und die nachfolgenden Jason-Missionen, aber diese zeigen nur die gesamten Höhenänderungen der Meeresoberfläche an.

Über die Massenverteilung des Wassers können die unterschiedlichen Einflüsse der (temperaturbedingten) Ausdehnung des Wassers, des schmelzenden Eises oder des Zuflusses von Land auf diese Höhenänderungen berechnet werden. Am GFZ wurde dies mit Hilfe von GRACE-Daten exemplarisch für den antarktischen Zirkumpolarstrom durchgeführt (*Bergmann-Wolf und Dobslaw, 2012*). Dabei gelang es, Schwankungen in Zeiträumen von weniger als einem Monat zu dokumentieren. Dies ermöglichte einen weit genaueren und doch großräumigen Blick auf die Dynamik der weltweit stärksten Meeresströmung, als bisherige Messungen vor Ort ergeben hatten.

Änderungen der festen Erde

Als Reaktion auf die Veränderung der Masse des oberflächennahen Wassers bewegt sich der zähflüssige Erdmantel unter der Erdkruste, wenn auch nur sehr wenig. Forscherinnen und Forscher des Projektpartners JPL haben Daten von GRACE genutzt, um zu ermitteln, wie nicht nur der Verlust der Eisschilde, sondern auch der Schwund des Grundwassers die Erdrotation verändert hat, weil sich das Gesamtsystem diesen Massenbewegungen anpasst (*Adhikari und Ivins, 2016*).

Atmosphärenbeobachtung

Das zweite wissenschaftliche Ziel der GRACE-Mission ist es, unter Nutzung der GPS-Radiookkultationstechnik (RO) täglich über 150 sehr präzise weltweit verteilte vertikale Temperatur- und Feuchtigkeitsprofile zu ermitteln. Diese Messungen sind von großem Interesse für Wetterdienste und Studien zum Klimawandel. Daher stellt das GFZ diese Profile spätestens zwei Stunden nach Messung durch einen der GRACE-Satelliten den führenden Wetterzentren der Welt, wie z. B. dem ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts), NCEP (National Centers for Environmental Predictions) oder dem DWD (Deutscher Wetterdienst) permanent bereit, um deren globale Vorhersagen zu verbessern (*Wickert et al., 2009 und 2017*).

Die Nachfolgemission GRACE-FO

Mit mehr als 15 Jahren hat GRACE dreimal so lange wie ursprünglich geplant Daten geliefert. Dies unterstreicht einerseits die hervorragende Arbeit von Airbus Defense & Space (D&S) GmbH,

die die beiden Satelliten im Auftrag von NASA/JPL in Deutschland gebaut haben. Andererseits hat das Betriebsteam, bestehend aus DLR/GSOC (German Space Operations Center), JPL, UTCSR (University of Texas, Center for Space Research), Airbus D&S und GFZ, das gemeinsam den täglichen Zustand der Satelliten und ihrer Instrumente überwacht, viel unternommen, um die Missionsdauer zu verlängern. Trotzdem ist die Lebenszeit der Mission definitiv beendet, da das Satellitenduo seine Treibstoffvorräte aufgebraucht hat. Einer der Satelliten wurde bereits am 24. Dezember 2017 kontrolliert zum Absturz gebracht, der andere folgt im März 2018.

Da, wie oben geschildert, die aus GRACE-Daten abgeleiteten Erkenntnisse Massentransporten einerseits von enormem Nutzen für die Untersuchung vieler klimarelevanter Phänomene sind, andererseits aber nur durch lange Zeitreihen (möglichst über mehrerer Dekaden) die notwendige Zuverlässigkeit in den Schlussfolgerungen erreicht werden kann, haben NASA und GFZ bereits 2011 beschlossen, eine Nachfolgemission GRACE Follow-On (GRACE-FO) zu realisieren. Wie bei GRACE wurden die Satelliten wieder im Auftrag von NASA/JPL durch Airbus D&S gebaut. Die notwendigen Umwelttests (Thermal-Vakuum, Akustik, Vibration, elektromagnetische Kompatibilität) wurden bei der IABG (Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft) in Ottobrunn erfolgreich abgeschlossen (Abb. 2). Das JPL hat wiederum die Instrumente beigelegt. Ausnahmen sind ein Laser-Retroreflektor, der wie bei GRACE durch das GFZ beigelegt wird und zur von GPS unabhängigen Satellitenbahnbestimmung dient. Daneben wird GRACE-FO ein neuartiges Laser-Ranging-Interferometer (LRI) als Demonstrationsnutzlast für zukünftige Schwerfeldmissionen fliegen. Das LRI (Abb. 3) ist eine deutsch-amerikanische Entwicklung, mit der die Distanzänderung zwischen den beiden Satelliten gegenüber der Mikrowellenbeobachtung etwa dreißig- bis vierzigmal genauer beobachtet werden kann (*Sheard et al., 2012*). Damit wird die

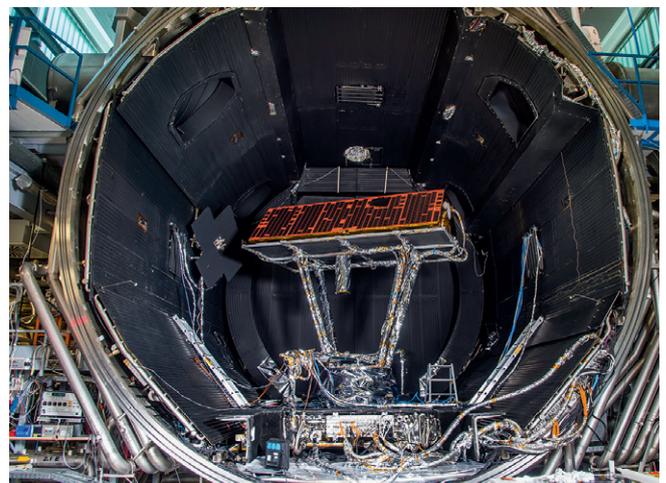


Abb. 2: GRACE-FO-Satellit 1 während des Thermal-Vakuumtests bei der IABG (Airbus Defence and Space GmbH)

Fig. 2: GRACE-FO satellite 1 during thermal-vacuum tests at IABG

Messgenauigkeit im Bereich von 80 nm oder in etwa dem doppelten Durchmesser eines Hepatitis-B-Virus liegen – und dies über einen Abstand, der dem zwischen Potsdam und Hannover entspricht.

Der Missionsbetrieb von GRACE-FO wird durch Eigenanteile des GFZ finanziert und wie bei GRACE durch DLR/GSOC realisiert. Neu ist, dass die Satellitenempfangsstation des GFZ in Ny-Ålesund auf Spitzbergen (Abb. 4) als primäre Empfangsstation dienen wird. Dies hat den Vorteil, dass bei jedem Umlauf der Satelliten Kontakt zum Boden besteht und der Zustand der Satelliten damit wesentlich häufiger als bei GRACE kontrolliert werden kann. Die im Routinebetrieb von DLR/GSOC eingesetzten Stationen Weilheim und Neustrelitz haben dagegen nur etwa alle elf Stunden Kontakt zu GRACE-FO, was bei eventuellen technischen Problemen auf den Satelliten von Nachteil sein kann.

Das GFZ ist zudem für die Bereitstellung der Startrakete verantwortlich. Ursprünglich war dazu eine Dnepr-Rakete mit Startplatz Baikonur (Kasachstan) und Startdatum August 2017 vorgesehen. Durch die Russland-Ukraine-Krise konnte dieses Projekt aber nicht zu Ende geführt werden. Daher wurde Ende 2016 auf eine US-amerikanische Falcon-9 von SpaceX mit Startplatz Vandenberg Air Force Base in Kalifornien gewechselt. Das dazugehörige Management der Startdienstleistungen und der Bau eines „Multi Satellite Dispensers“ werden im Auftrag des GFZ von Airbus D&S durchgeführt.

Es ist geplant, dass GRACE-FO im Frühjahr 2018 gestartet wird. Es ist von zentraler Bedeutung, die forschungsrelevanten GRACE-Zeitreihen schnellstmöglich zu verlängern und daraus weitere Erkenntnisse abzuleiten.

Die Zukunft

Ein wesentlicher Nachteil des GRACE-Konzepts ist, dass lediglich ein Satellitenpaar auf einem Orbit mit einer sehr hohen Bahnneigung von 89° geflogen wird. Dadurch wird von GRACE und später von GRACE-FO die Variation des Schwerefeldsignals im Wesentlichen nur in Flugrichtung auf Bahnen vom Nordpol zum Südpol beobachtet. Durch diese ungleichförmige Abtastung des Erdschwerefelds (Anisotropie) kommt es zu „Streifen“ in den abgeleiteten Karten. Diese Störungen lassen sich zwar durch eine Nachbehandlung korrigieren, wobei aber gleichzeitig zusätzliche Fehler produziert werden. Das GRACE-Konzept macht es daher trotz LRI auf GRACE-FO unmöglich, die räumliche und zeitliche Auflösung wesentlich zu verbessern (Flechtner et al., 2016).

Dies wird erst durch sogenannte Next Generation Gravity Missions (NGGM) möglich sein. Um die Anisotropie zu überwinden, wird vorgeschlagen, neben dem die Polarregionen überfliegenden Satellitenpaar ein weiteres Paar in nur etwa 70° Inklination einzuschleusen. Beide Satellitenpaare könnten mit einem auf GRACE-FO erprobten LRI ausgerüstet sein. Diese sogenannte „Bender-Konstellation“ wurde bereits in Simulationen untersucht (Elsaka et al., 2014). Es zeigte sich, dass die Kombination der Messdaten

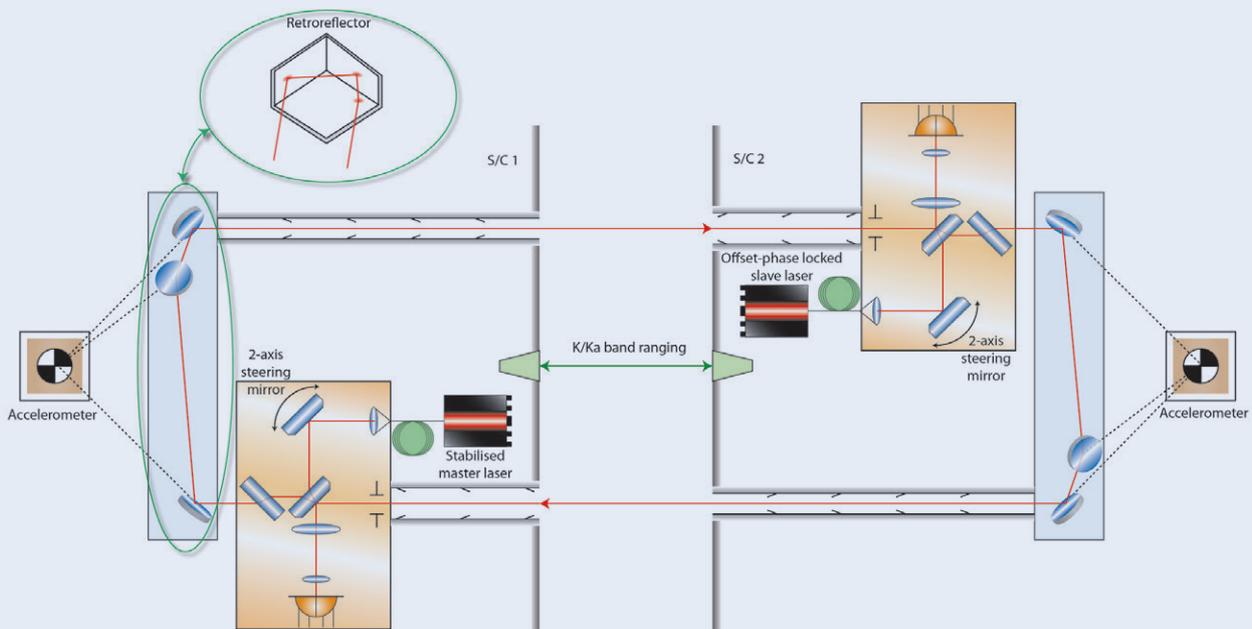


Abb. 3: Schematischer Aufbau des GRACE-FO Laser-Ranging-Interferometers (Grafik: Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut Hannover))

Fig. 3: Schematic design of the GRACE-FO laser ranging interferometer



Abb. 4 Die Satellitenempfangsstation Ny-Ålesund mit ihren beiden Antennen (Foto: C. Falck, GFZ)

Fig. 4: The satellite receiving station Ny-Ålesund with its two antennas

dieser beiden Satellitenpaare bei Verwendung eines wesentlich tieferen Orbits von etwa 320 km die Genauigkeit der Schwerefeldmodelle um einen Faktor 10 verbessern und gleichzeitig die räumlichen Auflösung von 400 km auf 150 km steigern könnte. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die verbesserte Beobachtung der nicht gravitativen Störbeschleunigungen, die auf den Satelliten einwirken. Diese sind nicht vom Schwerefeld, sondern hauptsächlich durch den (auch in 300 bis 500 km Flughöhe noch vorhandenen) Luftwiderstand und den Strahlungsdruck der Sonne bedingt. Bei GRACE und GRACE-FO werden diese mit einem hochpräzisen Beschleunigungsmesser direkt erfasst. Daneben leistet das GFZ einen Beitrag zur Verbesserung der Modelle zur Korrektur von hochfrequenten Massenvariationen in der Atmosphäre und im Ozean (Dobslaw *et al.*, 2017).

Die nominelle Lebensdauer von GRACE-FO wird wie bei GRACE wieder fünf Jahre betragen. Die sehr guten Erfolge bei GRACE lassen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler natürlich bereits jetzt auch von einigen zusätzlichen Lebensjahren träumen. Die Zeitreihen von Veränderungen des globalen Wasserkreislaufs wären dann mindestens 20 Jahre, im günstigsten Fall 30 Jahre lang. Damit könnten die eingangs diskutierten Fragen im Zusammenhang mit der wichtigen gesellschaftlichen Herausforderung der Erhaltung unserer Lebensräume wesentlich besser und zuverlässiger als heute beantwortet werden.

Literatur

- Adhikari, S., Ivins, E. R. (2016): Climate-driven polar motion: 2003-2015. - *Science Advances*, 2, 4, e1501693. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501693>
- Bergmann-Wolf [Bergmann], I., Dobslaw, H. (2012): Short-term transport variability of the Antarctic circumpolar current from satellite gravity observations. - *Journal of Geophysical Research*, 117, C05044. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JC007872>
- Farinotti, D., Longuevergne, L., Moholdt, G., Duethmann, D., Mölg, T., Bolch, T., Vorogushyn, S., Güntner, A. (2015): Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years. - *Nature Geoscience*, 8, pp. 716–722. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2513>
- Dobslaw, H., Bergmann-Wolf, I., Dill, R., Poropat, L., Thomas, M., Dahle, C., Esselborn, S., König, R., Flechtner, F. (2017): A new high-resolution model of non-tidal atmosphere and ocean mass variability for de-aliasing of satellite gravity observations: AOD1B RLo6. - *Geophysical Journal International*, 211, 1, pp. 263–269. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggx302>
- Elsaka, B., Raimondo, J.-C., Brieden, P., Reubelt, T., Kusche, J., Flechtner, F., Iran Pour, S., Sneeuw, N., Müller, J. (2014): Comparing seven candidate mission configurations for temporal gravity field retrieval through full-scale numerical simulation. - *Journal of Geodesy*, 88, pp. 31–43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0665-9>
- Flechtner, F., Neumayer, K.-H., Dahle, C., Dobslaw, H., Fagiolini, E., Raimondo, J.-C., Güntner, A. (2016): What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications? - *Surveys in Geophysics*, 37, 2, pp. 453–470. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9338-y>
- Gouweleew, B., Kvas, A., Gruber, C., Gain, A. K., Mayer-Gürr, T., Flechtner, F., Güntner, A. (2017 online): Daily GRACE gravity field solutions track major flood events in the Ganges-Brahmaputra Delta. - *Hydrology and Earth System Sciences Discussion: HESSD*, pp. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-2016-653>
- Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M.-H., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Voss, K., Swenson, S., Rodell, M. (2015): Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. - *Water Resources Research*, 51, 7, pp. 5217–5238. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015WR017349>
- Sasgen, I., Dobslaw, H., Martinec, Z., Thomas, M. (2010): Satellite gravimetry observation of Antarctic snow accumulation related to ENSO. - *Earth and Planetary Science Letters*, 299, 3-4, pp. 352–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.09.015>
- Sheard, B. S., Heinkel, 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*, 86, pp. 1083–1095. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0566-3>
- Wickert, J., Dick, G., Ge, M., Schmidt, T., Semmling, M., Alshawaf, F., Arras, C., Asgarimehr, M., Babeyko, A., Deng, Z., Heise, S., Klotz, J., Li, X., Lu, C., Männel, B., Ramatschi, M., Simeonov, T., Vey, S., Zus, F., Schuh, H. (2017): Erdbeobachtung mit Navigationssatelliten. – *System Erde*, 7, 2, pp. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.07.02.4>
- Wickert, J., Michalak, G., Schmidt, T., Beyerle, G., Cheng, C. Z., Healy, S. B., Heise, S., Huang, C. Y., Jakowski, N., Köhler, W., Mayer, C., Offiler, D., Ozawa, E., Pavelyev, A. G., Rothacher, M., Tapley, B., Arras, C. (2009): GPS radio occultation: results from CHAMP, GRACE and FORMOSAT-3/COSMIC. - *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 20, 1, pp. 35–50. DOI: [https://doi.org/10.3319/TAO.2007.12.26.01\(F3C\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2007.12.26.01(F3C))