

Zweijahresbericht

GeoForschungsZentrum Potsdam
in der Helmholtz-Gemeinschaft

2002/2003

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Das System Erde – Forschungsgegenstand des GFZ Potsdam	V
Aus der wissenschaftlichen Arbeit	
DESERT - Struktur und Dynamik der Dead Sea Transform	1
Ein Ozean taucht ab: Ergebnisse zur Dynamik des aktiven Kontinentalrandes in Südchile	19
Lithium-, Bor-, Strontium-, Neodym- und Blei-Isotope als Monitore fluid-induzierter Mineralreaktionen in kontaktmetamorphen Marmoren	35
Dimensionen und Dynamik des Kohlenstoffkreislaufs in Sedimentbecken	45
MALLIK - Gashydrate unter Permafrost	59
Trizonia Island – simultanes Deformations- und Temperaturmonitoring mit faseroptischen Sensoren in einer Rift-Bohrung	77
Kleine Proben – große Aussagen: Experimente als „Fenster in das Innere der Erde“	85
Focused Ion Beam-Technik FIB: eine Nanotechnologie ermöglicht neue Erkenntnisse in den Geowissenschaften	99
GRACE - Eine Schwerefeld- und Klimamission	109
Signaturen des Erdmantels im Schwerefeld der Erde	119
Die Departments	
Department 1 „ <i>Geodäsie und Fernerkundung</i> “	126
Department 2 „ <i>Physik der Erde</i> “	166
Department 3 „ <i>Geodynamik</i> “	238
Department 4 „ <i>Chemie der Erde</i> “	280
Department 5 „ <i>Geoengineering</i> “	332
Gremien des GFZ Potsdam	361
Organisation, Verwaltung und zentrale Dienste	362
Personal- und Sozialwesen	
Haushalt und Finanzen	
Bibliothek des Wissenschaftsparks Albert Einstein	
ICDP Operational Support Group	
Daten- und Rechenzentrum	
Das Jahr der Geowissenschaften 2002	
Auszeichnungen und Ehrungen	394
Habilitationen, Promotionen	394
Ausgewählte Publikationen 2002/2003	396
Glossar	406

GRACE - Eine Schwerefeld- und Klimamission

Christoph Reigber, Frank Flechtner, Rolf König, Ulrich Meyer, Karl-Heinz Neumayer, Roland Schmidt, Peter Schwintzer, Sheng Yuan Zhu

GRACE is the acronym for “Gravity Recovery and Climate Experiment” and the trade-mark of an outstanding US – German space mission aiming at the continuous monitoring of the Earth’s gravitational field during its lifetime of at least 5 years. Orbiting the Earth on a near polar, low altitude path, a satellite pair is providing extremely precise measurements of the relative distance between the two spacecrafts. These observations, collected over a certain time period, allow to map the global gravity field of the Earth and its temporal variability with an unprecedented high accuracy and spatial resolution. Gravity field variations, that GRACE tracks and which are related with variations of mass, include: changes due to surface and deep currents in the oceans; runoff and changes in continental water storage; variations in the mass of large ice sheets; large scale deformations and motion of mass on the Earth surface and in the interior. In the sequel the GRACE mission characteristic features, its outstanding instrumentation and its first revolutionary gravity modelling results will be presented.

GRACE ist die Abkürzung für „Gravity Recovery and Climate Experiment“ und das Markenzeichen einer herausragenden amerikanisch – deutschen Satellitenmission zur laufenden Beobachtung des Schwerefeldes der Erde über einen Zeitraum von mindestens 5 Jahren. Auf polaren Bahnen in niedriger Höhe die Erde umkreisend, liefern zwei Satelliten fortlaufend hochgenaue Messungen des gegenseitigen Abstands. Aus diesen Messungen lässt sich ein globales Bild des Schwerefeldes der Erde und seiner zeitlichen Änderungen mit bisher nicht gekannter Genauigkeit und Auflösung entwickeln. Schwerefeldänderungen, die mit der GRACE-Zwillingsmission erfasst werden, hängen zusammen mit Massenänderungen zufolge: Veränderungen in Oberflächen- und Tiefenströmungen der Ozeane; in Abfluss und kontinentaler Wasserspeicherung; im Eismassenhaushalt und mit großräumigen Deformationen und Massenbewegungen an der Erdoberfläche und im Erdinnern. Die nachfolgende Beschreibung soll einen Einblick in diese Mission, ihre einzigartige Instrumentierung und die einer Revolution in der Erdschwerefeldmodellierung gleichenden ersten Ergebnisse liefern.

Start

Einen Tag später als geplant starteten die beiden Zwillingsatelliten „Tom und Jerry“ am 17. März 2002 um 10:21 Uhr MEZ vom nordrussischen Weltraumbahnhof Plesetsk auf ihre fünfjährige Mission zur hochgenauen Vermessung des Erdschwerefeldes. Am Vortag hatten noch starke Höhenwinde den Start mit einer Rakete vom Typ „ROCKOT“ (russisch: Getöse), einer zivilen, kommerziellen Variante der früheren sowjetischen Interkontinentalrakete SS19, verhindert. Damit hatten die fünfwöchigen Startvorbereitungen der russischen Raumtruppen und der deutsch/amerikanischen GRACE-Startmannschaft einen vorläufigen

erfolgreichen Abschluß gefunden. Gespannt warteten nun an den Konsolen im Raumfahrt-Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen die DLR-Betriebsingenieure, die Verantwortlichen des Satellitenherstellers Astrium



Abb. 1: Start der GRACE-Satelliten am 17. März 2002 vom Kosmodrom Plesetsk mit einer ROCKOT-Starttrakete (Foto: EUROCKOT)

Launch of the GRACE satellites on March 17, 2002 from the cosmodrome Plesetsk on a ROCKOT rocket

GmbH, Friedrichshafen, sowie die GRACE-Projektleitung und Instrumentenverantwortlichen auf den ersten Kontakt mit den beiden Satelliten. Die Geschehnisse in Plesetsk und in Oberpfaffenhofen wurden in das GFZ nach Potsdam übertragen, wo sich zahlreichen Mitarbeiter eingefunden hatten, um bei diesem einmaligen Ereignis dabeizusein.

Frühphase der Mission

Knapp 90 Minuten nach dem „Bilderbuchstart“ wurden die beiden GRACE-Satelliten gleichzeitig über Nordafrika von der Oberstufe der Rakete abgetrennt. Dieser Vorgang wurde eindrucksvoll durch die Radarsysteme der Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften (FGAN), bei Bonn, beobachtet. Kurze Zeit später wurden um 11:48 Uhr MEZ die ersten „Lebenszeichen“ an der Bodenstation in Weilheim, südlich von München, empfangen. Damit stand fest, dass neben dem Funktionieren der Sendestrecke auch die vorgesehene Einschussbahn nicht weit verfehlt sein konnte. In den darauffolgenden 94 Minuten dauernden Umläufen wurden die Lagekontrollsysteme mit verbesserten Initialparametern gespeist, so dass beide Satelliten sehr schnell in einen ruhigen, treibstoffsparenden Flug übergehen konnten.

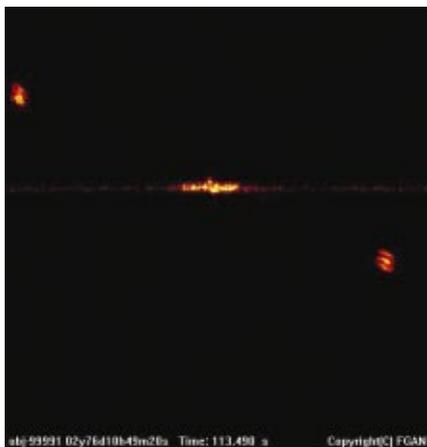


Abb. 2: Trennung der beiden GRACE-Satelliten am 17. März 2002 um 10:49:20 von der ROCKOT-Oberstufe (Foto: FGAN)

Separation of the GRACE satellites on March 17, 2002 at 10:49:20 from upper stage of the ROCKOT launcher

Die GRACE-Satelliten und ihre wissenschaftlichen Instrumente

In der Folgezeit wurden alle Subsysteme der Satelliten und die wissenschaftlichen Meßgeräte zur Schwerfeldbestimmung sukzessive eingeschaltet und einem ersten Test unterzogen.

Die beiden GRACE-Satelliten fliegen in einer CHAMP-ähnlichen, sehr polnahen Umlaufbahn (89 Grad Inklination) in etwa 500 km Höhe und in einem Abstand

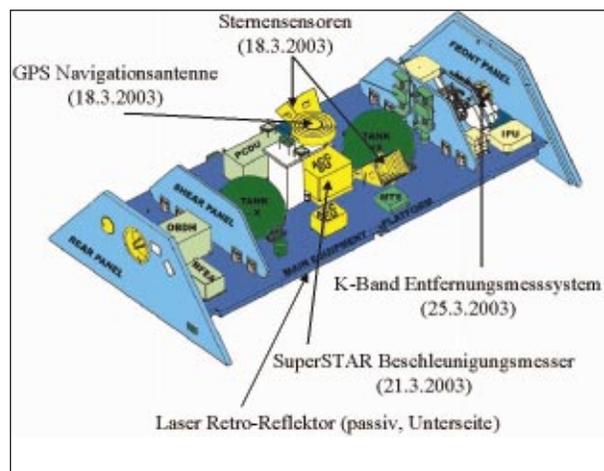


Abb. 3: Wissenschaftliche Instrumente der GRACE-Satelliten und ihre Einschaltzeitpunkte

GRACE scientific instruments and switch-on times

von etwa 220 km. Sie sind so ausgelegt, daß das Schwerfeld der Erde in nie dagewesener Auflösung gemessen werden kann. Dies wird dadurch erreicht, daß die Position der beiden Satelliten durch GPS-Beobachtungen und die Veränderung des Abstandes zwischen den beiden Satelliten mit einem K-Band-Entfernungsmessgerät mit extrem hoher Genauigkeit bestimmt werden. Da der Missionszeitraum zudem auf mindestens 5 Jahre ausgelegt ist, können aus den wiederholten Beobachtungen Rückschlüsse auf die Änderung der Feldkomponenten gemacht werden. Ein weiteres Missionsziel ist die Bestimmung von Zustandsgrößen in den Troposphären-, Stratosphären- und Ionosphärenschichten des erdnahen Raums, wie z.B. Temperatur, Wasserdampf und Elektronendichteverteilung mit Hilfe des bereits bei CHAMP sehr erfolgreich eingesetzten Okkultationsmessprinzips.

Die Firma Astrium GmbH, Friedrichshafen, hat zwei völlig baugleiche Satelliten hergestellt, die die extremen Genauigkeitsanforderungen und Design-Kriterien auch nach den ersten Tests in der Umlaufbahn voll erfüllen. Zu nennen sind hierbei die geforderte extrem hohe Temperaturstabilität der Struktur und der Instrumente über einen Erdumlauf mit besser als 0,1°C, obwohl die Satelliten extremen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind, je nachdem ob sie von der Sonne beschienen werden oder sich im Erdschatten befinden. Als Folge ist die Verwindung der thermostabilen CFRP-Struktur (Carbon-Fibre Reinforced Plastic) kleiner als 3 µm pro Umlauf. Weiterhin ist die geforderte Lage des Schwerpunktes extrem genau eingehalten worden. Änderungen, z.B. durch unsymmetrischen Treibstoffverbrauch in den beiden Tanks, werden während der Mission durch Einsatz eines Massen-Trimmechanismus ausgeglichen, so dass das Massenzentrum sich niemals um mehr als 0,1 mm von seinem Sollwert entfernt. Ein Dreiachsen-Lagekontrollsystem, das ein Moment um jede Achse mit einem Minimum an resultierender Kraft erzeugen kann, garantiert die Einhaltung der Satellitenlage im Raum auf besser als 0,03°. Zur Lage-

und Bahnregelung werden neben einem Kaltgassystem mit 12 Lageregelungsdüsen auch drei Magnet-Torquer verwendet. Als Sensoren dienen ein grober Erd-Sonnensensor, zwei Sternsensoren, ein Magnetometer, ein inertiales Messsystem und der GPS-Bordempfänger.

Jeder GRACE-Satellit wog beim Start etwa 480 kg, wovon 32 kg auf den Treibstoff entfielen. Der trapezförmige Satellitenkörper hat die Dimensionen 312x194x78 cm (L/B/H). An den je um 40° gegenüber der Grundebene geneigten Seitenteilen und der zur Grundebene parallelen Oberseite ist je ein Solargenerator mit 3,2 bzw. 2,2 m² Fläche angebracht. Diese erzeugen im Zusammenspiel mit einer NiH₂-Batterie in allen Orbitphasen insgesamt 158 Watt für den Betrieb des Satellitenbus, der Heizer und der verschiedenen Instrumente. Geometrie und Masse des Satelliten gewährleisten ein optimales aerodynamisches Verhalten und eine relativ geringe Abbremswirkung durch die Hochatmosphäre. Nach momentanen Vorhersagen für die weitere Solaraktivität werden die GRACE-Satelliten in etwa 10 bis 15 Jahren in die Erdatmosphäre eintauchen. Diese Vorhersage ist aber zu relativieren, da für weitere geplante und ungeplante Bahn- und Lagekorrekturmanöver Treibstoffverbrauch bzw. Steurdüsenaktivitäten veranschlagt werden müssen. Wird dies mitberücksichtigt, beträgt die Missionsdauer nach jetzigem Stand immer noch mindestens 5 Jahre für beide Satelliten.

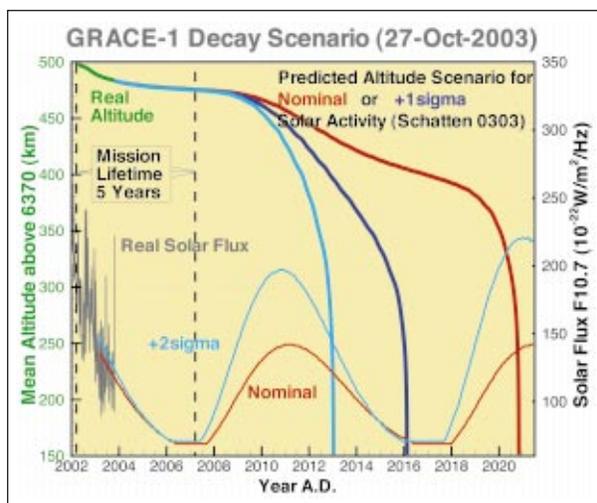


Abb. 4: Aktueller (grün) und vorherberechneter (rot, blau) Verlauf der GRACE-Bahnhöhe

Experienced (green) and predicted (red, blue) orbit decay of GRACE

Ein weitgehend autonom arbeitendes Kontroll- und Datenhaltungssystem an Bord der Satelliten übernimmt, speichert und prozessiert Kommandos, die zur Steuerung der Satelliten, zur Zeitmarkierung, zur Speicherung der Instrumentendaten und zur Übertragung von Satellitenzustands- und Instrumentendaten an die Bodenempfangsstationen notwendig sind. Ein Massenspeicher von 1,0 Gigabit ermöglicht derzeit die Speicherung der Daten über einen Zeitraum von etwa 36 Stunden ohne Übertragungskontakt.

Auf dem ersten GRACE-Satelliten sind gleich nach dem Start einer der beiden ultrastabilen Oszillatoren (USO) und das inertielle Messsystem (IMU) ausgefallen, zwei Monate später die Instrumentenkontrollleinheit (ICU) des Beschleunigungsmessers. Da die IMU nur zur Bahnregelung benötigt wird und durch andere Sensoren des Lagekontrollsystems ersetzt werden kann und der Ausfall des USO bzw. der ICU durch Umschaltung auf ihre Ersatzkomponenten ausgeglichen werden konnte, ist die wissenschaftliche Zielsetzung der Mission nicht gefährdet. Alle anderen Satellitensubsysteme wie Stromversorgung, Telemetriesystem, Thermalkontrollsystem, Bordrechner sowie das Bahn- und Lagekontrollsystem befinden sich auch 20 Monate nach Inbetriebnahme in einem sehr guten Zustand. Die noch andauernde Validations- und Kalibrationsphase hat gezeigt, daß auch die wissenschaftlichen Geräte an Bord der GRACE-Satelliten erfreulich zuverlässig und weitestgehend im Rahmen ihrer vorgegebenen Spezifikationen arbeiten. Im folgenden sollen diese kurz vorgestellt werden.

Wissenschaftliche Instrumente an Bord von GRACE

Das zentrale Beobachtungsgerät zur Positionierung der Satelliten und zur Durchführung von Radiookkultationsmessungen ist der von NASA/JPL entwickelte und bereits bei CHAMP erfolgreich eingesetzte *GPS-Blackjack-Empfänger* (Dunn et al., 2003). Dieses Gerät besteht aus einer 16-Kanal-Empfängereinheit und drei Antennen, von denen eine in Richtung Zenit und zwei in Flug- (GRACE-A) bzw. Gegen-Flugrichtung (GRACE-B) GPS-Messsignale empfangen. Der Empfänger liefert fast ununterbrochen alle 10 Sekunden eine Navigationslösung mit einem mittleren Fehler von etwa ±5 m. Die off-line aus den GPS-GRACE-Pseudorange- und Trägerphasenmessungen ableitbaren, dynamisch bestimmten präzisen GRACE-1,5-Tagesbahnen haben eine 3D-Positionsgenauigkeit von besser als ±5 cm. Diesen Genauigkeitsbereich erhält man aus dem Vergleich mit unabhängigen Laser-Entfernungsmessungen zu den GRACE-Laser-Retroreflektoren. Mit den an der Rückseite angebrachten Antennen sollen ab Frühjahr 2004 zusätzlich Radiookkultationsmessungen mit einer Abtastrate von 50 Messungen pro Sekunde durchgeführt werden.

Das Instrument, das die extreme Genauigkeit der GRACE-Mission erst ermöglicht, ist das von NASA/JPL gebaute *Zweifrequenz-K-Band-Entfernungsmesssystem* (HAIRS). HAIRS ist mit dem GPS-Empfänger verbunden, damit GPS- und K-Band-Beobachtungen dieselben Zeitstempel erhalten. Mit diesem Gerät kann man den Abstand und die Abstandsänderungen der beiden Satelliten im Sekundenabstand mit besser als 10 µm bzw. 1 µm/s beobachten. Die Abstandsänderung ist ein Maß für die auf die beiden Satelliten unterschiedlich wirkende Gravitationsbeschleunigung, verursacht durch Massen anomalies unterhalb der Flugbahn der beiden Satelliten. In Abb.5 sind die mit dem K-Band-System beobachteten Abstandsänderungen zwischen den beiden GRACE-Satelliten über mehrere, jeweils 94

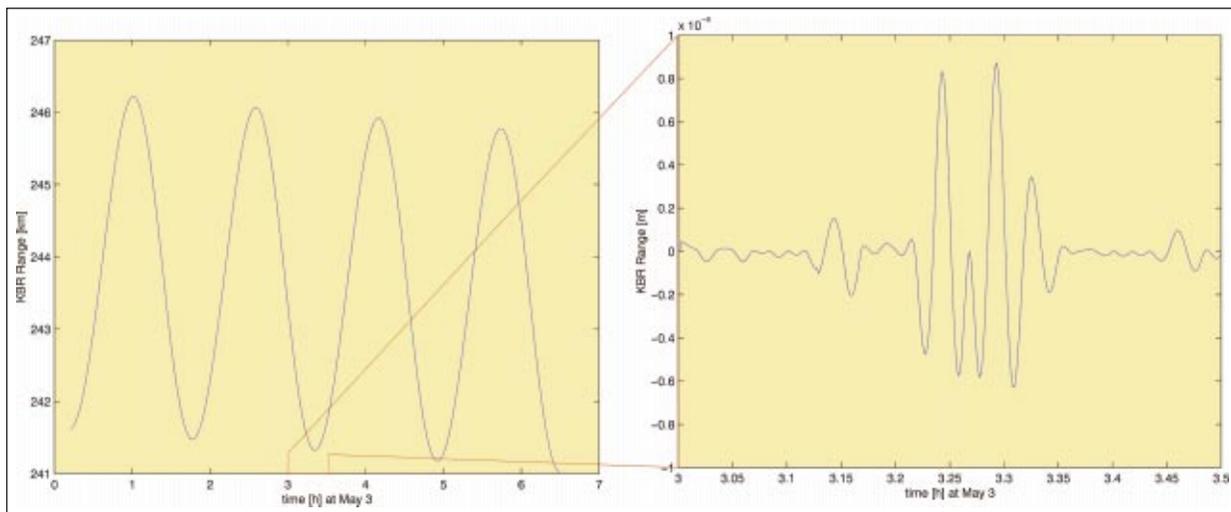


Abb. 5: Entfernungsvariation der beiden GRACE-Satelliten über einen Orbit (± 2 km über 94 Minuten, links), die mit dem K-Band-Messsystem auf 1 ppb beobachtet werden (30-minütiger Überflug über dem Himalaja, rechts)

Range variation between the two GRACE satellites per orbit (± 2 km per 94 minutes, left) which are observed by the K-band system with 1 ppb precision (30 minutes pass crossing the Himalayas, right)

Minuten dauernde Erdumläufe am 3. Mai 2002 dargestellt. Diese Änderungen von etwa ± 2 km sind primär durch die Erdabplattung hervorgerufen und werden mit besser als 1 ppb aufgelöst. Eindrucksvoll zeigt sich dies nach einer Tiefpassfilterung in dem Ausschnitt des Überfluges über den Himalaya, bei dem die Gebirgsmassen Entfernungsänderungen im Bereich von $\pm 60 \mu\text{m}$ hervorrufen.

Das *SuperSTAR-Akzelerometer*, eine Weiterentwicklung des bei CHAMP bereits erfolgreich eingesetzten elektrostatischen, dreiachsigen STAR-Akzelerometers der französischen Firma ONERA, misst kontinuierlich (10-Hz-Rate) auf den Satelliten wirkende, nicht-gravitative Störbeschleunigungen bis zu 10^{-4} m/s^2 mit einer Auflösung von 10^{-10} m/s^2 (Touboul et al., 1999). Damit ist es um eine Größenordnung genauer als das STAR-Gerät. Es arbeitet in allen 3 Achsen im Rahmen der Spezifikationen und liefert damit wichtige Messdaten zur Separation der nicht-gravitativen Störbeschleunigungen von der Gesamtbeschleunigung.

Beide Satelliten sind außerdem jeweils mit zwei von der Universität Kopenhagen gebauten *Sternsensoren* ausgerüstet. Diese dienen dazu, die Lage der Satelliten in einem Quasi-Inertialsystem zu bestimmen und über das bordseitige Lageregelungssystem die Satelliten in einer definierten Ausrichtung zueinander und zur Erde zu halten. Diese Information wird einerseits dazu benötigt, um die K-Band-Beobachtungen optimal, d.h. ohne Leistungsverlust, zu ermöglichen, andererseits müssen die Beobachtungen der Beschleunigungsmesser aus dem Instrumenten- in das Bahnkoordinatensystem transformiert werden. Die bordseitige Genauigkeit der Sternsensoren beträgt etwa 7,5 Bogensekunden. Diese lässt sich beim Nachprozessieren der Daten am Boden auf 3 Bogensekunden steigern.

Zusätzlich befindet sich auf beiden Satelliten jeweils eine vom GFZ Potsdam entwickelte und gebaute, sehr

kompakte und aus vier Prismen bestehende *Laser-Retro-Reflektor-Einheit* (LRR). Diese arbeitet wie die baugleiche CHAMP-LRR-Einheit sowohl unter Nacht- als auch unter Tageslichtbedingungen. Das Bodenstationsnetz des Internationalen Laserdienstes (ILRS) liefert zu beiden Satelliten etwa 3 bis 4 Beobachtungspassagen täglich. Da die Einzelschussgenauigkeit einiger Laserstationen nur wenige mm beträgt, stellen die SLR-Beobachtungen sehr gute unabhängige Messgrößen dar, die regelmäßig zu Validations- und Kalibrationszwecken im Rahmen der GRACE-Bahnbestimmung herangezogen werden.

Das Bodensegment der GRACE-Mission

Für den Erfolg der GRACE-Mission ist neben den gut funktionierenden Satelliten mit zuverlässig und genau arbeitenden Messgeräten auch ein integriertes, störungsfrei und mit geringen Verzögerungen arbeitendes Bodensegment von großer Bedeutung. Das GRACE-Bodensegment ist sehr ähnlich zum CHAMP-Bodensegment aufgebaut und besteht aus folgenden Komponenten:

- dem vom Deutschen Raumfahrt-Kontrollzentrum des DLR in Oberpfaffenhofen betriebenen *Mission Operation System (MOS)*, das für die laufende Überwachung der Satellitenfunktionen, den Betrieb der Sende- und Empfangsanlagen in Weilheim und Neustrelitz, für die Übermittlung von Kommandos, Kontroll- und Instrumentendaten und den Betrieb des Rohdatenzentrums zuständig ist,
- einem von GFZ, JPL und dem Internationalen GPS-Service (IGS) bereitgestellten *globalen Netz von GPS-Stationen* mit schneller Verfügbarkeit hochratiger Daten für die schnelle Bahnbestimmung der GPS-Sendersatelliten und für die Auswertung der für Frühjahr 2004 geplanten Radiookkultationen,

- einem vom Internationalen Laser Ranging Service (ILRS) koordinierten *Netz von Laserstationen* zur Gewinnung von Präzisionsentfernungsmessungen zu den GRACE-Laserreflektoren für die GRACE-Bahnbestimmung bzw. zur unabhängigen Bahnkontrolle, einem in einem Gemeinschaftsprojekt zwischen dem Jet Propulsion Laboratory (JPL), dem Zentrum für Weltraumforschung der Universität Texas (UTCSR) und dem GFZ Potsdam entwickelten und betriebenen *Wissenschaftsdatensystem*. Dieses besteht aus dem Science Data System (SDS), in dem die
- vom Satelliten empfangenen Level-0-Rohdaten zu vorverarbeiteten Level-1 Instrumentendaten verarbeitet werden (JPL-Verantwortung, Backup durch GFZ Potsdam),
- Level-1-Korrekturprodukte aus vom ECMWF gelieferten meteorologischen Feldern und einem vom JPL bereitgestellten Ozeanmodell gerechnet werden, mit denen man bei der Schwerefeldbestimmung Kurzzeitmassenvariationen in der Atmosphäre und den Ozeanen berücksichtigen kann (GFZ-Verantwortung) und
- die Level-1-Instrumentendaten zu monatlichen und mittleren Schwerefeldprodukten (Level-2) weiterverarbeitet werden (UTCSR und GFZ-Verantwortung).

Weiterhin stehen bei GRACE zwei Archive zur Verfügung, in denen die Mess- und Metadaten langzeitgespeichert, gezielte Informations- und Produktrecherchen ermöglicht und die Online-Verfügbarkeit von Daten und Produkten für interne und externe Nutzer per www-Internetbrowser oder über direkten ftp-Zugriff gewährleistet wird. Diese Archive befinden sich beim GFZ Potsdam (GRACE Information System and Data Center, ISDC) und bei JPL (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, PO.DAAC). Beide Archive werden in regelmäßigen Abständen abgeglichen, so dass auf beiden Seiten gleiche Produkte mit gleichen Zugriffsrechten für die Nutzer zur Verfügung stehen.

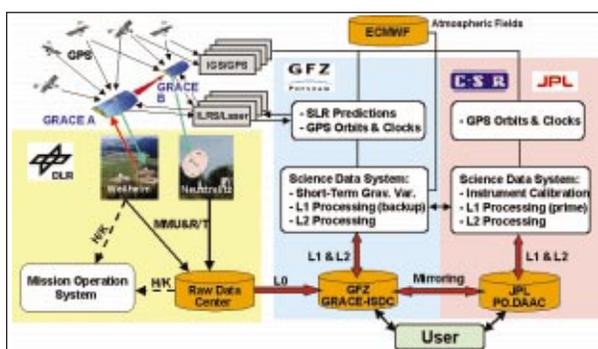


Abb. 6: Schematische Darstellung des GRACE-Bodensegments mit Daten/Informationsfluss

Schematic illustration of the GRACE ground segment including the data/information flow

Die Mission befindet sich derzeit in ihrer Validationsphase, die noch bis voraussichtlich Mai 2004 andauern wird. Alle Elemente des Bodensegments sind operationell im Einsatz und haben sich sehr gut bewährt. Erste Produkte in Form von Level-2-Schwerefeldern wurden am 5. Dezember 2003 an das europäisch/amerikanische GRACE-Wissenschaftlerteam über das ISDC und PO.DAAC verteilt. Die Weitergabe der dazugehörigen Level-1-Instrumentendaten ist für Mitte Januar 2004 geplant. Nach Beginn der operationellen Phase werden dann alle GRACE-Produkte allen interessierten Nutzern weltweit ohne Restriktionen zur Verfügung stehen.

Wissenschaftliche Missionsziele und erste Ergebnisse

Primäres Ziel der GRACE-Mission ist die Bestimmung globaler Schwerefeldmodelle der Erde alle 30 Tage, mit bisher nie erreichter Genauigkeit für den räumlichen Auflösungsbereich von 20.000 bis 200 km Halbwellenlänge. Mit den Charakteristika der erzielten GRACE-Einschussbahn, den während der Validationsphase erhaltenen Ergebnissen für die Messgenauigkeit der Instrumente und der zu erwartenden Missionsdauer von mehreren Jahren, kann davon ausgegangen werden, dass die gemeinsame Verarbeitung von GRACE-Beobachtungen über einen Zeitraum von 2 bis 5 Jahren zu einem mittleren *statischen Schwerefeldmodell* führen wird, das im genannten Auflösungsbereich mindestens um den Faktor 10 bis 100 genauer ist als alle bisher aus Satellitenbeobachtungen abgeleiteten Schwerefeldmodelle der Erde. Bereits die Analyse der ersten Datensätze hat gezeigt, dass wesentliche Verbesserungen hinsichtlich Genauigkeit sowie räumlichzeitlicher Auflösung des Erdschwerefeldes erreicht werden können. In der Folge sind einige vom GFZ-GRACE-Team erarbeitete erste Ergebnisse dargestellt.

Globales statisches Schwerefeld der Erde

Viele theoretische und praktische Fragestellungen der Geodäsie, Geophysik, Ozeanographie und der Satellitennavigation können nur beantwortet werden, wenn eine präzise Niveaulfläche des Schwerefeldes der Erde bekannt ist. Diese Referenzfläche bezeichnet man als Geoid und auf ihr beruhen alle Höhenangaben der geodätischen Praxis oder Angaben zur Topographie der Ozeane und der Eisschilde. Dieses *mittlere statische Schwerefeld* konnte bereits im Rahmen der CHAMP-Mission durch die Auswertung der praktisch kontinuierlich vorliegenden satellitengestützten CHAMP/GPS-Intersatellitenmessungen (SST) und Beschleunigungsmesserdaten im Vergleich zu den in den 30 Jahren davor auf der Basis von sehr lückenhaften bodengestützten „klassisch bestimmten“ Schwerefeldern (GRIM5-S1, EGM96) wesentlich verbessert werden. Zu nennen ist hier insbesondere das kürzlich berechnete EIGEN_CHAMP03Sp-Modell (Reigber et al., 2003a), das auf der Auswertung von 27 Monaten CHAMP-Daten beruht und eine Genauigkeitssteigerung um etwa eine Größenordnung liefert.

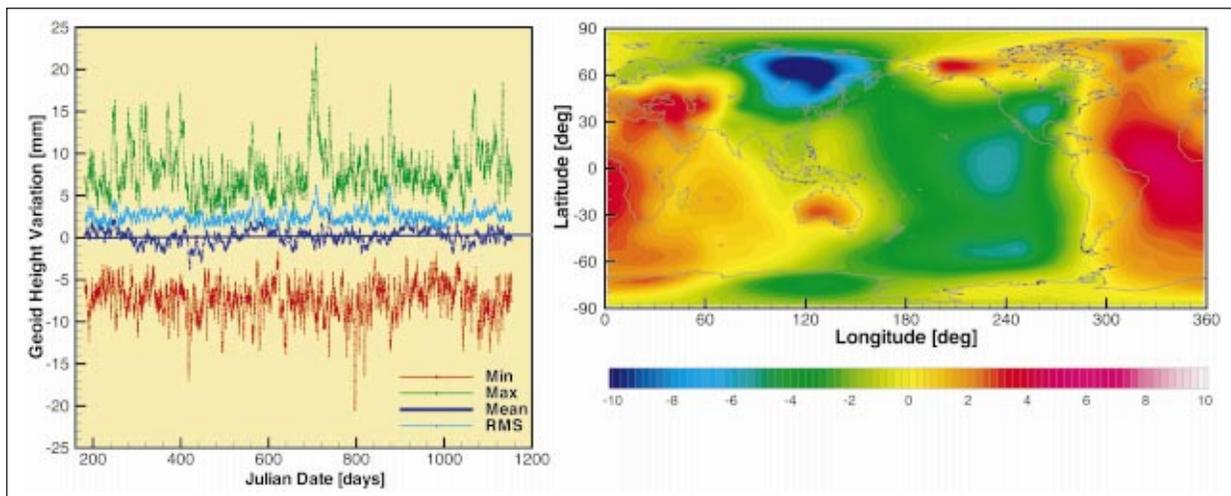


Abb. 7: Geoidhöhenänderungen [mm] im Zeitraum 1. Juli 2000 bis 31.8.2003, bedingt durch Massenvariationen in der Atmosphäre und den Ozeanen (links) und Beispiel für den 1. Mai 2003 00:00 (rechts)

Geoid height variations [mm] between July 1, 2000 and August 31, 2003 due to atmospheric and oceanic mass variations (left) and example for May 1, 2003 00:00 (right)

Mit dem Start der GRACE-Zwillingsatelliten wurde einerseits das CHAMP-Konzept kopiert und verdoppelt. Die im Vergleich zu CHAMP resultierende Genauigkeitssteigerung wird andererseits primär durch die zusätzliche Verbindung der beiden Satelliten durch einen Mikrometergenauen K-Band-Mikrowellenlink und eine zehnfach höhere Genauigkeit des GRACE-Akzelerometers erreicht. Aus der Auswertung von nur 39 Tagen GRACE-Instrumentendaten wurde bereits Mitte 2003 ein erstes Schwerefeld (EIGEN_GRACE01S, Reigber et al., 2003b) berechnet, das im Juli 2003 der internationalen Nutzergemeinschaft über die Internetseiten des GFZ GRACE-Projektes (<http://www.gfz-potsdam.de/grace>) zur Verfügung gestellt wurde.

In der Folgezeit wurden alle Instrumentendaten einheitlich neu prozessiert und daraus eine verbesserte Version EIGEN_GRACE02S abgeleitet (Reigber et al., 2004). Dieses Schwerefeld beinhaltet 110 Tage GRACE-Instrumentendaten der Monate August und November im Jahr 2002 sowie April, Mai und August im Jahr 2003. Bei der Auswertung der durchschnittlich 24 Stunden langen Satellitenbahnbögen wurden insgesamt 6,8 Millionen GPS-Entfernungs- und Phasenmessungen sowie 1,8 Millionen K-Band-Entfernungsänderungs-Beobachtungen verarbeitet. Bei der Berechnung des mittleren Schwerefeldes wurden alle relevanten zeitvariablen Störkräfte wie beispielsweise die Erd- und Ozeangezeiten und Massenvariationen in der Atmosphäre und den Ozeanen mitberücksichtigt. Letztere werden vom GFZ Potsdam auf der Basis von sechsständigen, hochauflösenden meteorologischen Feldern, die über den Deutschen Wetterdienst regelmäßig vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) bezogen werden, und eines barotropen Ozeanmodells, das vom Jet Propulsion Laboratory (JPL) zur Verfügung gestellt wurde, berechnet (Flechtner, 2003). Diese Kurzzeitmassenvariationen bewirken eine Änderung im Geoid von durchschnittlich etwa 3 bis 4 mm, können aber bis zu 20 mm erreichen, und müssen folglich in Rechnung gestellt werden.

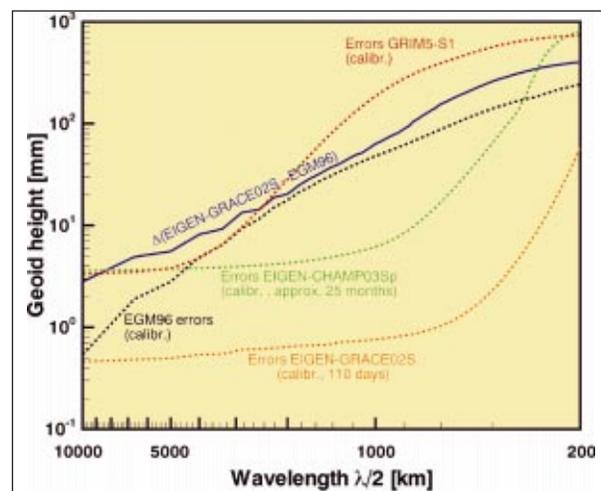


Abb. 8: Kumulativer Geoidfehler als Funktion der räumlichen Auflösung für EIGEN_GRACE02S, EIGEN_CHAMP03Sp, GRIM5-S1 und EGM96 sowie die kumulativen Geoiddifferenzen zwischen EIGEN_GRACE02S und EGM96

Cumulative geoid error as a function of spatial resolution for EIGEN_GRACE02S, EIGEN_CHAMP03Sp, GRIM5-S1 and EGM96 and the cumulative geoid differences between EIGEN_GRACE02S and EGM96

EIGEN_GRACE02S wurde vollständig bis zum Grad 150 entwickelt, d.h. es wurden insgesamt 22797 einzelne Kugelfunktions-Koeffizienten berechnet. Dies entspricht einer räumlichen Auflösung von etwa 275 km für die Geoidstrukturen, die alleine aus GRACE-Beobachtungen abgeleitet wurde. Da keine Altimeter- oder terrestrischen Schwerefelddaten hinzugezogen wurden, eignet sich dieses Schwerefeld hervorragend für ozeanographische Anwendungen. Der aus dieser Lösung resultierende kumulative Geoidfehler beträgt etwa 1 mm für eine räumliche Auflösung von etwa 600 km bzw. 1 cm für eine Auflösung von 275 km. Dies entspricht einer Genauigkeitssteigerung um etwa eine Größenordnung gegenüber dem bisher besten CHAMP-Modell.

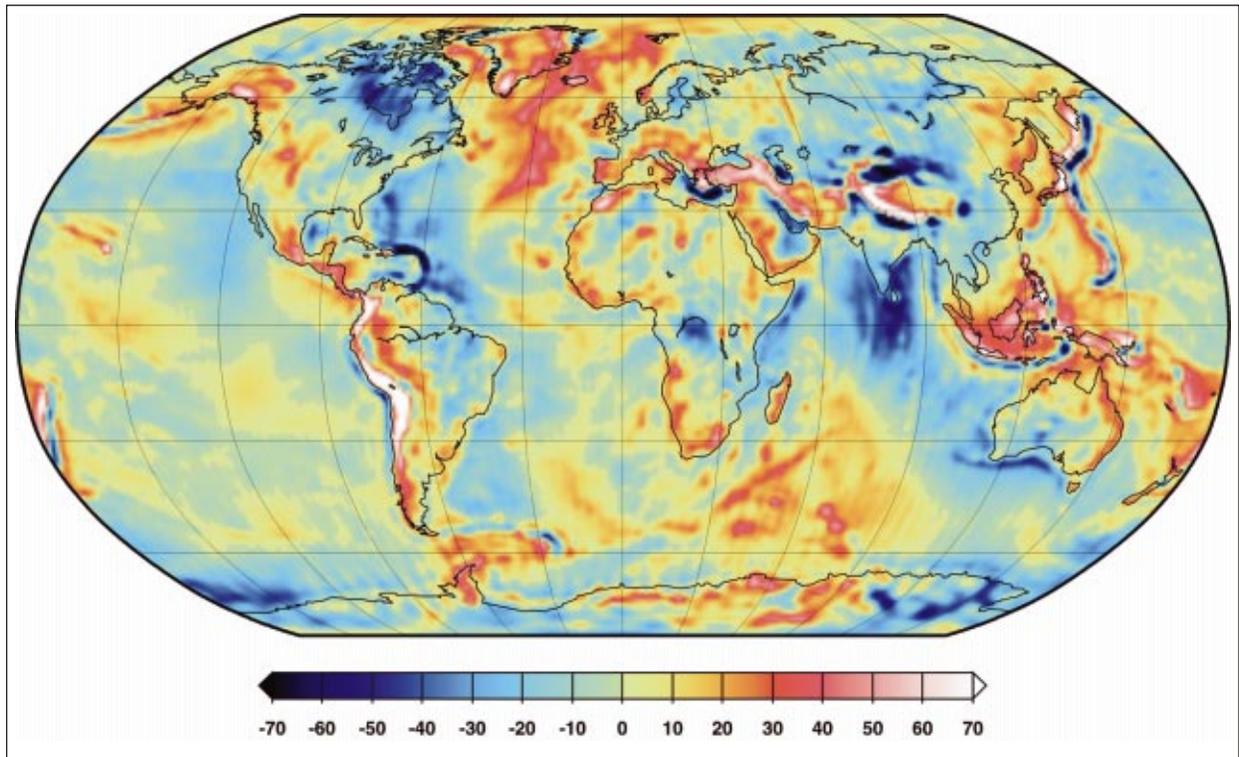


Abb. 9: Schwereanomalien, (mgal) abgeleitet aus EIGEN_GRACE02S (Reigber et al., 2004)

Gravity anomalies derived from EIGEN_GRACE02S (Reigber et al., 2004)

Der Vergleich mit dem aus Altimeterbeobachtungen bestimmten Ozeangeoid liefert für EIGEN_GRACE02S eine rms-Differenz von 16 cm für $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, ebenfalls eine deutliche Verbesserung gegenüber EIGEN_CHAMP03Sp (rms = 33 cm). Beim Vergleich mit NIMA (US National Imaging and Mapping Agency) Schwereanomalien zeigt sich für dieselbe räumliche Auflösung ein ähnliches Bild: der EIGEN_GRACE02S-rms beträgt nur 1,25 mgal, der von EIGEN_CHAMP03Sp dagegen 3,74 mgal. Das aus der EIGEN_GRACE02S-Lösung abgeleitete globale Schwereanomalienfeld ist in Abb. 9 dargestellt.

Mit dem EIGEN_GRACE02S-Schwerefeldmodell des GFZ und vergleichbaren Lösungen des CSR in Austin stehen erstmals Geoid- und Schwereanomalienmodelle von global homogener, herausragender Qualität für verschiedenste Anwendungen in der Geodäsie, Geophysik, Ozeanographie und Glaziologie zur Verfügung. Ein global gültiges Höhendatum mit Zentimetergenauigkeit wird für alle topographischen Strukturelemente bis zu 300 km räumlicher Auflösung über Land und Eisflächen zur Verfügung gestellt. Details der Meerestopographie lassen sich bis zu einer Auflösung von etwa 300 km mit Zentimetergenauigkeit erfassen. Systematische Fehler in terrestrischen und aerogravimetrischen Sammlungen von Schwereanomalien- oder Geoidwerten werden mit diesen neuen Modellen zuverlässig bestimmbar und das Schwerfeld im Bereich der Polgebiete wird erstmals mit großem Detail und Genauigkeit erfassbar. Für die Geodynamik liefern diese Schwerfelder zuverlässige Randwerte für groß- und mittelskalige Modellbildungen.

Zeitvariabilität des Schwerfeldes

Das dynamische System Erde verändert sich ständig. Direkt erkennbar sind Veränderungen der Oberflächengeometrie der Kontinente, der Ozeane und Eisflächen und Variabilitäten in der Atmosphäre. Weniger direkt erkennbar sind z. B. Schwankungen in der Grundwasserspeicherung oder Veränderungen, die mit der Mantelkonvektion und Erdkerndynamik in Verbindung stehen.

All diese Prozesse sind mit Massenbewegungen verbunden, die Erdrotation und Schwerfeld der Erde beeinflussen. Konnten bisher im wesentlichen nur die zeitlich variable Erdrotation und die magnetische Säkularvariation zur Erklärung geophysikalische Prozesse herangezogen werden, beginnt jetzt die auf die Bestimmung zeitlich hochauflösender Schwerfelder angelegte Mission GRACE eine zusätzliche Informationsquelle über Prozesse im System Erde zu erschließen.

Die GRACE-Satellitenbahnen sind frei driftend, folgen also keinem vorgegebenen Wiederholungsmuster für die Bodenspuren. Bei der GRACE-Konfiguration können also Bahn und relativer Abstand der Satelliten kontinuierlich mit den GPS-Empfängern und dem K-Band System über den unterschiedlichsten Punkten der Erdoberfläche gemessen werden und auf diese Weise Schwerfelder mit höchster Präzision über relativ kurze Zeiträume (etwa 1 Monat) bestimmt werden. Vergleicht man solche monatlichen Schwerfeldmodelle, lassen sich saisonale, halbjährige und jährliche Schweresignale heraustrennen, die im Zusammenhang stehen mit saisonalen bzw. längerfristigen Massenumverteilungsvorgängen.

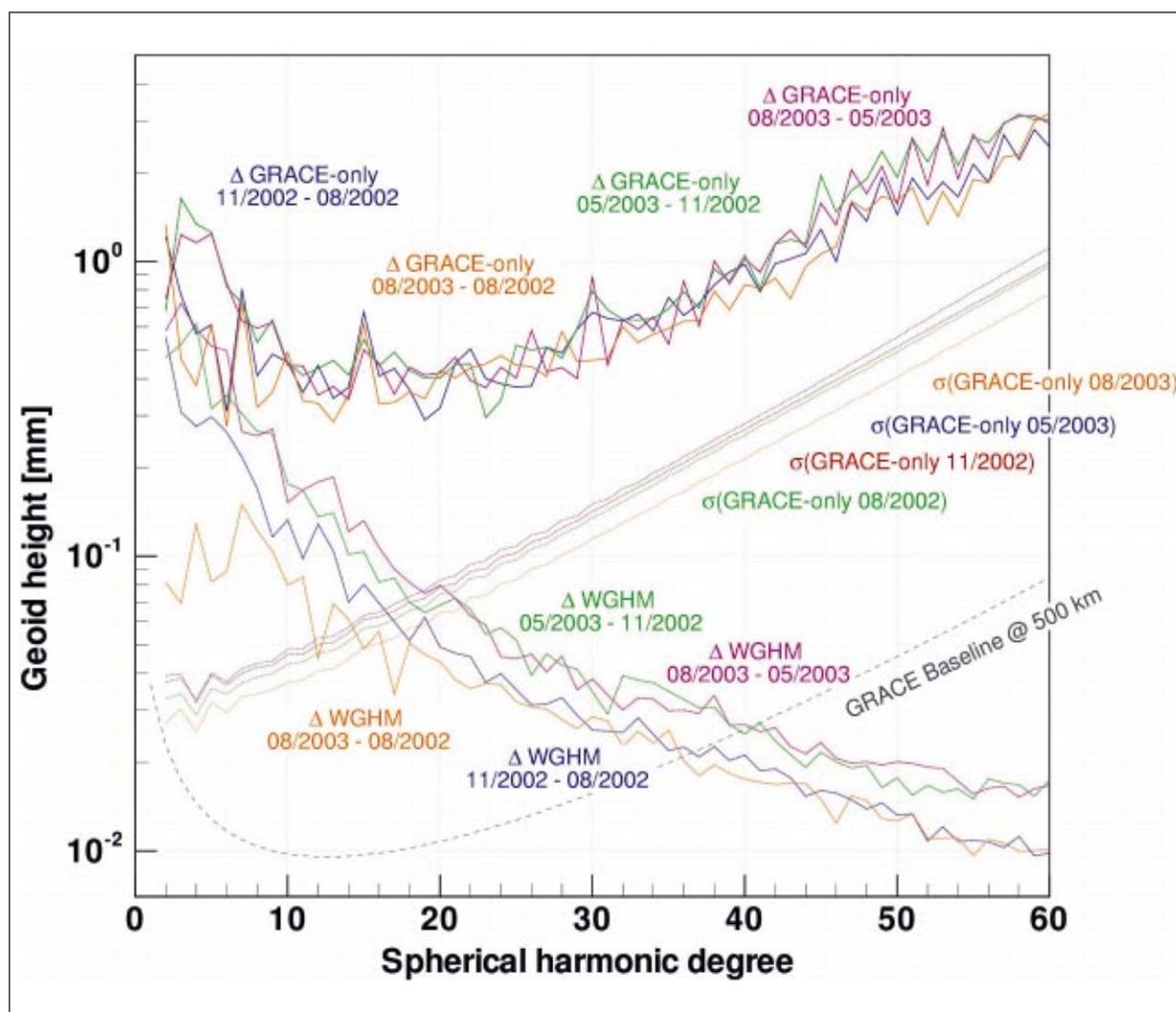


Abb. 10: Signal (Δ) und Fehler (σ) verschiedener monatlicher GRACE-Schwerefeldmodell­differenzen sowie das entsprechende Signal der WGHM Modell­differenzen bis zum Grad 60.

Signal (Δ) and error (σ) of different monthly GRACE gravity model differences and signal of the WGHM model differences up to degree 60

Erstmals konnte kürzlich nachgewiesen werden, dass die monatlichen GFZ-GRACE-Schwerefelder ein eindeutiges hydrologisches Signal enthalten. Dazu wurden GFZ-GRACE-Schwerefelder für die Monate August und November 2002 sowie Mai und August 2003 miteinander verglichen und resultierende Geoiddifferenzen für den Längstwellenbereich berechnet.

Bekannte kurzzeitige Variationen bedingt durch Ozean- und Erdzeiten oder Massenverlagerungen in der Atmosphäre und den Ozeanen wurden bereits, wie eingangs erwähnt, bei der Berechnung der Schwerefeldmodelle berücksichtigt. Die Differenz zweier derart bestimmter monatlicher Schwerefelder sollte somit im wesentlichen das kurzfristige hydrologische Signal repräsentieren. Verglichen wurden die GRACE-Ergebnisse mit mehreren globalen hydrologischen Modellen, indem das aus dem entsprechenden Hydrologie-Modell resultierende Geoidsignal berechnet wurde und die monatlichen Differenzen gebildet wurden. Die globalen hydrologischen Modelle liefern deutlich unterschiedliche Ergebnisse. Nachfolgend gezeigt sind Vergleiche mit

dem an der Universität Kassel entwickelten Watergap Global Hydrological Model WGHM (Döll et al., 2003)

Abb. 10 zeigt das Signal (Δ GRACE-only) und den Fehler (σ GRACE-only) verschiedener GRACE-Monatsdifferenzen sowie das Signal der entsprechenden WGHM-Differenzen (Δ WGHM). Man erkennt, daß GRACE etwa bis zum Grad 13 (1500 km Wellenlänge) auf Änderungen im hydrologischen Zyklus sensitiv ist. Weiterhin wird deutlich, daß das geringste Signal zwischen zwei ein Jahr auseinanderliegenden Differenzen besteht (August 2003 – August 2002), das stärkste hingegen zwischen saisonal getrennten Zeiträumen (August 2003 – Mai 2003 oder Mai 2003 – November 2002).

Betrachtet man die Differenzen auf globaler Ebene bis zu einem Entwicklungsgrad 13, zeigt sich, dass für saisonal getrennte Zeiträume (August 2003 – Mai 2003) markante hydrologische Strukturen des WGHM Modells auch in den GRACE Schwerefeldern sichtbar werden. Diese Signale sind beispielsweise im Amazonasbecken, Nordsibirien oder Südchina deutlich erkennbar. Betrachtet man die Variationen über exakt ein Jahr

(August 2003 – August 2002), ist kein ausgezeichnetes hydrologisches Signal im WGHM-Modell erkennbar. Dagegen lassen die GRACE Modelle noch Strukturen erkennen, die aber räumlich nicht zugeordnet werden können. Diese restliche Unterschiede können u.a. durch noch nicht modellierte Effekte (post-glaziale Hebung) oder Ungenauigkeiten in den benutzten Modellen (Ozeangezeiten) erklärt werden. Hierzu werden z. Zt. detaillierte Untersuchungen durchgeführt.

Ausblick

Die ersten 21 Monate haben gezeigt, dass die GRACE-Mission die in sie gesetzten hohen Erwartungen erfüllen kann. Der Satellitenbus und alle Instrumente arbeiten zufriedenstellend im Rahmen ihrer extrem hohen Spezifikationen. Einige Instrumentenausfälle auf GRACE-1 kurz nach dem Start konnten durch ihre Ersatzeinheiten ohne Probleme kompensiert werden. Die ersten Auswertungen der verschiedenen Messdaten haben bereits zu einer großen Genauigkeitssteigerung in der Schwerefeldmodellierung geführt. Erstmals ist es zudem gelungen, monatliche globale Massenvariationen zu beobachten und diese im Wesentlichen mit der Hydrologie in Verbindung zu bringen. Diese ersten Ergebnisse sind bereits sehr vielversprechend, werden aber sehr wahrscheinlich durch eine weiter optimierte Vorprozessierung der Instrumentendaten und die Verfeinerung der Auswertetechniken in naher Zukunft noch weiter verbessert werden können. Mit zunehmender Missionsdauer und abnehmender Bahnhöhe wird zudem die Sensitivität der Tandem-Konfiguration für die Bestimmung des statischen und zeitvariablen Schwerefeldes weiter zunehmen.

Die GRACE-Mission befindet sich derzeit noch in ihrer Validationsphase. Nach Abschluß letzter Softwareabgleiche und der Erprobung der Okkultationsmessungen wird ab etwa Mai 2004 der Routinebetrieb beginnen können.

Literatur:

Döll, P., F. Kaspar, B. Lehner: *A global hydrological model for deriving water availability indicators: Model tuning and validation*, J. Hydrology, 270, 105-134, 2003.

Dunn, Ch., W. Bertiger, Y. Bar-Sever, S. Desai, B. Haines, D. Kuang, G. Franklin, I. Harris, G. Krüzinga, T. Meehan, S. Nandi, D. Nguyen, T. Rogstad, J. Brooks Thomas, J. Tien, L. Romans, M. Watkins, S.-Ch. Wu, S. Bettadpur and J. Kim, *Instrument of GRACE - GPS Augments Gravity Measurements*, GPS World, Feb. 1, 2003.

Flechtner, F.: *AOD1B Product Description Document, GRACE Project Documentation*, JPL 327-750, Rev. 1.0, 2003.

Reigber, Ch., H. Jochmann, J. Wünsch, S. Petrovic, P. Schwintzer, F. Barthelmes, K.-H. Neumayer, R. König, Ch. Förste, G. Balmino, R. Biancale, J.-M. Lemoine, S. Loyer, and F. Perosanz, *Earth Gravity Field and Seasonal Variability from CHAMP*, Proceed. 2nd CHAMP Science Meeting, GFZ Potsdam, Sept. 2003, submitted for publication by Springer, <http://op.gfz-potsdam.de/champ/results>, 2003a.

Reigber, Ch., R. Schmidt, F. Flechtner, R. König, U. Meyer, K.-H. Neumayer, P. Schwintzer, and S.Y. Zhu, *First GFZ GRACE gravity field model EIGEN-GRACE01S*. <http://op.gfz-potsdam.de/grace/results>, 2003b.

Reigber, Ch., R. Schmidt, F. Flechtner, R. König, U. Meyer, K.-H. Neumayer, P. Schwintzer, S.Y. Zhu: *EIGEN gravity field model to degree and order 150 from GRACE mission data only*, submitted to J. Geodynamics, 2004.

Touboul, P., E. Willemenot, B. Foulon, and V. Josselin, *Accelerometers for CHAMP, GRACE and GOCE space missions: Synergy and evolution*, Boll. Geof. Teor. Appl., 40, 321-327, 1999.

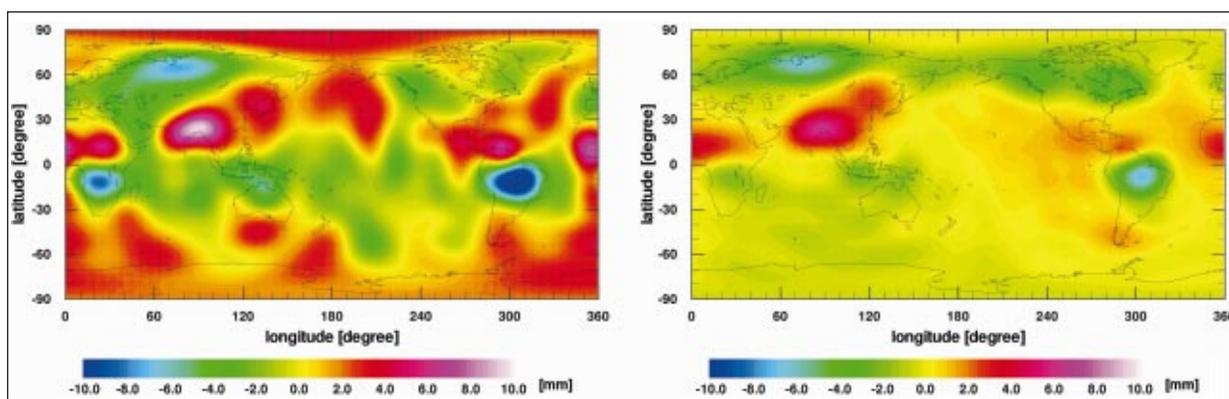


Abb. 11: Differenzen zwischen den monatlichen (August 2003 minus Mai 2003) GRACE-Schwerefeldern (links) und den entsprechenden Differenzen des hydrologischen Modells WGHM (rechts) in Form von Geoidhöhen entwickelt bis zum Grad und Ordnung 13 (entspricht etwa 1500 km räumlicher Auflösung)

Differences between the monthly (August 2003 minus May 2003) GRACE gravity field solutions (left) and corresponding differences of the WGHM hydrological model (right) in terms of geoid heights developed up to degree 13 (corresponds to a spatial resolution of 1500 km)

