

CHAMP und GRACE – erfolgreiche Schwerefeld- und Klimamissionen

Frank Flechtner, Roland Schmidt, Markus Rothacher, Jens Wickert, Hermann Lühr

With the CHAMP (Challenging Mini-satellite Payload) and GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) satellite missions tremendous improvements in gravity field determination, but also in the field of atmospheric sounding and magnetic field mapping, have been achieved. By their outstanding instrumentation the Earth's gravity field model could be improved by a factor of 10 and, in the case of GRACE, by almost a factor of 100 compared to the best pre-CHAMP satellite-only model. GRACE allows for the first time to monitor the time variability of the gravity field on short time scales. These changes are due to seasonal and secular mass exchange between the oceans, the atmosphere and the solid Earth. The variations provide valuable knowledge about the dynamic processes in the Earth interior; the mass redistribution in the oceans or the change in ice coverage at the poles and in Greenland. Therefore, with GRACE, a detailed monitoring of how much water, ice and material is being moved within the Earth's system has become possible for the first time.

On the following pages the status of the two missions and some outstanding results will be presented. Additional information on CHAMP and GRACE can be found in the GFZ reports 2000/01 and 2002/03.

53

Mit den CHAMP- (Challenging Mini-Satellite Payload) und GRACE- (Gravity Recovery and Climate Experiment) Satellitenmissionen sind enorme Verbesserungen bei der Bestimmung des Erdschwerefeldes, aber auch bei der Sondierung der Atmosphäre sowie der Kartierung des Magnetfeldes erreicht worden. Durch ihre einzigartigen instrumentellen Ausstattungen konnte das Schwerefeld im Vergleich zu dem vor Beginn der CHAMP-Mission besten, rein aus Satellitendaten bestimmten Modell, um einen Faktor 10 bzw. im Falle GRACE bisher um das Hundertfache verbessert werden. Mit GRACE ist es zudem erstmals möglich geworden, die Variabilität des Schwerefeldes auf kurzen Zeitskalen zu beobachten. Diese Änderungen sind bedingt durch den saisonalen und langzeitlichen Massenaustausch zwischen den Ozeanen, der Atmosphäre und der festen Erde. Aus diesen zeitlichen Variationen kann man somit wertvolle Erkenntnisse über dynamische Vorgänge im Erdinneren, über die Umlagerung der Wassermassen in den Ozeanen oder die Veränderung der Eisbedeckung an den Polen oder in Grönland gewinnen. Somit lässt sich mit der GRACE-Mission erstmals im Detail beobachten, welche Mengen an Wasser, Eis und Materie im System Erde in Bewegung sind.

Auf den folgenden Seiten werden der Stand der beiden Missionen sowie einige herausragende Ergebnisse dargestellt. Weitere Einzelheiten zu CHAMP und GRACE finden sich in den Zweijahresberichten 2000/01 bzw. 2002/03 des GFZ Potsdam.

Die CHAMP-Mission

Der CHAMP-Satellit ist seit seinem Start am 15. Juli 2000 nunmehr über 5 Jahre auf einer fast polaren Umlaufbahn im All und hat damit seine nominelle Lebensdauer bereits überschritten. Dies wurde durch ein zweimaliges Anheben des Orbits um je etwa 15 km im Jahr 2002 möglich (Abb. 2). Nach den momentanen Vorhersagen für die weitere Solaraktivität wird CHAMP, sofern keine weiteren Bahnkorrekturmanöver vorgenommen werden, etwa im Frühjahr 2008 in der Erdatmosphäre verglühen.

Die Instrumente zur Schwerefeldbestimmung (GPS-BlackJack-Empfänger in Verbindung mit einer zenit-orientierten Antenne, STAR-Akzelerometer, ASC Sternensensoren am Satellitenkörper und am Ausleger, Laser Retroreflektor), zur globalen Sondierung der vertikalen

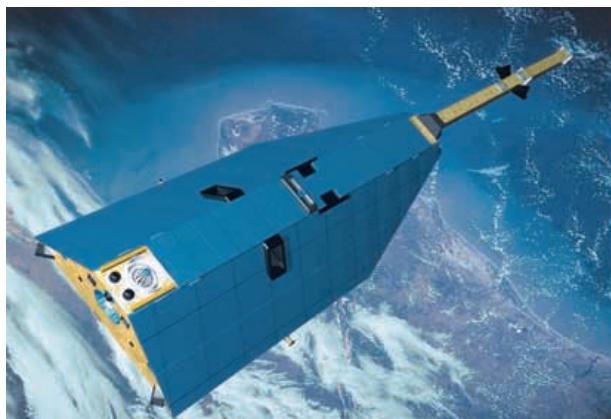


Abb. 1: Die Geo-Satelliten CHAMP (links) und GRACE (rechts, Abb. Astrium)
Geo-Satellites CHAMP (left) and GRACE (right)

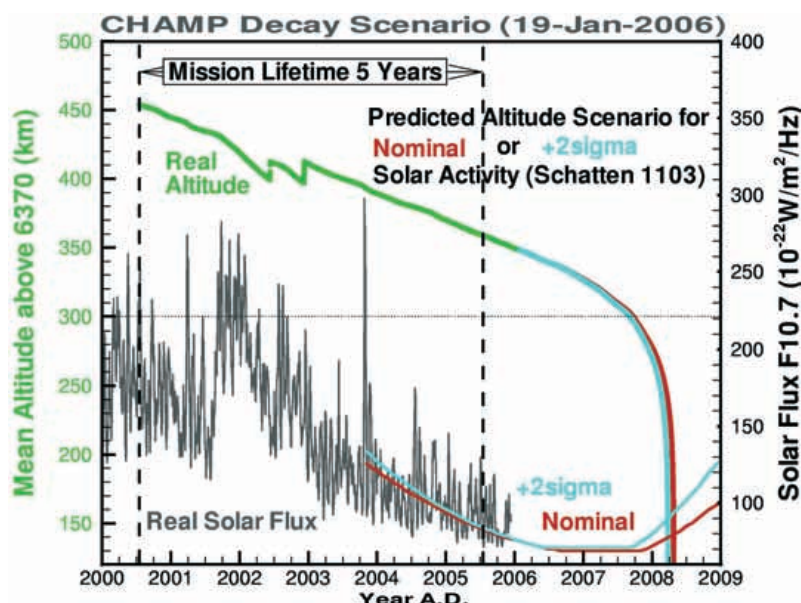


Abb. 2: Aktueller (grün) und vorherberechneter (rot, blau) Verlauf der Bahnhöhe von CHAMP.

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

Schichtung der Atmosphäre (GPS-BlackJack-Empfänger in Verbindung mit einer rückwärtsschauenden Antenne), zur Bestimmung von Ionendriftgeschwindigkeit, Elektronendichte und Temperatur entlang der CHAMP-Bahn (Langmuir-Sonde und Digitales Ionen-Driftmeter DIDM) sowie zur Berechnung hochaufgelöster Magnetfeldmodelle (Fluxgate und Overhauser Magnetometer) arbeiten nach wie vor ohne Probleme und liefern kontinuierlich hochpräzise Messdaten.

Die Messdaten werden vom Bodensegment (siehe weiter unten) empfangen und am GFZ Potsdam zu höherwertigen Produkten verarbeitet. Zur Nutzung der Zustandsgrößen in den Troposphären- und Stratosphärenschichten wie Temperatur oder Wasserdampfgehalt im Rahmen der Assimilation in Wettervorhersagemodellen müssen diese Produkte innerhalb von maximal 3 Stunden bereitgestellt werden. Aus diesem Grunde wurde vom GeoForschungsZentrum in Zusammenarbeit mit dem DLR eine weitere Empfangstation in Ny Ålesund auf Spitzbergen aufgebaut und in Betrieb genommen. Somit liegen die GPS-Messdaten zur Atmosphärensondierung spätestens nach einem Umlauf von CHAMP um die Erde, d.h. jeweils nach etwa 100 Minuten vor und können in der verbleibenden Zeit weiter aufbereitet werden. Einige Beispiele hierzu sowie zur Magnetfeldbestimmung mit CHAMP-Beobachtungen finden sich weiter unten sowie im Beitrag des Department 1 im vorliegenden Berichtsband. Die sehr guten Ergebnisse im Rahmen der Schwerfeldbestimmung werden natürlich in der Zwischenzeit durch die Nachfolgeemission GRACE in den Schatten

gestellt. Dessen ungeachtet liefert CHAMP einen wichtigen Anteil bei der Bestimmung des hochauflösenden Schwerfeldes und kann auch dazu dienen, GRACE-Schwerfelder in Zeiten von Satellitenbahnwiederholungszyklen zu stützen.

Die GRACE-Mission

GRACE ist eine amerikanisch-deutsche Satellitenmission zur Beobachtung des Schwerfeldes und seiner zeitlichen Änderungen sowie zur Sondierung der Atmosphäre mit GPS-Radiookkultationsmessungen über einen Zeitraum von mindestens 5 Jahren. Dabei umkreisen zwei baugleiche Satelliten die Erde auf nahezu polaren Bahnen in niedriger Höhe und messen ihren gegenseitigen Abstand und dessen Änderung mit extrem hoher Genauigkeit. Die daraus abgeleiteten Schwerfeldvariationen sind ein Maß für

alle Massenänderungen im System Erde. Somit können Veränderungen in den Oberflächen- und Tiefenströmungen der Ozeane, Änderungen in der kontinentalen Wasserspeicherung, der Eismassenhaushalt oder großräumige Deformationen und Massenbewegungen an der Erdoberfläche und im Erdinneren erstmals auf globaler Skala über längere Zeiträume beobachtet werden. Damit liefert die GRACE-Mission wichtige Ergebnisse zur Erdsystemforschung.

Die von den beteiligten Wissenschaftlern so getauften Zwillingsatelliten „Tom“ und „Jerry“ wurden am 17. März 2002 vom nord-russischen Weltraumbahnhof Plesetsk mit einer Rakete vom Typ „ROCKOT“ gestartet. Seither haben

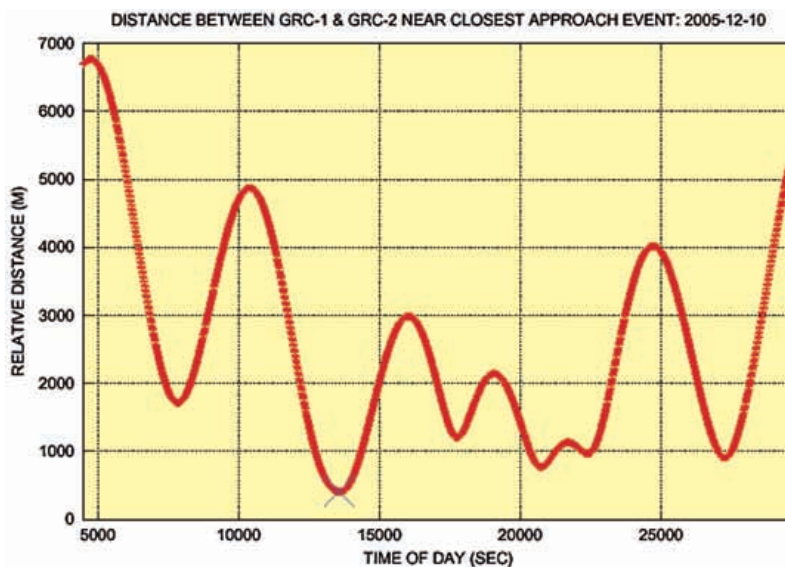


Abb. 3: Abstand der beiden GRACE-Satelliten [m] während des Austauschmanövers Mitte Dezember 2005 (<http://www.csr.utexas.edu/grace/operations>).

Distance between the two GRACE satellites [m] during the switch manoeuvre mid December 2005 (<http://www.csr.utexas.edu/grace/operations>).

sie bereits mehr als 21000-mal die Erde umkreist. Die Anfangsflughöhe von 500 km ist durch nur geringe Sonnenaktivität bis Ende 2005 auf 473 km abgesunken, wodurch sich auch die Sensitivität zur Schwerefeldbestimmung leicht erhöht hat. Um einer Alterung der Antenne des K-Band-Mikrowellenentfernungsmessgerätes durch Restmoleküle in der oberen Atmosphäre zu minimieren, wurden im Dezember 2005 die beiden Satelliten wie geplant nach etwa der Hälfte der Missionsdauer ausgetauscht. Dieses gewagte Manöver (Abb. 3) verlief ohne Zwischenfälle, wobei der kleinste Abstand der Satelliten am 10. Dezember 2005 lediglich 400 m betrug. Seitdem fliegt „Jerry“ vorneweg und durch seine Drehung um 180 Grad in Richtung „Tom“ befindet sich nun seine K-Band Antenne im „Windschatten“.

Die wissenschaftlichen Instrumente an Bord der Satelliten arbeiten ohne Probleme und liefern bislang bis auf wenige Ausnahmen kontinuierlich Messdaten.

Das zentrale Beobachtungsgerät zur Positionierung der Satelliten und zur Durchführung der Radiookkultationsmessungen ist der sich auch bei CHAMP im Einsatz befindende *GPS-BlackJack-Empfänger*. Während die Positionsmessungen seit Beginn der Mission als unbedingt notwendige Beobachtungen zur Schwerefeldbestimmung durchgeführt werden, wurden die Radiookkultationsmessungen bisher nur experimentell für einige Tage, aber sehr erfolgreich, aktiviert.

Das Instrument, das die extrem genaue Schwerefeldbestimmung von GRACE erst ermöglicht, ist das von NASA/JPL bereitgestellte *Zweifrequenz-K-band-Entfernungsmesssystem* (HAIRS). Mit diesem Gerät kann man den Abstand und die Abstandsänderungen der beiden Satelliten genauer als 10 m bzw. 1 m/s beobachten. Diese beiden Messgrößen stellen ein Maß für Massenvariationen und damit Schwereänderungen unterhalb der Flugbahn der beiden Satelliten dar.

Das *SuperSTAR-Akzelerometer*, eine Weiterentwicklung des bei CHAMP bereits erfolgreich eingesetzten elektrostatischen, dreiachsigen STAR-Akzelerometers, misst die kontinuierlich auf den Satelliten wirkende, nicht-gravitative Störbeschleunigung von bis zu 10^{-4} m/s^2 mit einer Auflösung von 10^{-10} m/s^2 . Damit ist es um eine Größenordnung genauer als das STAR-Gerät. Es arbeitet in allen drei Achsen im Rahmen der Spezifikationen und liefert damit wichtige Messdaten zur Trennung der nicht-gravitativen Beschleunigungen von den Gravitationsbeschleunigungen.

Beide Satelliten tragen außerdem jeweils zwei *Sternensensoren*. 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.

Schließlich befindet sich auf beiden Satelliten jeweils ein vom GFZ Potsdam entwickelter und gebauter, sehr kompakter und aus vier Prismen bestehender *Laser-Retro-Reflektor* (LRR). Dieser ist, wie sein baugleicher CHAMP-LRR, sowohl für Nacht- als auch für Tageslichtbedingungen geeignet. Das Bodenstationsnetz des Internationalen Laserdienstes (ILRS) liefert zu beiden Satelliten etwa 3 bis 4 Passagen täglich. Da die Einzelschussgenauigkeit einiger Stationen nur wenige mm beträgt, stellen die SLR-Beobachtungen eine sehr gute unabhängige Messgröße dar, die regelmäßig zu Validations- und Kalibrationszwecken im Rahmen der GRACE-Bahnbestimmung herangezogen werden.

Das CHAMP- und GRACE-Bodensegement

Die CHAMP- und GRACE-Bodensegmente bestehen prinzipiell 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 Rohdaten-zentrums zuständig ist,
- einer vom GFZ betriebenen zusätzlichen *polaren Empfangsstation* in Ny Ålesund auf Spitzbergen, bestehend aus zwei unabhängigen Antennen und Empfängern, die den gleichzeitigen Empfang der beiden GRACE- oder der CHAMP-GRACE-Messdaten bei fast jedem Umlauf der Satelliten und damit die Auswertung der Okkultationsdaten in quasi Echtzeit sowie die kontinuierliche Überwachung der Satelliten ermöglichen (Abb. 4),
- einem von GFZ, JPL und dem Internationalen GNSS 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 Radiookkultationen,
- einem vom Internationalen Laser Ranging Service (ILRS) koordinierten *Netz von Laserstationen* zur Gewinnung von Präzisionsentfernungsmessungen zum Laserreflektor für die Bahnbestimmung bzw. zur unabhängigen Bahnkontrolle,
- einem vom GFZ Potsdam allein (CHAMP) und in einem Gemeinschaftsprojekt (GRACE) zwischen dem Jet Propulsion Laboratory (JPL), dem Zentrum für Weltraumforschung der Universität Texas (UTCSR) und dem GFZ entwickelten und betriebenen *Wissenschaftsdatensystem* zur Prozessierung der am Datenzentrum bereitgestellten Rohdaten zu höherwertigen Instrumentendaten, Schwerefeld- und Okkultationsprodukten bzw. Magnetfeldinformationen. Diese Produkte stehen dann über das *Information System and Data Center* (ISDC) sowie zusätzlich bei GRACE am *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (PO.DAAC) den Nutzern zur Verfügung.



Abb. 4: Aufbau der zweiten Antenne der GFZ/DLR-Multisatelliten-Empfangsstation in Ny Ålesund im Herbst 2005 (Foto C. Falck, GFZ).

Set-up of the second antennae of the GFZ/DLR multi-satellite receiving station in Ny Ålesund in autumn 2005.

Das Schwerfeld der Erde und dessen zeitliche Variation

Aus den Entfernungsbeobachtungen der CHAMP- und GRACE-Missionen zu hochfliegenden GPS-Satelliten und insbesondere durch die Abstandsvariationen zwischen den beiden GRACE-Zwillingsatelliten wird das Schwerfeld der Erde mit nie da gewesener Genauigkeit und erstmals auch dessen zeitliche Variation bestimmt. Damit hat ein neues Zeitalter der Schwerfeldbestimmung begonnen, da man jetzt geophysikalische und klimatologisch angetriebene Massenverlagerungen in der Hydrosphäre, der Kryosphäre, den Ozeanen und der festen Erde bilanzieren kann. Dadurch trägt die Schwerfeldkomponente der beiden Missionen, neben der Sondierung der Atmosphäre und der Bestimmung des Erdmagnetfeldes, wesentlich zur globalen Klimaforschung bei.

Globale Schwerfeldmodelle

Die Standards und Korrekturmodelle für die CHAMP- und GRACE-Schwerfeldprozessierung wurden inner-

halb der wissenschaftlichen Prozessierungssysteme immer wieder verbessert und erweitert. Zu erwähnen sind die

- Nutzung eines verbesserten Modells zur Berücksichtigung von Kurzzeitmassenvariationen in der Atmosphäre und in den Ozeanen. Hier wird nun statt des vereinfachenden barotropen Modells, das zusätzlich Lücken an den Polen aufweist, ein globales baroklines Modell, das durch die TU Dresden bereitgestellt wird, verwendet;
- verbesserte Bestimmung der Mehrdeutigkeiten der GPS-Beobachtungen. Dies führt insbesondere zu genaueren GPS-Bahnen und -Uhrenparametern, die damit einen verbesserten Referenzrahmen für die Auswertung der CHAMP- und GRACE-Satelliten darstellen;
- Auswertung der Instrumentendaten in kürzeren Zeitintervallen (Tageslösungen);
- Verwendung des am GFZ Potsdam berechneten EIGEN-CG03C-Kombinationsschwerfeldes als verbessertes Näherungsmodell.

Auf dieser Basis wurde fast die komplette GRACE-Mission neu ausgewertet. Die daraus abgeleitete Schwerfeldserie EIGEN-GRACE04S in Form von monatlichen Modellen sowie einem daraus gemittelten statischen Modell (entwickelt bis Grad und Ordnung 120) zeigt dabei im kurz- und mittelwelligen Bereich eine etwa 25 – 30 % bessere Anpassung an externe Vergleichsdaten (Schwereanomalien oder das aus Altimeterdaten bestimmte ozeanische Geoid) als die vorherige in 2004 gerechnete Serie EIGEN-GRACE03S. Unrealistische Signale auf den Ozeanen (Abb. 5a, b) sind in der neuen Lösung deutlich reduziert oder nicht mehr vorhanden. Weiterhin kann man nun alle niederen Grade der Schwerfeldlösungen benutzen, da diese Terme im Gegensatz zu bisherigen Lösungen nun sehr realistische Werte annehmen. Dies wird insbesondere bei dem die Erdabplattung beschreibenden C_{20} -Koeffizienten sichtbar (Abb. 6), der unabhängig aus Laser-Entfernungsmessungen zum hochfliegenden Lageos-Satelliten abgeleitet wurde.

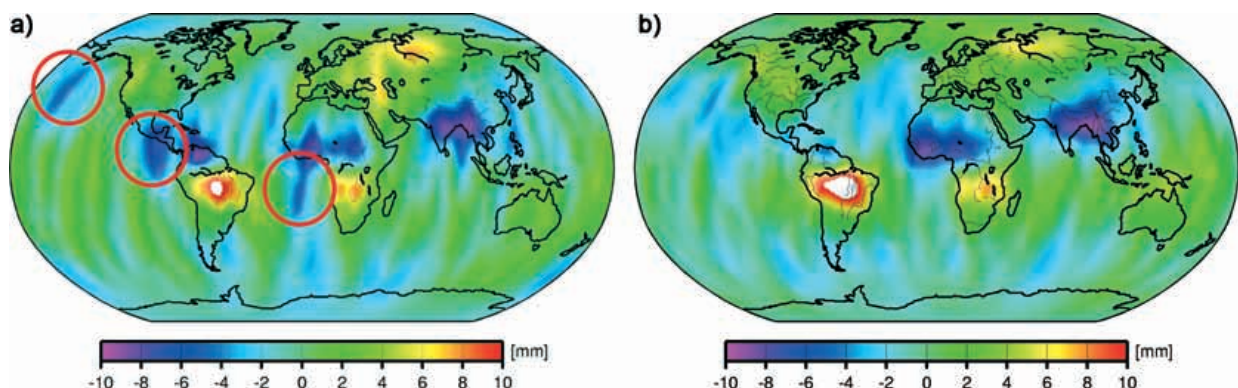


Abb. 5a, b: Geoidänderung in [mm] zwischen Mai und August 2003, berechnet aus EIGEN-GRACE03S (links) und EIGEN-GRACE04S (rechts) und dargestellt als räumliche Mittelwerte (Gauss-Filter mit einer Länge des Filterradius von 500 km). Eingekreist sind bisher unrealistische Signale über den Ozeanen.

Geoid variations [mm] between May and August 2003 calculated from EIGEN-GRACE03C (left) and EIGEN-GRACE04S (right), shown as spatial mean values calculated with a Gaussian filter with a filter radius length of 500 km. So far unrealistic signals over the oceans are encircled.

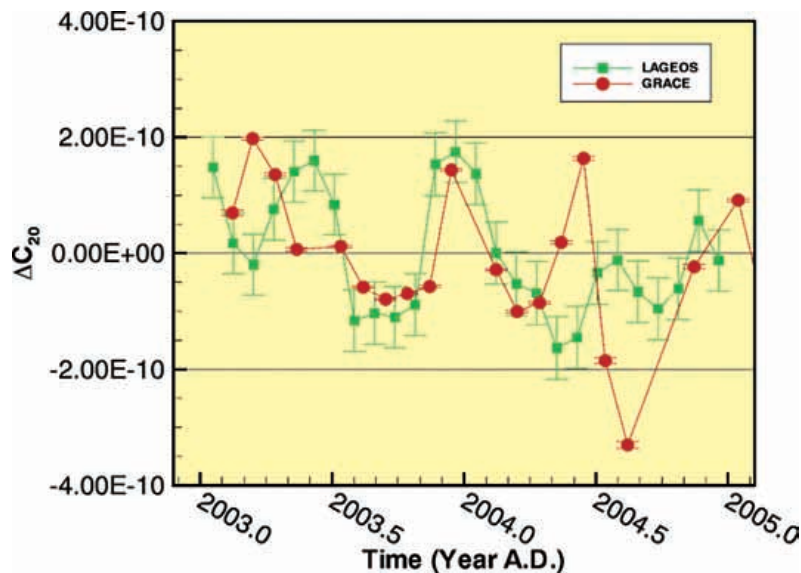


Abb. 6: C_{20} -Variation abgeleitet aus monatlichen EIGEN-GRACE04S-Schwerefeldern und 14-tägigen Werten aus LAGEOS Satellite Laser Ranging-Daten.

C_{20} variations derived from monthly EIGEN-GRACE04S gravity fields and bi-weekly values derived from LAGEOS satellite laser ranging data.

Analog wurden die CHAMP-Schwerefelder mit den GRACE-Auswertestandards bis zu Grad und Ordnung 60 monatsweise über einen Zeitraum von fünf Jahren neu berechnet und anschließend jeweils drei Monate als gleitendes Mittel kombiniert. Die Güte dieser neuen Zeitreihe EIGEN-CHAMP04S zeigt sich in der hohen Korrelation vieler Kugelfunktionskoeffizienten mit denen der GRACE-Lösung. Obwohl mit CHAMP insgesamt nur eine geringere räumliche und zeitliche Auflösung des zeitvariablen Schwerfeldes als mit GRACE erreicht werden kann, dienen die CHAMP-Ergebnisse vor allem zur Verlängerung der Zeitreihen der GRACE-Mission. Ähnliches gilt für die Prozessierung des Lageos-Satelliten, dessen über 20 Jahre ausgedehnte Zeitreihe insbesondere Schwerfeldkoeffizienten beschreibt, die in einem direkten Zusammenhang mit der Lage des Massenzentrums und den Hauptträgheitsachsen der Erde stehen. Ziel der weiteren

rechnet hat, und gravimetrisch bestimmten Schwereinformationen über Land. Von der Kombination mit dem hochfliegenden Lageos-Satelliten wird insbesondere eine Stabilisierung der langwelligen Anteile des Schwerfeldes erwartet. Aus diesem hochauflösenden Schwerfeld kann man topographisch-geophysikalische Strukturen wie Anden, Himalaja, nordatlantischer Rücken (positive Anomalien) oder Tiefseegräben am Rande des Nordwestpazifiks oder an der Westküste Südamerikas (negative Anomalien) bis hinab zu etwa 50 km (halbe Wellenlänge) gut erkennen (Abb. 8). Da das Schwerfeld an der Erdoberfläche ein Summensignal der Dichteverteilung über den gesamten Erdkörper darstellt, sind für eine weitere, tiefer gehende Interpretation der geophysikalischen Strukturen und Prozesse dreidimensionale seismologische Tomografie-Modelle (siehe Detailbericht des Dep. 1) notwendig.

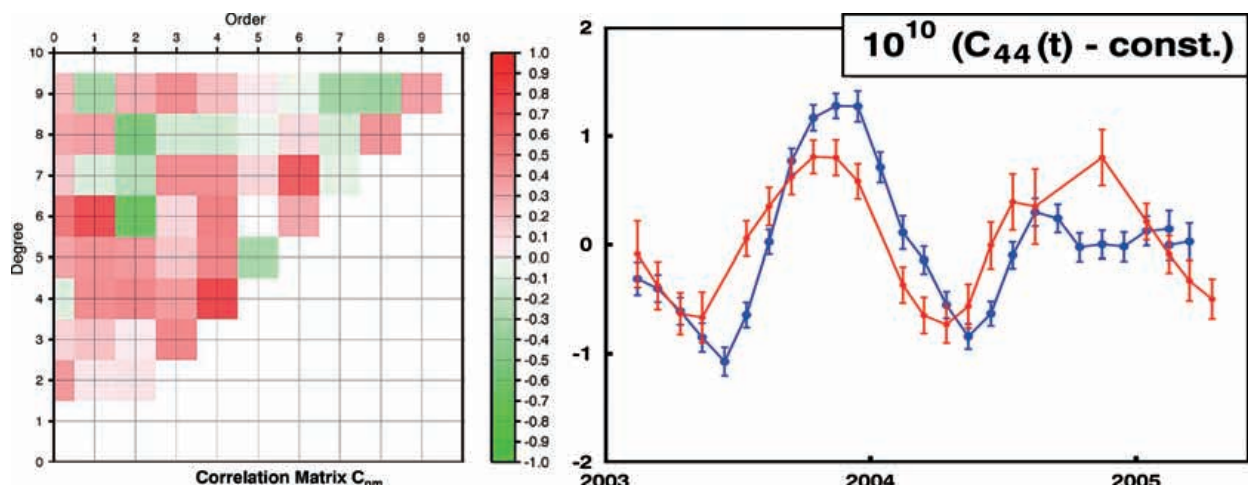


Abb. 7a, b: Korrelationsmatrix für EIGEN-CHAMP04S- und EIGEN-GRACE04S-Kugelfunktionskoeffizienten C_{nm} , dargestellt bis Grad und Ordnung 10 (links) und beispielhaft der Koeffizient C_{44} (rechts).

Correlation matrix for EIGEN-CHAMP04S and EIGEN-GRACE04S spherical harmonic coefficients C_{nm} , up to degree and order 10 (left) and exemplified the coefficient C_{44} (right).

Arbeiten wird es daher auch sein, die Kombination der verschiedenen Satellitenmissionen zu untersuchen, um mögliche Synergieeffekte für die Erstellung möglichst langer konsistenter Zeitreihen als Grundlage für die geowissenschaftlichen Anwendungen zu schaffen.

Räumlich hochauflösendes statisches Schwerfeld

Aus den neuen Schwerfeldlösungen EIGEN-CHAMP04S, EIGEN-GRACE04S und Lageos-SLR-Beobachtungen (Satellite Laser Ranging) sowie reprozessierten hochaufgelösten terrestrischen Schwerfeldinformationen wurde begonnen, ein neues Kombinationsschwerfeldmodell EIGEN-CGS04C zu berechnen. Die Oberflächenschweredaten stammen dabei aus der Satellitenaltimetrie über den Weltmeeren, wo das GFZ Potsdam ein neues ozeanisches Geoid (Näheres dazu im Bericht des Dep. 1 in diesem Band) be-

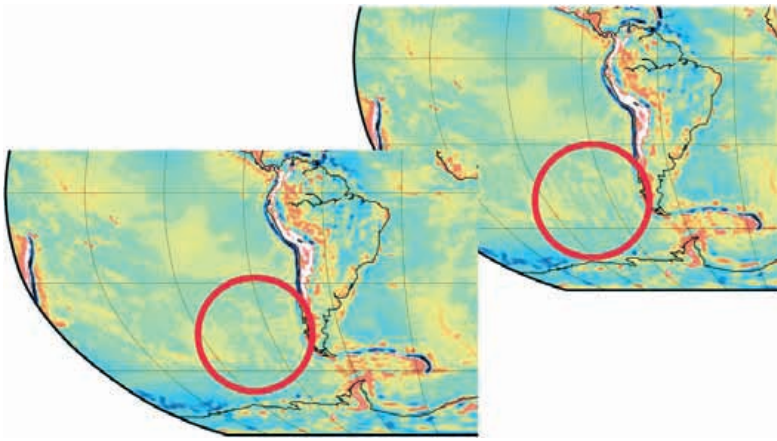


Abb. 8: Geographische Verteilung der Schwereanomalien (bezogen auf die ellipsoidische Normalschwere in Einheiten $\text{mgal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2 \sim 10^{-6} \text{ g}$) des Kombinationsschwerefeldes EIGEN-CG03C (rechts) und des vorläufigen Kombinationsmodells EIGEN-CG04C (links). Man erkennt im Schwerefeldmodell bereits die reduzierte Streifigkeit (fehlerhafte Abbildung der Satellitenbahnen) sowie die erhöhte Auflösung.

Geographic distribution of gravity anomalies (referring to ellipsoidal mean gravity in $\text{mgal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2 \sim 10^{-6} \text{ g}$) of the EIGEN-CG03C (right) and the preliminary EIGEN-CG04C (left) combination gravity field. Both the reduced striping (deficient depiction of satellite orbits) and the increased resolution are visible in the gravity field model.

Zeitvariabilität des Schwerefeldes

Da die Bodenspuren der GRACE-Satellitenbahnen sich prinzipiell nicht wiederholen und die Bahnen und der relative Abstand der Satelliten kontinuierlich mittels K-Band hochpräzise vermessen werden, ist es erstmals möglich, Schwerefelder höchster Genauigkeit über einen relativ kurzen Zeitraum von einem Monat zu bestimmen und damit die Variabilität des Schwerefeldes zu beobachten. Diese Änderungen sind bedingt durch den saisonalen oder langzeitlichen Massenaustausch zwischen den Ozeanen, der Atmosphäre und der festen Erde. Aus diesen zeitlichen Variationen kann man somit wertvolle Erkenntnisse über dynamische Vorgänge im Erdinneren, über die Umlagerung der Wassermassen in den Ozeanen oder die Veränderung der Eisbedeckung an den Polen oder in Grönland gewinnen.

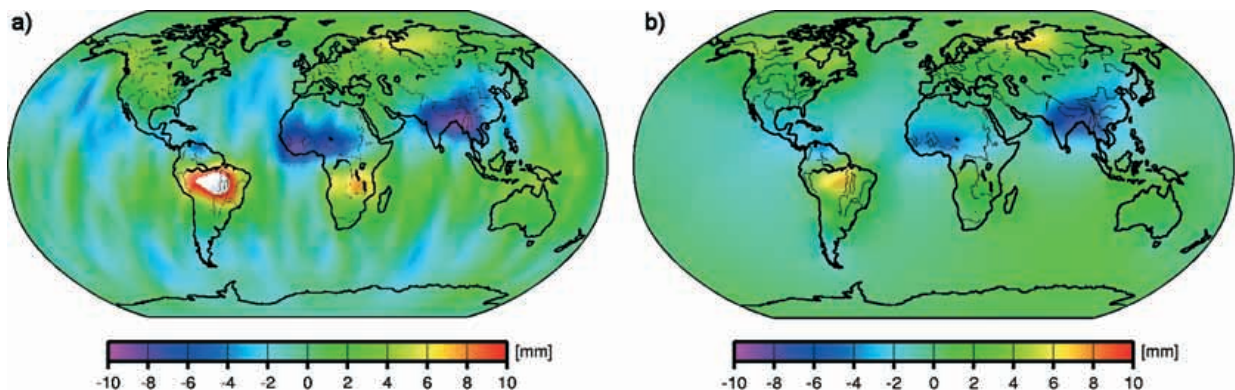


Abb. 9a, b: Differenzen zwischen den monatlichen (August 2003 minus Mai 2003) GRACE-Schwerefeldern (links) und den entsprechenden Differenzen des WGHM-Modells (rechts) in Form von Geoidhöhen in [mm]. Räumliche Mittelung wie in Abb. 5a, b.

Differences between the monthly (August 2003 minus May 2003) GRACE gravity fields (left) and the corresponding differences of the WGHM model (right) in terms of geoid heights [mm]. Spatial mean as in Fig. 5.

Das Potential der neuen EIGEN-GRACE04S-Schwerefeldlösungen zur Beobachtung von Massenvariationen zeigt sich beispielsweise im Vergleich mit der aus dem *WaterGap Hydrological Model* (WGHM) abgeleiteten Variation des kontinentalen Wasserhaushalts. Da bei der Prozessierung bekannte kurzzeitige Variationen (bedingt durch Ozean- und Erdzeiten sowie Massenverlagerungen in der Atmosphäre und den Ozeanen) bereits korrigiert wurden, sollte die Differenz zweier derart bestimmter monatlicher Schwerefelder mit der Differenz des hydrologischen Signals in guter Näherung übereinstimmen. Abbildung 9 a, b zeigt die Differenzen zwischen zwei monatlichen GRACE-Schwerefeldern und den entsprechenden Differenzen des WGHM-Modells. Man sieht das hohe Maß an räumlicher Übereinstimmung insbesondere in den Gebieten mit einem großen hydrologischen Signal (Amazonas, Kongo, Ob, etc.). Wertet man die ganzen vorhandenen Schwerefeld- und WGHM-Zeitreihen aus, indem man Beckenmittelwerte für alle großen Wasserreservoirs berechnet, zeigt sich,

dass für die meisten Wasserreservoirs im Jahreszyklus die Phasen gut übereinstimmen, GRACE dagegen fast immer größere Amplituden wiedergibt (Abb. 10a, b). Dies könnte in nicht ausreichend modellierten Anteilen (Grundwasser, Schneebedeckung, etc.) im WGHM liegen.

Ein weiteres Potential der GRACE-Mission ist, den Ozeanbodendruck zu bestimmen, der ein Maß für die Tiefseeströmungen ist. Erste Analysen mit EIGEN-GRACE03S (Kanzow et al., 2005) und EIGEN-GRACE04S haben hier schon eine hohe Korrelation, allerdings bisher nur auf großräumigen Skalen, festgestellt (Abb. 11). Da das Ozeanbodendrucksignal im Gegensatz zur kontinentalen Hydrologie eine nur sehr kleine Amplitude hat, wird dessen Bestimmung eine der Herausforderungen bei den künftigen Schwerefeldberechnungen und Auswertungen sein.

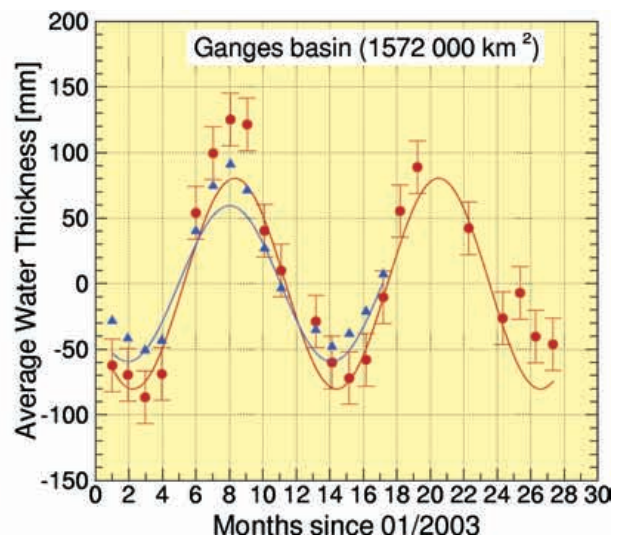
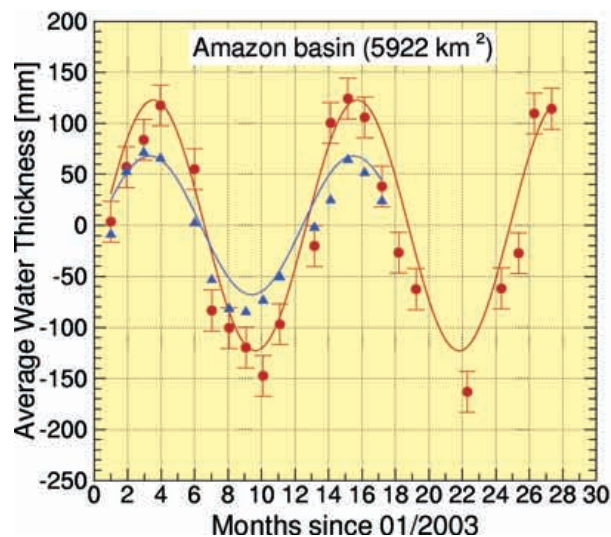


Abb. 10a, b: Zeitserie der Beckenmittelwerte für Amazonas (links) und Ganges (rechts) (in Einheiten äquivalenter Wassersäule in mm).

Time series of mean basin values for Amazon (left) and Ganges (right) (in units of equivalent water column in [mm]).

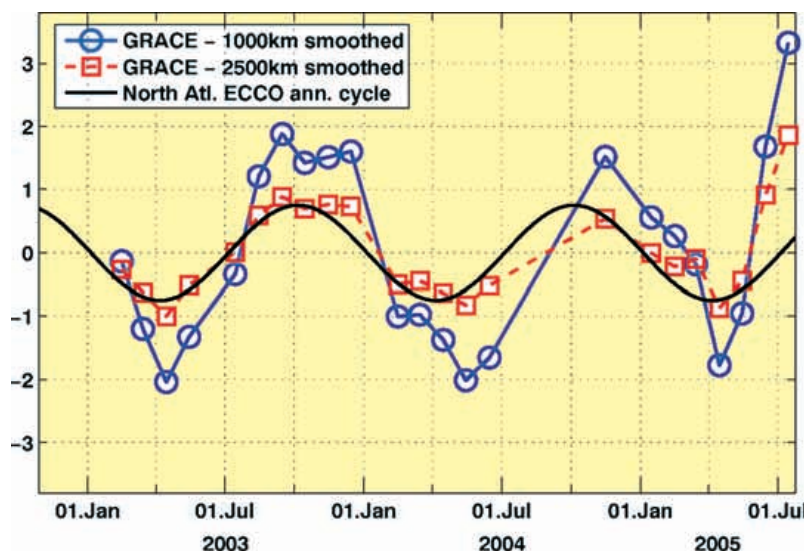


Abb. 11: Zeitserie des aus EIGEN-GRACE04S abgeleiteten Ozeanbottendrucks (in mbar), gemittelt für den Nordatlantik und geglättet mit einem 1000 km- sowie 2500 km-Gauss-Filter, sowie das entsprechende Signal aus dem ECCO-Ozeanmodell.

Time series of ocean bottom pressure derived from EIGEN-GRACE04S data [mbar], averaged for the North Atlantic and smoothed with a 1000 km and a 2500 km Gaussian filter, and the corresponding signal derived from the ECCO ocean model.

Globale und präzise GPS-Atmosphärensondierung

Seit Februar 2001 werden an Bord des CHAMP-Satelliten GPS-Radiokkultationsmessungen aufgezeichnet. Mit dieser innovativen Fernerkundungsmethode können präzise Informationen über die Vertikalstruktur der Erdatmosphäre (Luftdruck, Temperatur und Wasserdampf) im globalen Maßstab abgeleitet werden.

Bis Ende 2005 sind nahezu 400.000 Messungen durchgeführt worden. Dieser in seiner Länge und Qualität weltweit einzigartige Datensatz hat wesentlich zur Weiter-

entwicklung der noch relativ jungen GPS-Fernerkundungsmethode beigetragen. Weiterhin wurde durch eine Vielzahl internationaler Forschungsgruppen mit den vom GFZ Potsdam bereitgestellten Daten Studien zur Verbesserung globaler Wettervorhersagen, zur Untersuchung klimatologischer Veränderungen der Erdatmosphäre und zur Untersuchung unterschiedlichster atmosphärischer Phänomene durchgeführt. Als Beispiel zeigt Abb. 12 die globale Verteilung von Tropopausenparametern, deren Veränderung in direktem Zusammenhang mit klimatischen Veränderungen (Erwärmung, Abkühlung) steht. Das GFZ Potsdam konnte auch die Bereitstellung der CHAMP-Daten mit sehr kurzer Zeitverzögerung (zwei Stunden) zwischen Messung und Verfügbarkeit der atmosphärischen Parameter demonstrieren, eine wesentliche Voraussetzung für die Verbesserung der Wettervorhersage.

Beide GRACE-Satelliten verfügen, analog zu CHAMP, über die Voraussetzungen zur Aufzeichnung von GPS-Radiokkultationsdaten. Erste Messungen wurden Mitte 2004 auf GRACE-B durchgeführt (Abb. 13) und wiesen eine mit CHAMP vergleichbare Qualität auf. Zusammen mit CHAMP wurden mehr als 300 Vertikalprofile täglich gemessen. Verbesserte Charakteristika der Satellitenuhr an Bord von GRACE im Vergleich zu CHAMP führte weiterhin dazu, dass erstmals eine vereinfachende Methode (differenzenlose GPS-Prozessierung) zur Auswertung der GPS-Daten angewendet werden konnte. Durch den Verzicht auf zusätzliche Daten führt dieses Verfahren zu einer deutlichen Reduzierung der Anforderungen an Infrastruktur und Auswertung von GRACE und auch zukünftiger Satellitenmissionen mit GPS-Radiokkultation.

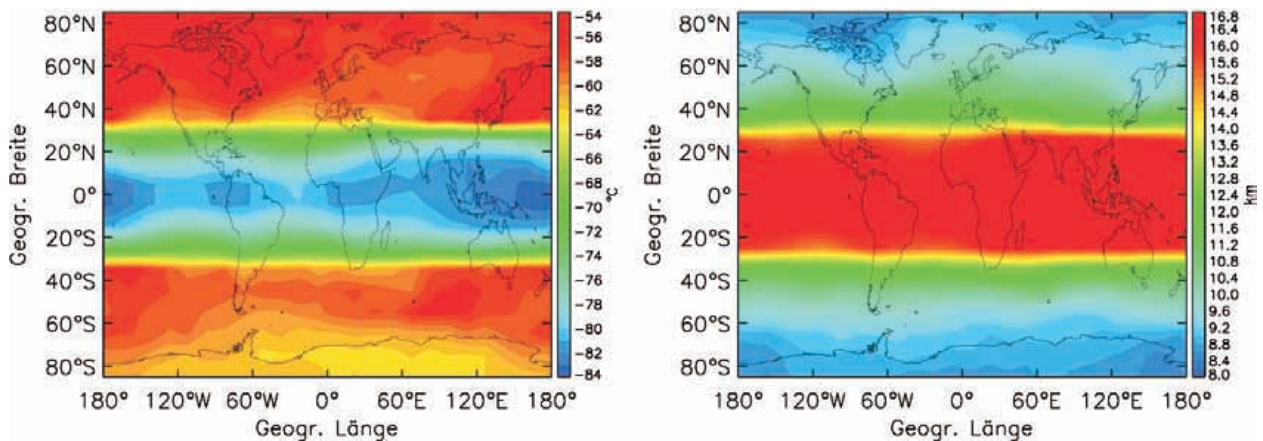


Abb. 12: Mittlere globale Tropopausentemperatur (links) und -höhe (rechts), abgeleitet aus ca. 250.000 CHAMP-Okkultationsmessungen zwischen Mai 2001 und Dezember 2005. Zeitliche Veränderungen dieser Tropopausenparameter sind Indikatoren für Klimaänderungen. Eine globale Erwärmung hat u.a. eine im Mittel größere Tropopausenhöhe (Ausdehnung der Troposphäre) zur Folge.

Mean global tropopause temperatures (left) and height (right), derived from approximately 250,000 CHAMP occultation measurements between May 2001 and December 2005. Temporal variations of these tropopause parameters are indicators for climate change. Global warming leads, among others, to an (on an average) increased tropopause height (expansion of tropopause).

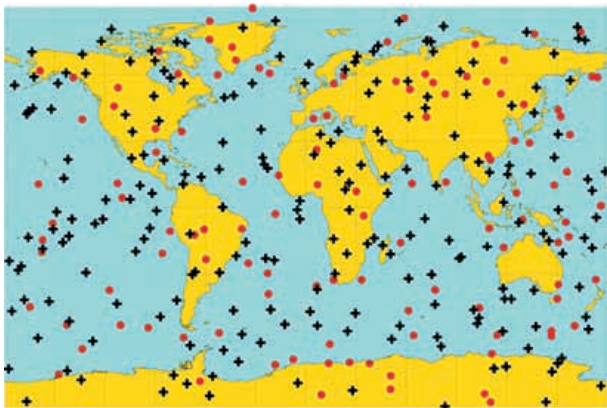


Abb. 13: Geografische Verteilung der ersten GPS-Okkultationsmessungen von GRACE-B (120; rote Punkte) ergänzt durch die Orte der CHAMP-Messungen (218, schwarze Kreuze) zwischen dem 28. (06:00 UTC) und 29. Juli (07:00 UTC) 2004.

Geographic distribution of the first GPS occultation measurements performed by GRACE-B (120; red dots), supplemented by the locations of the CHAMP measurements (218; black crosses) between July 28 (06:00 UTC) and 29 (07:00 UTC) 2004.

Auf CHAMP-Daten basierende hochaufgelöste Magnetfeldmodelle

Ein weiteres Missionsziel von CHAMP ist die hochauflösende Vermessung des geomagnetischen Feldes. Nach einer kontinuierlichen Messphase von über fünf Jahren kann diese Aufgabe mit zunehmender Präzision erfüllt werden. Maßgeblich hierfür ist eine konstruktive Überlagerung von mehreren günstigen Umständen.

Zum einen haben wir eine kontinuierlich länger werdende Datenreihe. Diese erlaubt es, die Feldverteilung immer genauer zu bestimmen. Es nimmt aber nicht nur die Datenmenge zu, sondern auch ihre Qualität. Dies ist zum ei-

nen bedingt durch die abnehmende Bahnhöhe. CHAMP nähert sich immer mehr dem Messobjekt Erde und registriert damit mehr Details. Zum anderen befinden wir uns zurzeit in der abklingenden Phase des solaren Aktivitätszyklus'. Damit nehmen auch die Störungen der Magnetfeldmessungen durch Ströme in der Ionosphäre und Magnetosphäre ab. Diese positive Entwicklung hat dazu geführt, dass CHAMP jetzt Magnetfeldmessungen mit bisher nicht erreichter Auflösung ausführt.

Basierend auf den ausgezeichneten Daten konnten einige bedeutende Ergebnisse erzielt werden. Vor allem seien hier die hochauflösenden Modelle des Erdfeldes erwähnt. Spezielle Anstrengungen wurden in die kontinuierliche Weiterentwicklung der Modellreihe „Potsdam Magnetic Model of the Earth“ (POMME) investiert. Die aktuelle Version des Modells, POMME 2, ist mit einem vergleichsweise großen Gewicht (50 %) in das von der IAGA herausgegebene „International Geomagnetic Reference Field“ (IGRF-2005) eingeflossen (Maus et al., 2005).

Wesentliche Verbesserungen in der Beschreibung des magnetischen Hauptfeldes waren möglich, nachdem ein neuer Ansatz für die Charakterisierung der äußeren Magnetfelder eingeführt wurde. Die wesentliche Änderung gegenüber früheren Ansätzen besteht darin, dass die parasitären, äußeren Felder nicht mehr im erdfesten System betrachtet werden, sondern in einem Koordinatensystem, das der Geometrie der magnetosphärischen Ströme angepasst ist. In diesem durch die Wechselwirkung von Sonnenwind und Erdmagnetfeld festgelegten Rahmen lassen sich die Effekte der Ströme mit wenigen Koeffizienten viel genauer beschreiben (Maus und Lühr, 2005).

Unter Berücksichtigung aller bekannten magnetischen Störeinflüsse, ionosphärischen Effekte, magnetosphärischen Ströme, Induktion im Erdinneren, magnetischen Signaturen der Ozeanströmung, wurde das Modell

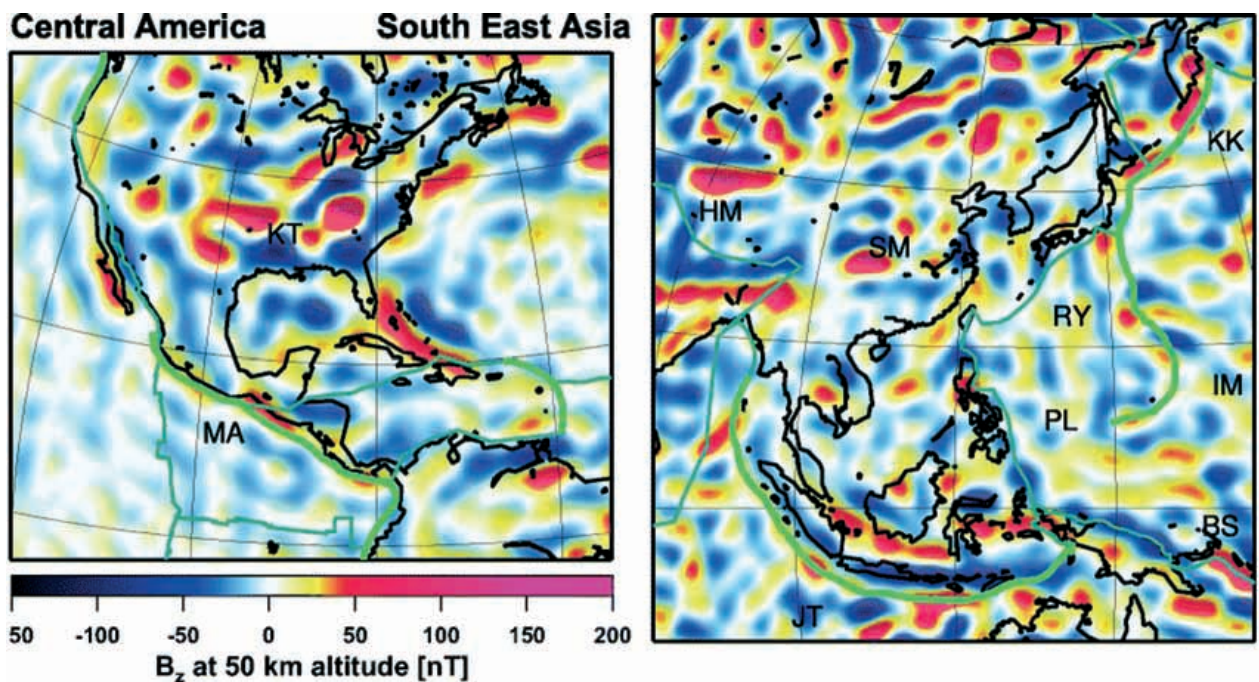


Abb. 14: Zwei Ausschnitte aus der Karte der Krustenmagnetisierung von CHAMP. Bei der erzielten Auflösung werden über die magnetischen Signaturen großräumige geologische Strukturen sichtbar. Im amerikanischen Sektor ist z. B. das Eisenerzlager von Kentucky (KT) besonders herausragend. Auch der Unterschied zwischen dem magnetisierten Kontinentalschild und dem strukturlosen Ozeanboden wird deutlich. In der rechten Bildhälfte ist zu erkennen, wie magnetische Anomalien tektonische Grenzen nachzeichnen. Dies wird besonders deutlich entlang des Java-Grabens. Negative Abweichungen, Feldabschwächungen, (blaue Flächen) deuten auf erhöhte Temperaturen im Untergrund, rote dagegen auf eine dicke kühle Kruste (Quelle: Maus et al., 2006, *Geophys. J. Int.*).

Two detail maps of the crustal magnetisation, as derived from CHAMP. At this resolution the magnetic signatures can be related to large-scale geological feature. In the American sector the Kentucky iron ore deposit (KT) is particularly outstanding. Furthermore, here the contrast becomes quite clear between the magnetized continental shield and the featureless ocean bottom. In the right frame, showing the Indonesian region, we can see how magnetic anomalies mark the active tectonic zones (green lines). This is particularly evident along the Java trench. Negative deviations (blue patches) representing a weakening of the field, suggest an enhanced temperature of the crust. Red patches indicate a thick and cool crust (from Maus et al., 2005, *Geophys. J. Int.*).

POMME 2.5 entwickelt. Dieses bietet eine Auflösung bis zu Kugelfunktionsgraden 90, was einer räumlichen Auflösung von etwa 220 km (halbe Wellenlänge) entspricht (Maus et al., 2006). Bei der augenblicklichen Flughöhe von CHAMP (~350 km) ist eine Steigerung kaum möglich. Eine Kartierung der magnetischen Signaturen basierend auf POMME 2.5 zeigt eine Reihe von deutlichen Strukturen, die sich geologisch/tektonisch interpretieren lassen. Im rechten Teil der Abb. 14 erkennt man ganz deutlich, wie magnetische Signaturen die bedeutenden geologischen Provinzen markieren. Auch der Ozean-Kontinent-Kontrast wird hier deutlich (wenige Strukturen in den tiefen Ozeanbecken). Im rechten Teil sind es mehr die tektonisch aktiven Gebiete in der Umgebung von Indonesien, die von magnetischen Signaturen markiert werden. Besonders deutlich ist das Feldstärkedefizit entlang des Java-Grabens.

Die Darstellung weiterer Forschungsergebnisse, die auf CHAMP-Magnetfeldmessungen beruhen und sich im Wesentlichen auf die äußeren Felder und das magnetische Wetter beziehen, sind im Beitrag des Dep. 2 in diesem Bericht zu finden. Basierend auf den bisherigen Erfahrungen mit CHAMP und der erwarteten Entwicklung der

solaren Aktivität können wir davon ausgehen, dass die interessantesten Messungen für das Magnetfeld noch vor uns liegen.

Ausblick

Die bisher berechneten GRACE-Schwerefelder haben bereits einen bemerkenswert hohen Qualitätsgrad und werden von der geowissenschaftlichen Nutzergemeinschaft bereits intensiv verwendet. Dies zeigt sich insbesondere auch an der großen Anzahl von Publikationen und Fachvorträgen auf internationalen Konferenzen. Trotzdem gibt es noch weiteres Verbesserungspotential, um insbesondere die vor dem Start vorhergesagte Genauigkeit zu erreichen. Daher werden weitere Untersuchungen folgen, die teilweise innerhalb der zweiten Phase des vom BMBF geförderten Geotechnologien-Programms „Erfassung des Systems Erde aus dem Weltraum“ bearbeitet werden. Diese werden sich mit der optimalen Parametrisierung der Instrumentendaten, der Verbesserung der Modellierung kurzperiodischer Massenvariationen in Atmosphäre und Ozeanen oder der Berücksichtigung bisher nicht-modellierter Effekte wie der post-glazialen Hebung oder täglicher hydrologischer Signale beschäftigen.

Der bisher günstige Treibstoffverbrauch, die geringe Düsenaktivität sowie der Verlauf der Sonnenaktivität machen einen Weiterbetrieb der GRACE-Mission bis mindestens 2010 sehr wahrscheinlich. Die dabei abnehmende Bahnhöhe und damit steigende Sensitivität dieser Tandem-Mission sowie der ab Frühjahr 2006 geplante permanente Betrieb der Radiookkultationsmessungen auf beiden Satelliten werden weiter zum Erfolg der Mission beitragen.

Hingegen wird die CHAMP-Mission, wenn die Bahn nicht noch einmal angehoben wird, leider im Frühjahr 2008 mit dem Wiedereintritt in die Erdatmosphäre beendet sein. Bis dahin sollten aber noch weitere, für die Schwerfeldbestimmung wichtige Messdaten in niedriger Flughöhe gewonnen werden. Durch die Abnahme der solaren Aktivität kann man auch davon ausgehen, dass CHAMP noch viele interessanteste Messungen zur Bestimmung und Überwachung des Magnetfeldes liefern wird.

Die herausragenden Ergebnisse insbesondere der GRACE-Mission waren Anlass für ein Schwerpunktprogramm „*Massenvariationen und Massentransporte im System Erde*“, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft bereits bewilligt wurde und das ab Juli 2007 über sechs Jahre läuft. Hier sollen Wechselbeziehungen und Austauschmechanismen zwischen Atmosphäre, Ozeanen, Eiskappen, kontinentalen Wasserspeichern und fester Erde in einem integrierten, interdisziplinären Lösungsansatz aus den Schwerfeld- (CHAMP, GRACE, GOCE) und Altimetriemissionen (Envisat, Jason) gewonnen werden.

Literatur

- Beyerle, G., T. Schmidt, G. Michalak, S. Heise, J. Wickert, and Ch. Reigber (2005) GPS radio occultation with GRACE: Atmospheric Profiling utilizing the zero difference technique, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L13806, doi: 10.1029/2005GL023109.
- Kanzow, T., F. Flechtner, A. Chave, P. Schwintzer, R. Schmidt and U. Send (2005) Seasonal variation of ocean bottom pressure derived from GRACE: Local validation and global patterns, *Geophys. Res. Lett.*, 110, C09001, doi: 10.1029/2004JC002772.
- Maus, S. and H. Lühr (2005) Signature of the quiet-time magnetospheric magnetic field and its electromagnetic induction, *Geophys. J. Int.*, doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02691.x.
- Maus, S., S. McLean, D. Dater, H. Lühr, M. Rother, W. Mai, and S. Choi (2005) NGDC/GFZ candidate models for the 10th generation of IGRF, *Earth Planets Space*, 57, 1151-1156.
- Maus, S., M. Rother, K. Hemant, C. Stolle, H. Lühr, A. Kuvshinov, and N. Olsen (2006) Earth's lithospheric magnetic field determined to spherical harmonic degree 90 from CHAMP satellite measurements, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02833.x.
- Reigber, Ch., Schmidt, R. Flechtner, F., König, R., Meyer, Ul., Neumayer, K.H., Schwintzer, P., Zhu, S.Y. (2005) An Earth gravity field model complete to degree and order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE02S, *J. Geodynamics*, 39, 1-10, doi: 10.1016/j.jog.2004.07.001.
- Schmidt, R., Schwintzer, P., Flechtner, F., Reigber, Ch., Güntner, A., Döll, P., Ramillien, G., Cazenave, A., Petrovic, S., Jochmann, H., Wunsch, J. (2005): GRACE observations of changes in continental water storage, *Global and Planetary Change* (im Druck).
- Schmidt, T., S. Heise, J. Wickert, G. Beyerle, and Ch. Reigber (2005) GPS radio occultation with CHAMP and SAC-C: global monitoring of thermal tropopause parameters, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 1473-1488.
- Wickert, J., G. Beyerle, R. König, S. Heise, L. Grunwaldt, G. Michalak, Ch. Reigber, T. Schmidt (2005) GPS radio occultation with CHAMP and GRACE: A first look at a new and promising satellite configuration for global atmospheric sounding, *Annales Geophysicae*, 23, 653-658.
- Wickert, J., T. Schmidt, G. Beyerle, R. König, Ch. Reigber, and N. Jakowski (2004) The radio occultation experiment aboard CHAMP: Operational data analysis and validation of vertical atmospheric profiles, *J. Met. Soc. Japan*, Special issue 'Application of GPS Remote Sensing to Meteorology and Related Fields', 82(1B), 381-395.