

## Bestimmung von Schwerefeldlösungen aus der Satellitenmission GRACE am Institut für Geodäsie der Technischen Universität Graz

### Determination of GRACE Gravity Field Solutions at the Institute of Geodesy at Graz University of Technology



*Torsten Mayer-Gürr, Saniya Behzadpour, Matthias Ellmer, Beate Klinger, Andreas Kvas, Sebastian Strasser und Norbert Zehentner, Graz*

#### Kurzfassung

Das Schwerefeld der Erde und seine zeitliche Änderung stellen wichtige Beobachtungsgrößen in der Erforschung des dynamischen Systems Erde dar. Die Satellitenmission GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) wurden entwickelt, um ebendiese zeitlichen Variationen und den langwelligen Anteil des Erdschwerefeldes erstmals mit globaler Überdeckung hochgenau zu erfassen. Das Institut für Geodäsie an der Technischen Universität Graz prozessiert die Rohdaten der GRACE-Mission und stellt monatliche, tägliche und statische Schwerefeldlösungen für die wissenschaftliche Gemeinschaft zur Verfügung. Die in Graz berechneten Schwerefeldmodelle wurden unter anderem im Rahmen der Climate Change Initiative (CCI) der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) verwendet, um Massenbilanzen der Eisschilde von Grönland und der Antarktis zu bestimmen. Als Teil der Gravity Observation Combination (GOCO) Initiative steuert Graz hochauflösende GRACE-Modelle für die Kombination mit weiteren Schwerefeldmissionen wie GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) und terrestrischen Daten bei. Tägliche Lösungen aus Graz werden zum Beispiel in der Erforschung großer Hochwasserereignisse verwendet.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Prozessierungskette der GRACE-Schwerefeldbestimmung, beginnend bei der Datenvorprozessierung, über die Bestimmung von kinematischen Satellitenorbits aus GPS Beobachtungen sowie der Verbesserung der gemessenen Satellitenorientierung durch Sensor-Fusion, bis zur Schätzung der Schwerefeldparameter nach kleinsten Quadraten. Das funktionale Modell zwischen der Hauptbeobachtung von GRACE – hochgenaue Relativgeschwindigkeiten – und dem unbekanntem Schwerefeld sowie die Bestimmung des stochastischen Modells der Satellitenbeobachtungen werden erläutert. Abschließend werden Anwendungsbeispiele der in Graz erstellten GRACE-Produkte gezeigt.

**Schlüsselwörter:** GRACE, Zeitvariables Schwerefeld, Satellitendaten

#### Abstract

The gravity field and its variations in time are important observables for the understanding of Earth's dynamic system. The twin satellites of the GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) mission have been designed to measure such temporal variations as well as the long-wavelength part of Earth's gravity field with unprecedented accuracy on a global scale. The Institute of Geodesy at Graz University of Technology produces monthly, daily, and static gravity field solutions from raw observations of the GRACE mission for the scientific community. GRACE gravity fields derived in Graz have been used within the framework of the Climate Change Initiative (CCI) of the European Space Agency (ESA). As part of the Gravity Observation Combination (GOCO) initiative, Graz produces high-resolution static gravity fields from GRACE for combination with other satellite gravity missions such as GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) and terrestrial data. Daily solutions computed in Graz are for example used to study large flood events.

This contribution gives an overview of the processing chain for GRACE gravity field recovery employed at Graz University of Technology. It comprises data preprocessing, determination of kinematic orbit positions from GPS observation, improvement of the measured satellite attitude, and the estimation of the gravity field parameters using a least squares adjustment. The functional model between the main observable – highly accurate relative velocities between the satellites – and the unknown gravity field is exemplified and an approach for the determination of the stochastic characteristics of the satellite observations is shown. To conclude, we present some applications for the GRACE gravity fields computed in Graz.

**Keywords:** GRACE, Time variable gravity field, Satellite data

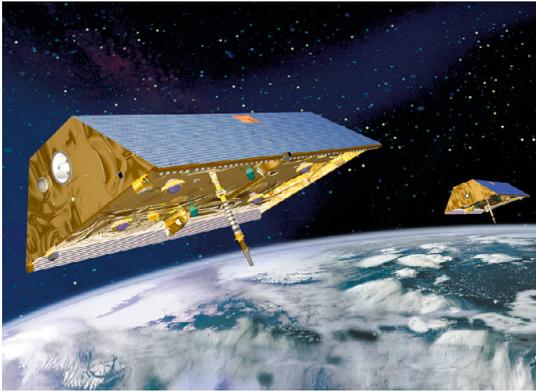


Abb. 1: Illustration der GRACE Satelliten im Orbit (Quelle: NASA)

## 1. Einleitung

Die Satellitenmission GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) lieferte seit 2002 Daten zur präzisen Bestimmung des statischen und zeitvariablen Schwerefeldes der Erde [1]. Obwohl nur für 5 Jahre geplant, endete die Mission erst nach mehr als 15 Jahren im Jahr 2017. Die Nachfolge mission GRACE-FO (Follow On) wurde am 22. Mai 2018 erfolgreich gestartet.

Sowohl die GRACE-Mission als auch die GRACE-FO-Mission bestehen aus zwei Satelliten, die in einem Abstand von ca. 250 km auf der gleichen Bahn hintereinander herfliegen (vgl. Abbildung 1). Der Abstand wird präzise mit einem Mikrowelleninstrument im K-Band-Bereich mit einer Genauigkeit von wenigen Mikrometern gemessen. Durch die räumlich variierende Masseverteilung der Erde und die damit einhergehende unterschiedliche Gravitationskraft werden die Satelliten an jedem Punkt der Bahn unterschiedlich beschleunigt. Dadurch ändert sich der Abstand der Satelliten ständig ein wenig. Die hochgenaue Messung dieser Abstandsänderung ermöglicht daher Rückschlüsse auf das Gravitationsfeld und damit Massenvariationen im dynamischen System Erde. Die Hauptverursacher dieser Massenvariationen sind klimarelevante geophysikalische und anthropogene Prozesse, wie Änderungen in der kontinentalen Hydrologie, Änderungen der Kryosphäre, und großräumige Fluktuationen im Ozean und der Atmosphäre. Bekannte Beispiele hierfür sind die Grundwasserentnahme in Nordindien, das Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes oder auch hydrologische Extremereignisse wie das Donauhochwasser 2006. Die enorme Bedeutung der GRACE-Mission für die Klimaforschung wird durch über 3000 GRACE-bezogene Publikationen

und mehrere Beiträge zum IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Sachstandsbericht unterstrichen.

Neben den offiziellen Analysezentren der GRACE-Mission – dem „Center for Space Research (CSR)“, dem „Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ)“ und dem „Jet Propulsion Laboratory (JPL)“ – gibt es eine Reihe weiterer universitärer und außeruniversitärer Forschungseinrichtungen, welche die Daten der GRACE-Mission auswerten. Das Institut für Geodäsie der Technischen Universität Graz ist seit einigen Jahren eine dieser Einrichtungen und berechnet monatliche und tägliche Schwerefelder sowie hochaufgelöste statische Schwerefelder. Alle Daten sind frei verfügbar und können über die Homepage des Instituts (<http://ifg.tugraz.at>) heruntergeladen werden.

Für die Bestimmung dieser Schwerefeldlösungen sind hocheffiziente und zugeschnittene Algorithmen notwendig. Dies liegt zum einem an der großen Anzahl von Messungen und der Menge der daraus zu bestimmenden Schwerefeldkoeffizienten, zum anderen ist das Zusammenspiel der Instrumente sehr komplex und eine Vielzahl von internen und externen Einflüssen müssen modelliert werden. Dieser Artikel soll ein Überblick über die einzelnen Prozessierungsschritte von der Aufbereitung der Daten bis zur endgültigen Lösung am Institut für Geodäsie geben.

## 2. Prozessierungskette am Institut für Geodäsie

### 2.1 Aufbereitung der Instrumentendaten

Um hochgenaue Informationen über das Schwerefeld der Erde zu erfassen wurden die GRACE-Satelliten unter anderem mit Instrumenten zur Bestimmung ihrer absoluten Position, ihrer Orientierung im Raum sowie der relativen Distanz ausgestattet. Zusätzlich wurden nicht-konservative Kräfte wie Atmosphärenreibung, Strahlungsdruck der Sonne und der Erdalbedo durch Akzelerometer im Massenzentrum der Satelliten gemessen. Diese Messungen sind notwendig, um die Auswirkungen dieser Störkräfte vom Schwerefeldsignal zu trennen. Primär werden folgende Instrumente zur Schwerefeldbestimmung verwendet:

- K-Band-Mikrowelleninstrument (KBR): Misst die Abstandsänderungen der beiden Satelliten mit einer Genauigkeit unter einem Mikrometer pro Sekunde.
- Akzelerometer (ACC): Dies sind dreiachsige Beschleunigungsmesser im Massenzentrum der

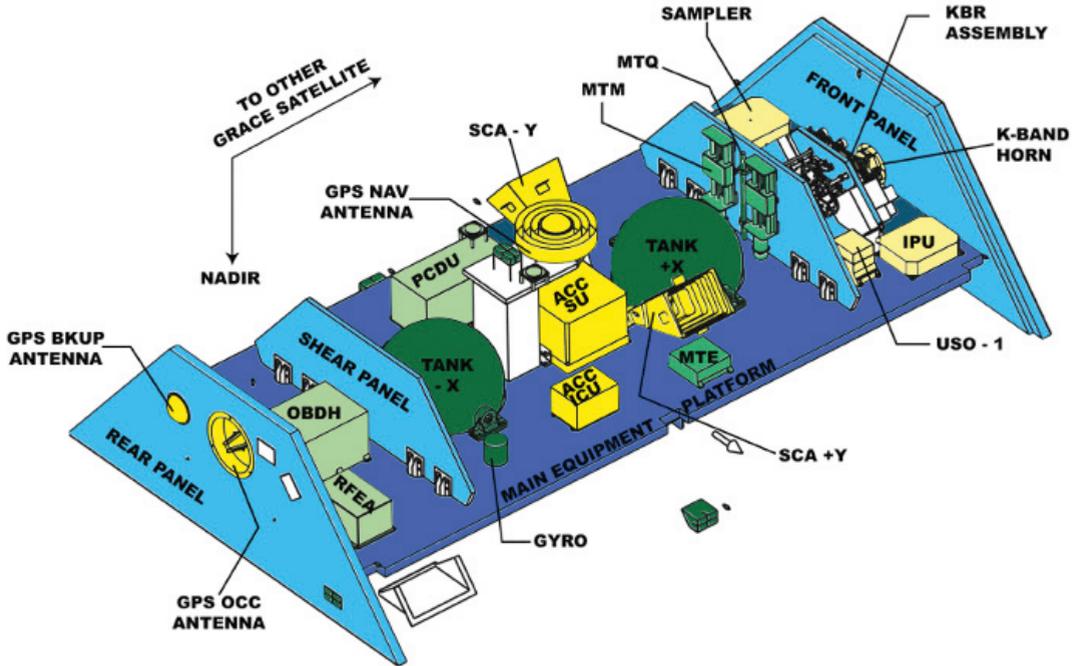


Abb. 2: Schematische Darstellung des Aufbaus eines GRACE Satelliten (Quelle: GRACE Launch Press Kit, [https://www.jpl.nasa.gov/news/press\\_kits/gracelaunch.pdf](https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/gracelaunch.pdf))

Satelliten zur Bestimmung der nicht-gravitativen Kräfte. Sie messen zusätzlich Winkelbeschleunigungen um alle drei Drehachsen.

- Sternenkamerasystem (SCA): Bestimmt die Orientierung der Satelliten im Raum, indem mit CCD-Kameras aufgenommene Sternbilder mit intern gespeicherten Sternkarten verglichen werden.
- GPS-Empfänger (GPS): Mit Hilfe von Code- und Phasenmessungen zu den hochfliegenden GPS-Satelliten kann die Position der GRACE-Satelliten bestimmt werden.

Die Anordnung der einzelnen Komponenten im Satellitenkörper findet sich in Abbildung 2. Alle am Satelliten aufgezeichneten Messwerte wurden bei Überflügen der Empfangsstation des GFZ in Ny-Alesund heruntergeladen und vom JPL als sogenannte L1B-Datenprodukte öffentlich zur Verfügung gestellt. Um daraus Schwerfelder abzuleiten sind allerdings noch weitere Vorverarbeitungsschritte notwendig.

In einem ersten Schritt werden alle benötigten Daten zeitlich synchronisiert und grobe Ausreißer eliminiert. Zusätzlich werden Epochen um bestimmte Ereignisse, wie zum Beispiel Orbitmanö-

ver, von der weiteren Prozessierung ausgeschlossen.

Die Messungen des GPS-Empfängers (Code- und Phasenmessungen auf den beiden Frequenzen L1 und L2) werden verwendet um die Positionen der Satelliten zu bestimmen. Dabei wird das Verfahren des „Precise Point Positioning (PPP)“ angewendet, da es naturgemäß im Weltraum keine Referenzstationen gibt. Hierbei wird die Bahn kinematisch, das heißt ohne Verwendung von Kräftenmodellen, bestimmt. Das Ergebnis ist eine Zeitreihe von rein geometrisch abgeleiteten Absolutpositionen beider Satelliten, welche als Beobachtungen in die Schwerfeldbestimmung eingeführt werden. Um die Genauigkeit der Orbits zu erhöhen wurden neben Position, Empfängeruhrenfehler und Ionosphärenparametern auch Phasenzentrumsvariationen der Antennen beider Satelliten für alle beobachteten Signale bestimmt [2] [3]. Beispielhaft sind diese für GRACE A in Abbildung 3 dargestellt.

Wie zu erkennen ist, sind die Antennen-zentrumsvariationen im Zentimeterbereich für Phasenbeobachtungen und im Dezimeterbereich für Codebeobachtungen. Um also hochgenaue Positionsbestimmung zu betreiben, müssen diese

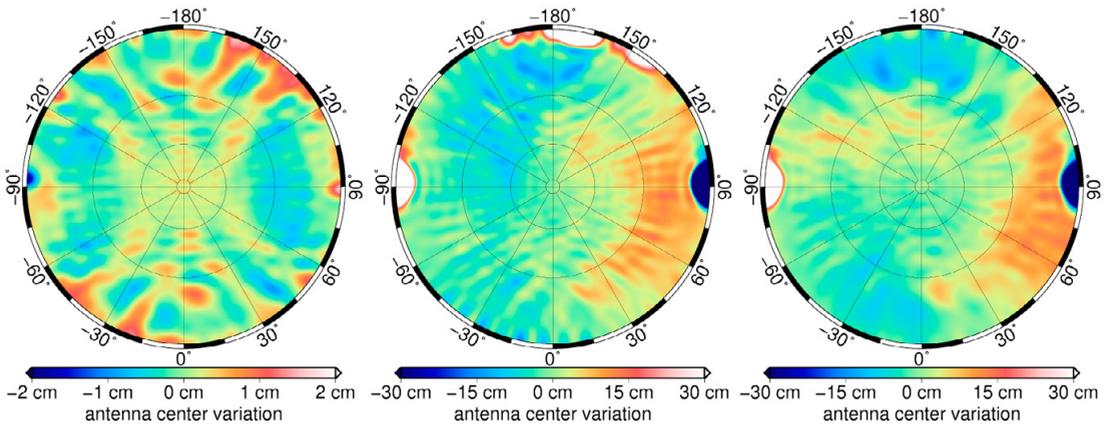


Abb. 3: Antennenzentrumsvariationen für L1/L2 Phasennmessungen (links), P1 Codemessungen (mitte) und P2 Codemessungen für die Hauptantenne auf GRACE-A

Systematiken unbedingt berücksichtigt werden. Vergleiche mit dynamischen Orbits, welche ein vollständiges Kräftemodell enthalten, zeigen eine Genauigkeit der bestimmten Positionen im Bereich von wenigen Zentimetern.

In [4] wurde gezeigt, dass die Qualität GRA-CE-basierter Schwerefeldlösungen durch ein verbessertes Orientierungsprodukt gesteigert werden kann. Dieses Produkt ist das Ergebnis eines Sensor-Fusion-Algorithmus, welcher Informationen aus zwei verschiedenen Messsystemen kombiniert: Zum einen die von den Sternenkameras beobachteten absoluten Orientierungen, welche im langwelligen Bereich sehr stabil sind, und zum anderen die vom Beschleunigungsmesser der Satelliten bestimmten Winkelbeschleunigungen, welche im kurzwelligen Bereich präziser sind. Diese Beobachtungen werden durch einen gewichteten Ausgleich nach kleinsten Quadraten kombiniert, welcher im gesamten Frequenzband optimale Orientierungsparameter liefert. Eine

solche Sensor-Fusion wird unabhängig für beide Satelliten durchgeführt. Abbildung 4 zeigt die Auswirkung der Sensor-Fusion auf die Satellitenorientierung als Leistungsdichtespektrum der Pitch-Komponente.

Wie zu erkennen ist, stützen die Akzelerometerbeobachtungen die Sternenkamerasbeobachtungen im Frequenzband ab 4 Millihertz, was zu einer deutlichen Reduzierung des Rauschens gegenüber den unkombinierten Messungen führt. Da die Orientierung der Satelliten benötigt wird, um die Antennenzentren des K-Band-Mikrowellensystems in die Verbindungslinie der Massenzentren zu projizieren, hat die verbesserte Orientierung auch direkte Auswirkungen auf die Qualität der Messungen der Relativgeschwindigkeit beider Satelliten.

2.2 Referenzorbit

Das Gravitationsfeld wird aus den Messungen im Rahmen eines Ausgleichs nach kleinsten Quadraten bestimmt. Der funktionale Zusammenhang zwischen den Messungen und dem unbekanntem Gravitationsfeld – die Beobachtungsgleichungen – ist nicht linear und muss daher linearisiert werden. Die hierfür benötigten Näherungswerte werden aus Referenzbahnen der Satelliten berechnet.

Aus der Newtonschen Bewegungsgleichung (Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung)

$$F=ma,$$

werden aus bekannten Kräften, die auf den Satelliten wirken, durch zweimalige Integration diese Referenzbahnen berechnet. Dabei müssen für eine höchstmögliche Genauigkeit alle bekannten Einflüsse modelliert werden. Für die Lösungen an

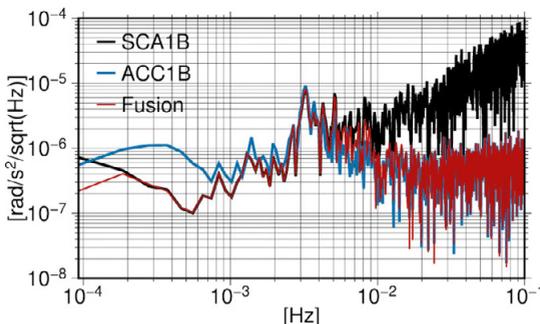


Abb. 4: Winkelbeschleunigungen um die Pitch-Achse von GRACE-A, aus Sternenkamera (schwarz), Akzelerometer (blau) und Sensor-Fusion Ansatz (rot)

der TU Graz werden zurzeit folgenden Modelle verwendet:

- Statisches Schwerefeld der Erde (GOCO05s, [5])
- Jährliche Variationen und langfristiger Trend des Schwerefeldes (GOCO05s, [5])
- Direkte Gezeitenkräfte von Sonne, Mond und Planeten (JPL DE401)
- Gezeiten der festen Erde (IERS 2010, [6])
- Ozeangezeiten (EOT11a, [7])
- Atmosphärengezeiten [8]
- Weitere Massenbewegungen in der Atmosphäre und im Ozean (AOD1B, [9])
- Polgezeiten: Massenverlagerungen in der Erde aufgrund von Schwankungen in der Erdrotation und damit verbundene Änderung der Zentrifugalkraft (IERS 2010)
- Ozeanpolgezeiten: wie oben nur bezogen auf Ozeanwassermassen [10]
- Nicht-gravitative Kräfte wie Restreibung der Atmosphäre, Strahlungsdruck der Sonne und Erdalbedo. Diese Kräfte werden nicht modelliert, sondern direkt mit Hilfe der Beschleunigungsmesser an Bord der Satelliten gemessen
- Relativistische Effekte: Abweichungen in der Theorie der Newtonschen Mechanik zur allgemeinen Relativitätstheorie [6]

Die Daten der Beschleunigungsmesser enthalten noch unbekannte Skalierungsfaktoren und zeitvariable Abweichungen (Bias und Drift), die später im Ausgleich als unbekannte Parameter mitgeschätzt werden müssen. Neben den Hintergrundmodellen ist die numerische Integration der Kräftefunktion entscheidend für die Qualität des Referenzorbits. Um numerische Fehler zu minimieren wurde ein neues Verfahren entwickelt, welches es erlaubt die Satellitenbahn am Niveau der Maschinengenauigkeit zu integrieren [11].

### 2.3 Ausgleich

Um aus den gemessenen Relativgeschwindigkeiten und den Positionen der kinematischen Bahnbestimmung ein Schwerefeld zu berechnen wird ein linearisiertes Gleichungssystem aufgestellt, das die Beobachtungen mit den unbekanntem Schwerefeldkoeffizienten verknüpft. Die Messungen werden dazu in einem Beobachtungsvektor  $l$  zusammengefasst und die Koeffizientenmatrix  $A$  ergibt sich aus den Ableitungen des Kräftemodells des Referenzorbits nach den unbekanntem Schwerefeldkoeffizienten. Aufgrund der Linearisierung

werden die Beobachtungen um Werte aus den gerechneten Referenzorbits reduziert. Schließlich wird das überbestimmte Gleichungssystem nach der Methode der kleinsten Quadrate (z.B. [11]) gelöst.

In einer GRACE-Monatslösung werden ca. 500.000 gemessene Relativgeschwindigkeiten und 9.000 Orbitpositionen als Beobachtungen verwendet. Der Parametervektor  $x$  enthält ungefähr 14.600 Schwerefeldparameter als Koeffizienten einer Kugelfunktionsreihe sowie ca. 2.500 zusätzliche Kalibrierungsparameter. Diese umfassen den Satellitenzustand (Startposition und Geschwindigkeit pro Tag), Akzelerometerskalierungsfaktoren und -offsets, sowie Antennenzen-trumskorrekturen.

Die Koeffizientenmatrix  $A$  des resultierenden Gleichungssystems hat eine Größe von ca. 70 GB und übersteigt damit die Arbeitsspeicherkapazitäten normaler Arbeitsplatzcomputer. Um das ganze System in annehmbarer Zeit lösen zu können ist am Institut eine Software entwickelt worden, die das Gleichungssystem parallel auf mehreren Prozessoren löst.

### 2.4 Stochastisches Modell

Für eine genaue Bestimmung des Schwerefeldes ist die relative Gewichtung der Beobachtungen, dargestellt durch die Gewichtsmatrix  $P$ , sehr wichtig. Da die hierfür benötigten Messgenauigkeiten der Instrumente nicht genau genug bekannt sind und sich diese auch im Laufe der Zeit ändern, wurde ein automatisiertes, iteratives Verfahren basierend auf der Varianzkomponentenschätzung (z.B. [11]) entwickelt. Die Kovarianzmatrix der Beobachtungen wird dabei für jeden Monat als stationärer Prozess angesetzt und lässt sich folglich durch dessen spektrale Leistungsdichte beschreiben. Die Energie in den einzelnen Frequenzen werden dann als Varianzkomponenten im Ausgleich mitgeschätzt. In der Regel konvergiert das Verfahren nach drei bis vier Schritten, auch wenn als Startwert weißes Rauschen angenommen wird. In Abbildung 5 wird das Ergebnis der Varianzkomponentenschätzung eines Monats für die Beobachtungsgröße „Relativgeschwindigkeiten“ gezeigt.

Deutlich zu erkennen ist das durch die Integration der Akzelerometerbeobachtungen entstehende, zur Frequenz  $f$  invers-proportionale Rauschverhalten im langwelligen Spektrum, sowie das durch die Differentiation des relativen Abstands zu  $f$  proportionale Rauschen im hochfrequenten

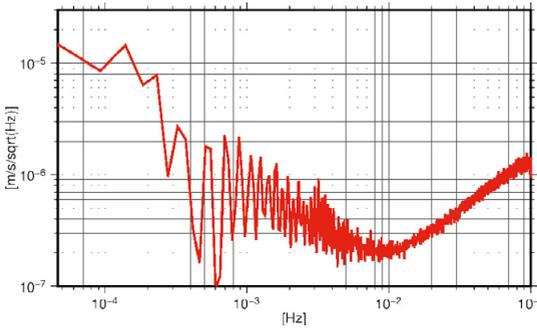


Abb. 5: Leistungsdichtespektrum der Relativgeschwindigkeiten für Mai 2008

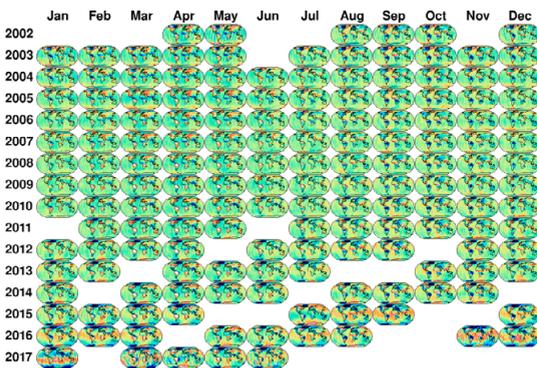


Abb. 6: Mosaik aller GRACE Monatslösungen

Bereich. Zusätzlich sind Vielfache der Orbitperiode von ca. 5.400 Sekunden zu erkennen, die auf zeitlich hochfrequente geophysikalische Prozesse zurückzuführen sind. Durch die Bestimmung des stochastischen Modells aller Beobachtungsgruppen lassen sich diese nicht nur einfach kombinieren, es entsteht dadurch auch eine realistische geschätzte Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Parameter. Diese realistischen „formalen Fehler“ sind zurzeit ein Alleinstellungsmerkmal der Lösungen aus Graz und erlauben einfache Kombination mit komplementären Daten.

### 3. Ausgewählte Ergebnisse

Für den gesamten Zeitraum der GRACE-Mission von 2002 bis 2017 konnten 161 unabhängige Monatslösungen bestimmt werden. Bis Ende 2010 ist diese Zeitreihe nahezu vollständig, danach machte sich das Alter der Satelliten, insbesondere der Batterien, bemerkbar und es entstanden regelmäßig Zeiträume ohne ausreichend Messungen (vgl. Abbildung 6).

Die abgeleiteten Monatslösungen wurden u.a. im Rahmen der ESA Climate Change Initiative (CCI)

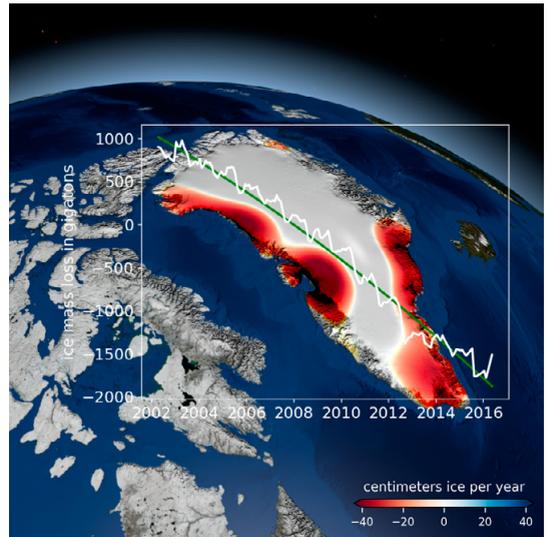


Abb. 7: Massenbilanz des Grönländischen Eisschildes über den GRACE Zeitraum

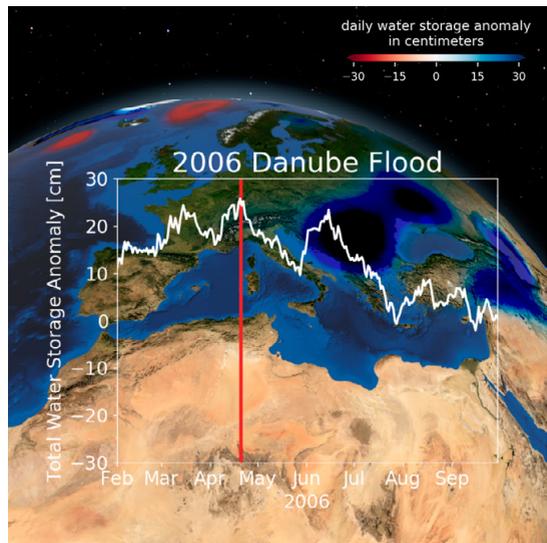


Abb. 8: Zeitreihe der täglichen GRACE Lösungen während des Donauhochwassers 2006

verwendet, um Massenbilanzen des Eisschildes in der Antarktis und in Grönland (siehe Abbildung 7), zu bestimmen [12].

Neben den Monatslösungen veröffentlicht das Institut für Geodäsie auch tägliche Schwerefeldvariationen, die zum Beispiel zur Untersuchung von Hochwasserereignissen herangezogen werden (z.B. [13], schematische Darstellung in Abbildung 8).

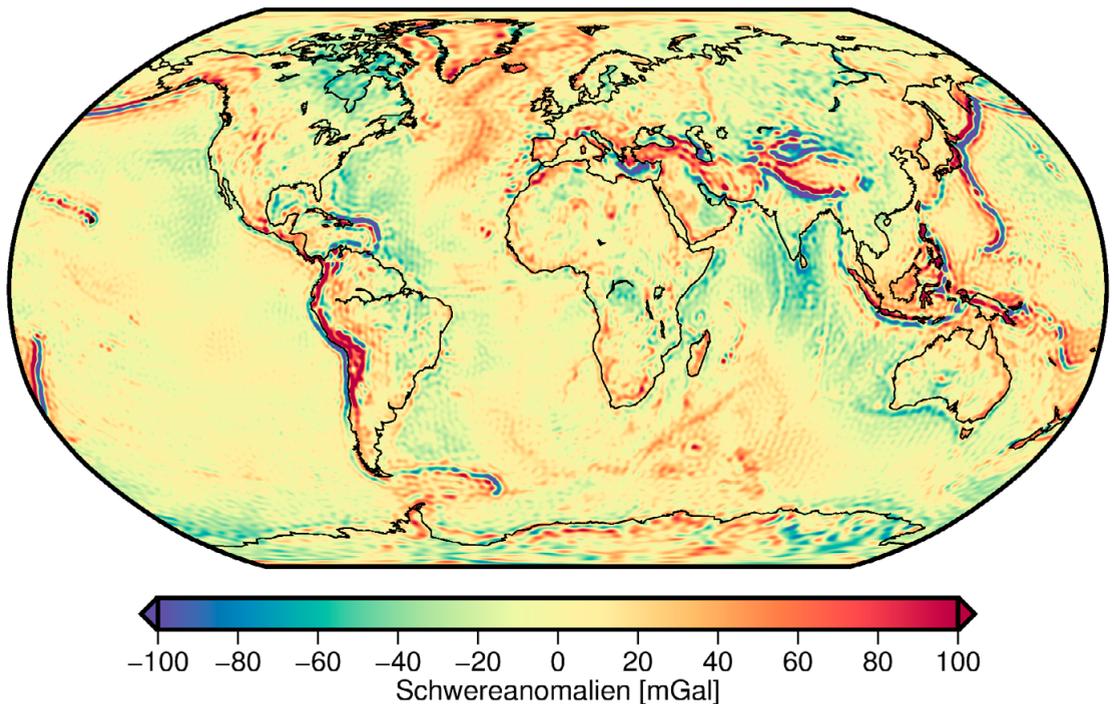


Abb. 9: Schwereanomalien aus dem hochauflösenden statischen Feld ITSG-Grace2014s

Ein hochauflösendes statisches GRACE-Schwerefeld ITSG-Grace2014s [14] wurde in Kombination mit GOCE und anderen Satellitenmissionen als GOCO05s [6] veröffentlicht (Abbildung 9).

#### 4. Zusammenfassung

Das spezielle Messprinzip der GRACE-Mission, die hochgenaue Beobachtung der Abstandsänderung zwischen zwei Satelliten, machte es zum ersten Mal möglich, Massenänderungen auf und über der Erdoberfläche zu beobachten. Die Bedeutung der Mission für das Klimamonitoring wird durch mehrere Beiträge zum IPCC-Sachstandsbericht sowie der erfolgreichen Fortsetzung durch die Nachfolgemission GRACE-FO unterstrichen.

Das Institut für Geodäsie an der TU Graz wertet seit einigen Jahren Daten der GRACE-Mission aus und stellt sie allen interessierten Anwendern in Form von Schwerefeldlösungen frei zur Verfügung. Es wird permanent im internationalen Austausch daran gearbeitet, die Qualität der Lösungen zu verbessern, indem versucht wird, das komplexe Zusammenspiel der unterschiedlichen Instrumente untereinander und die Interaktion mit der Umgebung besser zu verstehen sowie neue Methoden zur Auswertung zu entwickeln. Dieser

internationale Austausch führte unter anderem zur Gründung des COST-G-Services der International Association of Geodesy (IAG), welches zum Ziel hat, durch Kombination von unterschiedlichen GRACE-Lösungen, ein konsolidiertes Schwereprodukt für die wissenschaftliche Gemeinschaft bereitzustellen.

Die Schwerefeldlösungen des Instituts für Geodäsie sind zusammen mit weiteren Hintergrunddaten und einer kurzen Dokumentation frei verfügbar auf der Webseite des Instituts ([ifg.tugraz.at/downloads/gravity-field-models/itsg-grace2016](http://ifg.tugraz.at/downloads/gravity-field-models/itsg-grace2016)) zu finden. Zusätzlich sind die Daten auch über das International Centre for Global Earth Models (ICGEM, [icgem.gfz-potsdam.de](http://icgem.gfz-potsdam.de)) und über den EGSIM Plotter ([plot.egsiem.eu](http://plot.egsiem.eu)) verfügbar, wo sie interaktiv mit anderen Zentren verglichen werden können.

#### Referenzen

- [1] Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M. and Reigber, C. (2004), *The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results*, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L09607, doi: 10.1029/2004GL019920.
- [2] Zehentner, N. & Mayer-Gürr T. (2016), *Precise orbit determination based on raw GPS measurements*, *J Geod* (2016) 90: 275. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0872-7>

- [3] Zehentner, N., Mayer-Gürr, T. (2014), *Gravity, geoid and height systems*. In: International association of geodesy symposia, vol 141. Springer, New York. doi: 10.1007/978-3-319-10837-7.
- [4] Klinger, Beate and Mayer-Gürr, Torsten (2016). "The Role of Accelerometer Data Calibration within GRACE Gravity Field Recovery: Results from ITSG-Grace2016." In: *Advances in Space Research* 58.9, pp. 1597–1609. doi: 10.1016/j.asr.2016.08.007.
- [5] Mayer-Gürr, T., Pail, R., Gruber, T., Fecher, T., Rexer, M., Schuh, W.-D., Kusche, J., Brockmann, J.-M., Rieser, D., Zehentner, N., Kvas, A., Klinger, B., Baur, O., Höck, E., Krauss, S., and Jäggi, A. (2015), *The combined satellite gravity field model GOCO05s*. Presented at: EGU General Assembly 2015, Vienna, Austria. Geophysical Research Abstracts Vol. 17, EGU2015-12364.
- [6] Petit, G. and Luzum, B., eds. (2010). *IERS Conventions. IERS Technical Note No. 36*. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 179 pp. ISBN : 3-89888-989-6.
- [7] Savcenko, R., Bosch, W., Dettmering, D. and Seitz, F. (2012), *EOT11a - Global Empirical Ocean Tide model from multi-mission satellite altimetry, with links to model results*. Supplement to: Savcenko, Roman; Bosch, Wolfgang (2012): EOT11a - Empirical Ocean Tide Model from Multi-Mission Satellite Altimetry. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI), München, 89, 49 pp, hdl:10013/epic.43894.d001. DOI : 10.1594/PAN-GAEA.834232.
- [8] van Dam, T. and Ray, R., 2010, *Updated October 2010. S1 and S2 Atmospheric Tide Loading Effects for Geodetic Applications. Data set/Model accessed 2016-06-03 at <http://geophy.uni.lu/ggfc-atmosphere/tide-loading-calculator.html>*.
- [9] Dobslaw, H., Flechtner, F., Bergmann-Wolf, I., Dahle, C., Dill, R., Esselborn, S., Sasgen, I., Thomas, M. (2013): Simulating high-frequency atmosphere-ocean mass variability for de-aliasing of satellite gravity observations: AOD1B RL05. - *Journal of Geophysical Research*, 118, 7, p. 3704-3711, doi.org/10.1002/jgrc.20271.
- [10] Desai, S. D., *Observing the pole tide with satellite altimetry*, *J. Geophys. Res.*, 107 (C11), 3186, doi:10.1029/2001JC001224, 2002.
- [11] Ellmer, M., & Mayer-Gürr, T. (2017): High precision dynamic orbit integration for spaceborne gravimetry in view of GRACE Follow-on. *Advances in space research*. DOI: 10.1016/j.asr.2017.04.015
- [12] Koch, K.-R. (1999): *Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models*. 2nd, updated and enlarged edition. Berlin Heidelberg: Springer. ISBN : 978-3-662-03976-2.
- [13] Horwath, M., Groh, A. (2016): *ESA Antarctic Ice Sheet Climate Change Initiative (Antarctic\_Ice\_Sheet\_cci): Gravimetric Mass Balance Basin products, v1.1*. Technische Universität Dresden, Institut für Planetare Geodäsie, 2018-06-10.
- [14] Gouweleeuw, B. T., Kvas, A., Gruber, C., Gain, A. K., Mayer-Gürr, T., Flechtner, F. and Güntner, A.: Daily GRACE gravity field solutions track major flood events in the Ganges–Brahmaputra Delta, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 2867–2880, <https://doi.org/10.5194/hess-22-2867-2018>, 2018.
- [15] Mayer-Gürr, T., Zehentner, N., Klinger, B., Kvas, A. (2014): *ITSG-Grace2014: a new GRACE gravity field release computed in Graz*. Presented at the GRACE Science Team Meeting (GSTM), Potsdam, 29.09.2014.

#### Anschrift der Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Torsten Mayer-Gürr, Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30/III, 8010 Graz.

E-Mail: mayer-guerr@tugraz.at

Saniya Behzadpour MSc, Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30/III, 8010 Graz.

E-Mail: behzadpour@tugraz.at

Dipl.-Ing. Matthias Ellmer, Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30/III, 8010 Graz.

E-Mail: ellmer@tugraz.at

Dipl.-Ing. Beate Klinger, Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30/III, 8010 Graz.

E-Mail: beate.klinger@tugraz.at

Dipl.-Ing. Andreas Kvas BSc, Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30/III, 8010 Graz.

E-Mail: kvas@tugraz.at

Dipl.-Ing. Sebastian Strasser BSc, Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30/III, 8010 Graz.

E-Mail: sebastian.strasser@tugraz.at

Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Zehentner, Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30/III, 8010 Graz.

E-Mail: zehentner@tugraz.at