



Aktuelle und zukünftige Schwerefeldmissionen als wichtige Komponente des Globalen Geodätischen Beobachtungssystems (GGOS)

Roland Pail, München

Kurzfassung

Das Schwerefeld spiegelt die Massenverteilung und Massentransportprozesse im System Erde wider, die mit Veränderungsprozessen des globalen Wasserkreislaufs, dem Abschmelzen von Eismassen oder tektonischen Prozessen und Erdbeben in Zusammenhang stehen. Die kontinuierliche Beobachtung des Schwerefeldes stellt auch eine zentrale Komponente des Globalen Geodätischen Beobachtungssystems (GGOS) der International Association of Geodesy (IAG) dar. Neben dem Monitoring von globalen Massentransportprozessen spielt es auch für die Definition einer global einheitlichen physikalischen Höhen-Bezugsfläche sowie des globalen geodätischen Datums eine entscheidende Rolle. Die Satellitenmissionen der ersten Generation haben spektakuläre Resultate erzielt. Daraus resultiert die Notwendigkeit, die Zeitreihen auch in Zukunft fortzusetzen und ein nachhaltiges satellitengebundenes Schwerefeld-Beobachtungssystem zu installieren. Die ambitionierten Anforderungen an ein solches System müssen durch innovative Missionskonzepte, verbesserte Messtechnologien und neue Auswertestrategien erfüllt werden.

Schlüsselwörter: Erdschwerefeld, Massentransport, zukünftige Schwerefeldmission, Erdsystem, Globales Geodätisches Beobachtungssystem

Abstract

The gravity field reflects mass distribution and mass transport processes in the Earth system, which are related to variations of the global water cycle, the melting of ice masses, tectonic processes and earthquakes. The sustained observation of the Earth's gravity field is a central component of the Global Geodetic Observing System (GGOS) operated by the International Association of Geodesy (IAG). In addition to the monitoring of global mass transport processes it is important for the definition of a global unified height reference surface as well as the global geodetic datum. Spectacular science results could be achieved by satellite missions of the first generation. These measurement time series have to be continued by establishing a sustained satellite gravity observing system in the future. The ambitious requirements for such a system have to be met by means of innovative mission concepts, improved measurement techniques and new processing strategies.

Keywords: Earth gravity field, Mass transport, Future gravity mission, Earth system, Global Geodetic Observing System

1. Einleitung

Die erste Generation von Satellitenmissionen zur Beobachtung des globalen Schwerefeldes hat unsere Kenntnisse über Massenverteilungen und Massentransportprozesse im System Erde revolutioniert und wichtige Beiträge für viele geowissenschaftlichen Disziplinen erbracht. Die Mission GOCE (Gravity Field and Steady-state Ocean Circulation Explorer; Missionsdauer: 2009 bis 2013; Drinkwater et al. 2003) lieferte ein hoch auflösendes und global konsistentes Bild des statischen Erdschwerefeldes (Geoids) mit einer räumlichen Auflösung von 70–80 km. Wichtige Anwendungsfelder sind die globale Vereinheitlichung von Höhensystemen, die geophysikalische Modellierung der Lithosphäre und, in Kombination mit Ergebnissen der Satellitenaltimetrie, die Ableitung der globalen Ozeantopografie und geostropher Strömungsgeschwindigkeiten. Die Mission GRACE (Gravity Recovery And Climate

Experiment; Missionsdauer: seit 2002; Tapley et al. 2004) beobachtet aus dem Weltall zeitliche Schwerefeldvariationen, die von Prozessen des globalen Wasserkreislaufs, dem Abschmelzen von Eismassen, ozeanischer Tiefenzirkulation oder starker Erdbeben verursacht werden.

Satelliten-Schwerefeldmissionen sind, neben dem Bodennetzwerk und geodätischen Raumverfahren, integraler Bestandteil der GGOS-Infrastruktur. Verglichen mit den anderen beiden GGOS-Grundpfeilern Geometrie/Kinematik und Erdrotation ist die Komponente Schwerefeld auch nach der überaus erfolgreichen Realisierung der Missionen der ersten Generation, CHAMP (Challenging Minisatellite Payload; Reigber et al. 2002), GRACE und GOCE, noch am weitesten von den ambitionierten GGOS 2020-Zielen (Plag & Pearlman 2009) entfernt. Im GGOS-Kontext spielen Schwerefeldbeobachtungen nicht nur zur Ableitung globaler und regionaler Massen-

veränderungsprozesse eine Rolle, sondern auch für die Definition von physikalischen Höhensystemen und über die niedrigen harmonischen Koeffizienten auch zur Datumsdefinition terrestrischer Bezugsrahmen (Maßstab, Ursprung, Orientierung).

Über die bereits gesicherte GRACE Follow-On-Mission (geplanter Start 2017) hinaus soll eine nachhaltige Beobachtung des Schwerfeldes aus dem Weltraum als Teil der GGOS-Infrastruktur sichergestellt werden, da lange Beobachtungszeitreihen eine Grundvoraussetzung sind, um beispielsweise natürliche von anthropogen verursachten Effekten der Klimaveränderung gesichert zu trennen und robuste Trends abzuleiten. Basierend auf wissenschaftlichen und Nutzeranforderungen werden zukünftige Missionskonzepte und neue Technologien entwickelt, um die räumliche und zeitliche Auflösung weiter zu erhöhen.

2. Das globale Schwerfeld und aktuelle Missionskonzepte

Das globale Gravitationsfeld der Erde V wird üblicherweise als harmonische Reihenentwicklung in sphärischen Koordinaten (Radius r , geographische Ko-Breite ϑ und Länge λ) parametrisiert:

$$V(r, \vartheta, \lambda) = \frac{GM}{R} \sum_{n=0}^L \left(\frac{R}{r} \right)^{n+1} \cdot \sum_{m=-n}^n \bar{P}_{nm}(\cos \vartheta) [\bar{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda)] \quad (1)$$

wobei G die Gravitationskonstante, M und R die Erdmasse und den Referenzradius der Erde, \bar{P}_{nm} die vollständig normierten Legendre-Polynome von Grad n und Ordnung m , und $\{\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}\}$ die zugehörigen Koeffizienten darstellen. Ziel der Schwerfeldmodellierung ist es, die Koeffizienten der Reihenentwicklung $\{\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}\}$ sowie zugehörige Genauigkeitsinformation bis zu einem maximalen Grad der Reihenentwicklung L bestmöglich aus den Satellitenbeobachtungen zu schätzen. Letztere sind Funktionale des Gravitationspotentials V .

Bislang wurden mit den drei Satellitenmissionen CHAMP, GRACE und GOCE (Abbildung 1) drei unterschiedliche Messkonzepte realisiert:

1. Beobachtung von Bahnstörungen niedrigfliegender Satelliten (Low Earth Orbiters; LEOs) aufgrund variabler gravitativer Anziehung, mittels globaler Positionierungs- und Navigationssysteme wie beispielsweise das Global Positioning System (GPS). Dabei werden Genau-

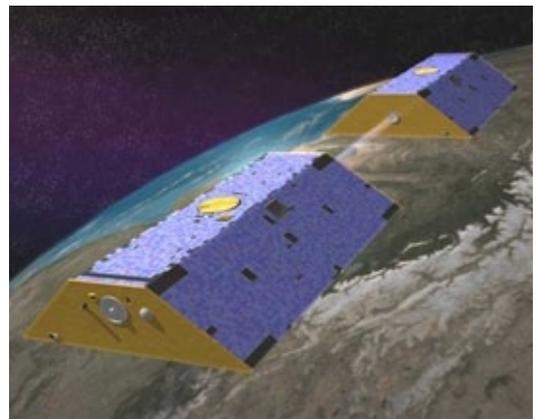


Abb. 1: Satellitenschwerfeldmissionen der ersten Generation: CHAMP (links), GRACE (Mitte) und GOCE (rechts)

igkeiten von 2–3 cm erzielt (Bock et al. 2011). Nicht-gravitative auf den Satelliten wirkende Kräfte werden von hochpräzisen Beschleunigungssensoren gemessen und im Rahmen der Schwerfeldmodellierung korrigiert. Dieses Prinzip der Distanzmessung zwischen LEOs

und hoch-fliegenden GPS-Satelliten (satellite-to-satellite tracking in high-low mode; SST-hl) wurde bei allen drei Missionen CHAMP, GRACE und GOCE realisiert und ist das primäre Messkonzept von CHAMP.

2. Beobachtungen von Bahndifferenzen und deren zeitlicher Änderung zwischen zwei LEO-Satelliten. Dieses Konzept der Intersatelliten-Distanzmessung (satellite-to-satellite tracking in low-low mode; SST-II) ist in der GRACE-Mission realisiert. Diese besteht aus zwei baugleichen Satelliten, die auf derselben Bahn in einem Abstand von ca. 200 km die Erde umkreisen. Die hochpräzise Distanzmessung wird mittels eines K-Band-Mikrowellensystems mit Mikrometer-Genauigkeit durchgeführt und soll in zukünftigen Missionen wie GRACE Follow-On durch Laserinterferometrie ersetzt werden, um die Genauigkeit weiter zu steigern.
3. Beobachtung von Beschleunigungsdifferenzen auf sehr kurzen Basislinien (Satellitengradiometrie; SGG), die in sehr guter Näherung zweite Ableitungen des Gravitationspotentials V in alle drei Raumrichtungen darstellen. Dieses Konzept wurde bei der GOCE-Mission erstmals eingesetzt.

An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass ausschließlich mittels des SGG-Konzepts direkte Funktionale des Gravitationspotentials V gemessen werden, während Bahnstörungen und Bahndifferenzen zunächst rein geometrische Größen darstellen, die nur indirekt vom zugrunde liegenden Schwerefeld abhängen.

Die erreichbare Schwerefeldgenauigkeit von Satellitenschwerefeldmissionen hängt im Wesentlichen von der Beobachtungstechnik und der Bahnhöhe des Satelliten ab. Abbildung 2 zeigt Leistungskurven der unterschiedlichen Beobachtungstechniken in Abhängigkeit des harmonischen Grades n und damit der räumlichen Wellenlänge λ , gemäß $\lambda = 20000 \text{ km}/n$. Als Referenz stellt die schwarze Kurve das Schwerefeldsignal selbst dar. Die Kreuzungspunkte der bunten Fehlerkurven mit der schwarzen Signalkurve markieren, bei welchem harmonischen Grad das Signal-zu-Rauschverhältnis gleich '1' ist.

Aus der Bahninformation (SST-hl; hellblaue Kurve) können nur die langwelligigen Schwerefeldsignale bestimmt werden. Die rote Kurve gibt die aktuelle Leistungsfähigkeit von GRACE wieder, basierend auf dem aktuellen Modell ITSG-Grace2014 (Mayer-Gürr et al. 2014). Verglichen mit CHAMP liefert GRACE eine signifikant gesteigerte

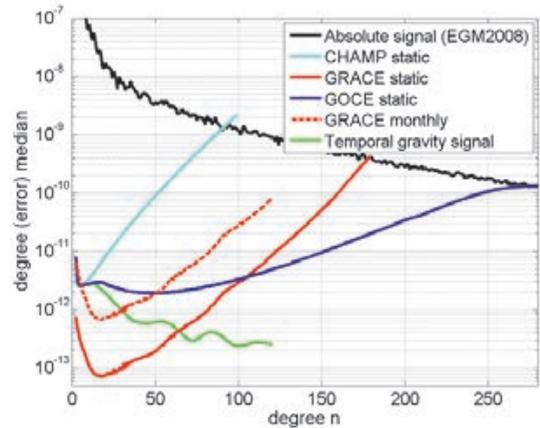


Abb. 2: Absolutes Schwerefeldsignal und Genauigkeiten der unterschiedlichen Beobachtungskonzepte als Funktion des harmonischen Grades n (räumliche Wellenlänge), ausgedrückt als Grad-(Fehler-)Median

genauigkeit in den niedrigen bis mittleren Graden sowie eine höhere räumliche Auflösung. Mittels GRACE können auch Zeitvariationen des Schwerefeldes gemessen werden. Die rot gestrichelte Kurve markiert eine typisch erzielbare Genauigkeit einer monatlichen GRACE-Schwerefeldlösung, und die grüne Kurve spiegelt die Amplitude eines typischen zeitvariablen Signals wider. Offensichtlich können nur die langwelligigen Komponenten des zeitvariablen Schwerefeldsignals mittels GRACE vermessen werden.

Die blaue Kurve zeigt die Genauigkeit des aktuellen GOCE-Schwerefeldmodells EGM-TIM_RL05 (Brockmann et al. 2014), das auf den Daten der gesamten Mission beruht. Die Messung zweiter Ableitungen ermöglicht eine Bestimmung auch von höherfrequenten Schwerefeldsignalen bis zu 70–80 km Wellenlänge. Unterhalb des harmonischen Grades $n = 100$ zeigt jedoch GRACE aufgrund seines SST-II-Prinzips eine bessere Performance als GOCE. Dies illustriert, warum SST-II das bevorzugte Messprinzip zur Bestimmung des zeitvariablen Anteils des Schwerefeldes ist, während mit GOCE global hochauflösende statische Schwerefeldinformationen zur Verfügung gestellt wurde.

3. Anwendungsfelder und ausgewählte Anwendungen aktueller Schwerefeldmissionen

3.1 GRACE – zeitvariables Schwerefeld

Mittels Analyse der GRACE-Daten konnten spektakuläre Forschungsergebnisse erzielt werden. Zum ersten Mal konnte gesichert der Eismassenverlust in Grönland und der Antarktis

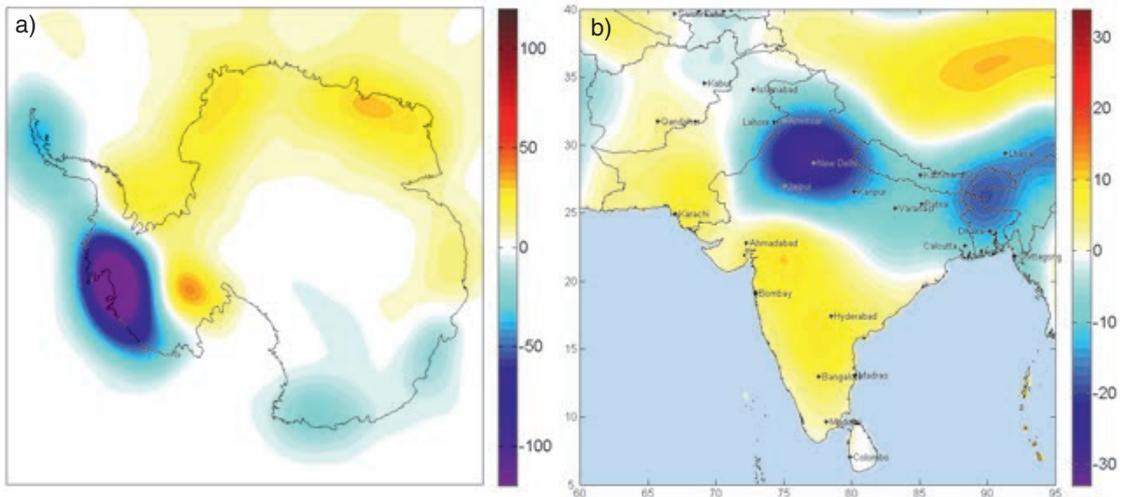


Abb. 3: (a) Eismassentrends [in mm äquivalenter Wasserhöhe pro Jahr] in der Antarktis; (b) Grundwasserabsenkung in Nordindien; basierend auf dem zeitvariablen Schwerefeldmodell GFZ RL05 (Dahle et al., 2012)

nachgewiesen und quantifiziert werden (ca. 270 Gt/Jahr in Grönland, und ca. 60 Gt/Jahr in der Antarktis) (Sheperd et al. 2012). Aktuelle Forschung beschäftigt sich mit der Frage, ob diese Trends sogar beschleunigt ablaufen (Velicogna et al. 2014). Abbildung 3a zeigt beispielhaft Eismassentrends in der Antarktis.

GRACE hat ebenfalls erstmals Beobachtungen jahreszeitlicher und langfristiger Veränderungen der Wasserspeicherung für regionale Einzugsgebiete geliefert. Dies ermöglicht, durch den globalen Wasserkreislauf verursachte Wasserflüsse direkt zu beobachten und hilft, die kontinentale Wasserbilanz auf großen bis mittleren Skalen zu schließen. GRACE ermöglichte es auch, die Auswirkungen von Extremereignissen wie Dürren oder Fluten zu beobachten. Ebenfalls konnten für andere Beobachtungsverfahren, wie z.B. Fernerkundungstechniken, unzugängliche Grundwasseränderungen detektiert werden. Beispielsweise zeigt Abbildung 3b eine anthropogen verursachte Grundwasserabsenkung in Nordindien (Tiwari et al., 2009; Fig. 3b), die aus exzessiver Entnahme nicht erneuerbarer Trinkwasserreserven in dieser Region resultiert.

Der globale mittlere Meeresspiegelanstieg von ca. 3 mm/Jahr wird zum einen von thermischer Ausdehnung aufgrund von globaler Erwärmung, und zum anderen durch zusätzlichen Masseintrag von schmelzenden Eisschilden, Eiskappen und Gletschern verursacht. Da gravimetrische Verfahren nur sensitiv für Masseveränderungen sind, erlauben sie, den Massebeitrag, der ca. 2 mm/Jahr beträgt, vom Volumeneffekt (ca.

1 mm/Jahr) zu trennen. Außerdem konnten Masseänderungen verursacht durch große Erdbeben (Magnitude > 8.4) gravimetrisch gemessen werden, wie z.B. die Erdbeben in Sumatra (2004), Chile (2010) und Japan (2011) (Han et al., 2011). Diese Messungen stellen wichtige Randbedingungen für die physikalische Modellierung von Erdbebenmechanismen dar.

Neben der limitierten räumlichen Auflösung von 200–500 km (je nach Signalstärke, Signalperiode und geographischer Breite) beschränkt vor allem zeitliches Aliasing hochfrequenter Schwerefeldvariationen, deren Periode kürzer ist als die zeitliche Auflösung der Satellitenmission (Woche bis Monat) die Leistungsfähigkeit von GRACE. Solche kurzperiodischen Massenvariationen werden beispielsweise von Ozeangezeiten mit halbtäglichen und täglichen Hauptperioden verursacht, aber auch von hochfrequenten Variationen in der Atmosphäre. Daraus resultieren typische Streifenmuster („striping“) in den Schwerefeldlösungen (Abb. 8 links). Diese Artefakte können zwar durch zusätzliche Filterung reduziert werden, damit geht aber auch der hochfrequente Signalinhalt verloren.

3.2 GOCE – statisches Schwerefeld

GOCE lieferte hochgenaue, global homogene statische Schwerefeldinformation mit räumlichen Wellenlängen bis 70–80 km (Brockmann et al. 2014). Die erzielte Genauigkeit beträgt ca. 2 cm in Geoidhöhe und ca. 0.7 mGal in Schwereanomalien bei einer räumlichen Wellenlänge von 100 km (Grad 200).

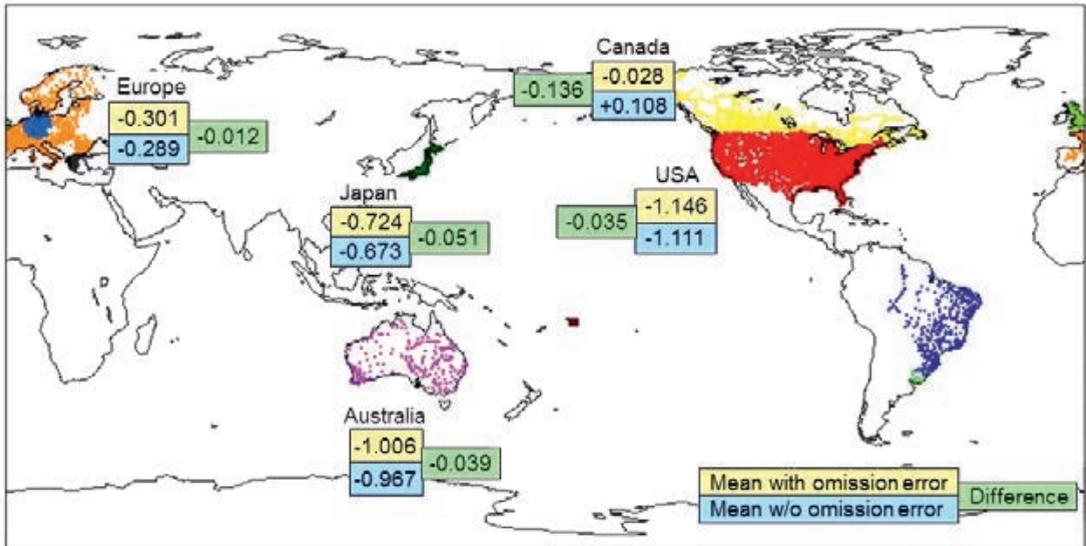


Abb. 4: Schätzung der Höhensystem-Offsets [m] als Differenzen zwischen Geoidhöhen aus GPS-Nivellement und gerechnet auf Basis des GOCE-Schwerefeldmodells GOCE-TIM-R5 bis Grad 200 (100 km räumliche Wellenlänge), mit (gelb) und ohne (blau) Abbruchfehler.

Diese statischen Satellitenschwerefeldmodelle liefern die global konsistente physikalische Referenzfläche des Geoids, die eine globale Vereinheitlichung von Höhensystemen und einen Höhentransfer sogar über Ozeane hinweg ermöglichen (Rummel 2013). In naher Zukunft wird damit das aufwändige und teure Höhenübertragungsverfahren des Präzisionsnivellements ersetzt werden durch die Bestimmung physikalischer Höhen (orthometrische oder Normalhöhen) als Differenz von mittels GNSS-Langzeitbeobachtung ermittelten ellipsoidischen Höhen und hochgenauer Geoid/Quasigeoid-Information („GNSS-Nivellement“).

Abbildung 4 zeigt exemplarisch geschätzte Offsets zwischen nationalen/regionalen Höhensystemen als Differenz zwischen Geoidhöhen aus GNSS-Nivellement und jenen basierend auf dem globalen GOCE-Modell GOCE-TIM-R5 (Brockmann et al. 2014). Aufgrund der Abnahme des Schwerefeldsignals mit der Flughöhe sind Satellitenmodelle jedoch spektral limitiert („omission error“). Die Werte in den gelben Kästen beinhalten diesen Abbruchfehler, während der Abbruchfehler in den blauen Kästen durch terrestrische Zusatzinformation korrigiert wurde.

Um eine Vereinheitlichung von Höhensystemen auf Zentimeter-Niveau durchführen zu können, ist daher eine Kombination mit terrestrischen Daten, die auch die hochfrequenten Signalanteile enthalten, erforderlich. Allein ba-

sierend auf Satellitendaten ist eine solche mit Genauigkeiten im Dezimeter-Bereich realisierbar, was aber insbesondere für Entwicklungs- und Schwellenländer mit mangelhafter oder gänzlich fehlender geodätischer Infrastruktur einen großen Gewinn darstellt.

Die Anwendung ähnlicher Konzepte über den Ozeanen resultiert in der Bestimmung der mittleren dynamischen Topografie (MDT), welche die Differenz der geometrischen Ozeanoberfläche gemessen mittels Satellitenaltimetrie und dem Geoid darstellt. Als Horizontalableitung der MDT können geostrophe Geschwindigkeiten von Ozeanströmungen bestimmt werden (Bingham et al. 2011, Knudsen et al. 2011). Abbildung 5 zeigt globale Strömungsgeschwindigkeiten basierend auf GOCE-Schwerefeldinformation (Rio et al. 2014). Als Beispiel sei hier der Golfstrom genannt, der im Golf von Mexiko beginnt, warme Wassermassen über den Nordatlantik hinweg und entlang der europäischen Westküste weit in den Norden befördert und damit für eine Erhöhung der jährlichen Durchschnittstemperatur in Europa von 4–5°C sorgt. Generell ist es damit heute möglich, rein aus einer Kombination geodätischer Verfahren wichtige Information über die globale Ozeanzirkulation abzuleiten.

GOCE-Schwerefeldmodelle werden auch als Randbedingung für die Inversion von lithosphärischen Dichtemodellen (Hosse et al. 2014), zur Ableitung der Moho-Tiefe (van der Meijde et al.

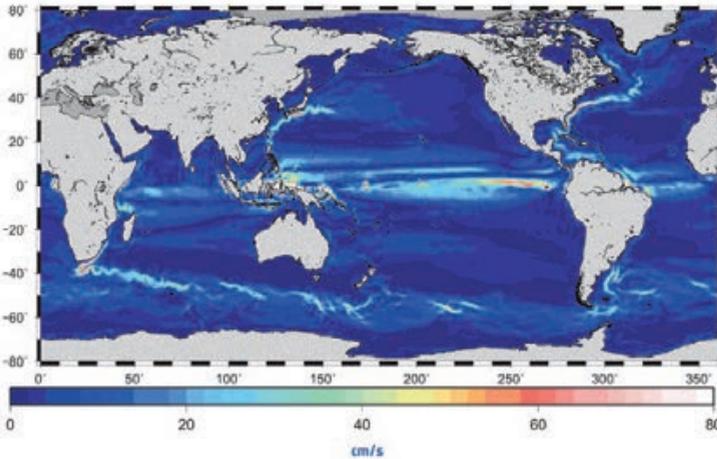


Abb. 5: Geostrophe Ozeanströmungsgeschwindigkeiten basierend auf GOCE-Daten (Rio et al. 2014)

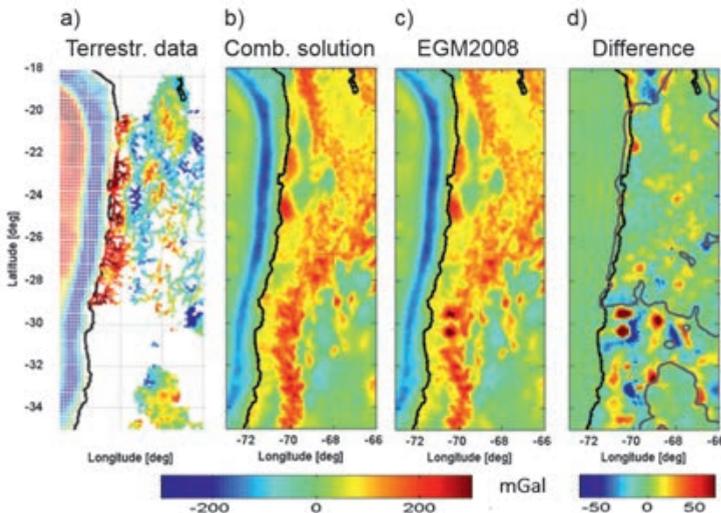


Abb. 6: Freiluft-Schwereanomalien [Gal]: a) terrestrische Schwere-Datenbasis; b) kombiniertes regionales Schwerfeldmodell; c) EGM2008; d) Differenzen zwischen a und b; nach Hosse et al. (2014), modifiziert.

2013, Sampietro et al. 2014) und zur Exploration tektonischer Strukturen über Kontinente hinweg (Braitenberg 2014) verwendet. In Hosse et al. (2014) wurde ein kombiniertes regionales Schwerfeldmodell aus GOCE, GRACE und terrestrischen Daten (Abbildung 6a) zur geophysikalischen Modellierung der aktiven Subduktionszone in der Anden-Region berechnet. Verglichen mit früheren pre-GOCE-Modellen wie EGM2008 (Pavlis et al. 2012; Abb. 56) zeigt die neue regionale Kombinationslösung (Abbildung 6b) signifikante Differenzen (Abbildung 6d) vor allem in Regionen mit unzureichender Datenbasis. Dies zeigt klar den Beitrag von GOCE spe-

ziell in diesen Regionen sowie zur Identifizierung fehlerhafter terrestrischer Daten.

4. Zukünftige Schwerfeldmissionen

Die Realisierung zukünftiger Schwerfeldmissionen mit signifikant verbesserter Genauigkeit ist nicht nur eine Grundvoraussetzung, um die GGOS-Ziele im Bereich Schwerfeld erfüllen zu können. Vielmehr besteht ein großer Bedarf zahlreicher Nutzer, das Schwerfeld der Erde und dessen Veränderungen mittels nachhaltiger Satelliten-Infrastruktur permanent zu beobachten, da Satellitenmissionen die einzige verfügbare Beobachtungstechnik sind, um Massentransportprozesse im System Erde direkt zu erfassen.

4.1 Grenzen aktueller Schwerfeldmissionen

Trotz oder gerade wegen der mittels der ersten Generation an Satellitenmissionen erzielten spektakulären Ergebnisse muss es Ziel sein, die aktuellen Limitierungen durch neue Missionskonzepte und verbesserte Messtechnologie zu überwinden. Aufgrund der begrenzten erzielbaren räumlichen Auflösung von 200–500 km können heute weltweit nur ca. 10% aller hydrologischen Einzugsgebiete umfassend erfasst werden, und nicht einmal die größten Ausflussgletscher von Eisschilden können räumlich aufgelöst werden. Außerdem können aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung einander überlagernde Massensignale nicht hinreichend gut separiert werden, was zu Fehlinterpretationen führen kann. So ist z.B. der Effekt der postglazialen Landhebung (GIA) die größte Fehlerquelle bei der Schätzung der grönländischen Eismassenbilanz. Im Bereich der Ozeane wäre eine höhere räumliche Auflösung, verknüpft mit einer verbesserten Messgenauigkeit, erforderlich, um die Variabilität der wichtigsten Treiber der Ozeanzirkulation zu beobachten. Ebenfalls aufgrund der limitierten Messgenauigkeit können

heute nur die größten Erdbeben mit Magnituden größer als 8.4 erfasst werden.

Zahlreiche Anwendungen leiden derzeit auch unter der beschränkten Länge der Beobachtungszeitreihe. Eine Periode von mindestens 30 Jahren wäre erforderlich, um natürliche von anthropogen verursachten Effekten zu trennen und Trends robust schätzen zu können. Letztlich erschweren die beschränkte räumliche und vor allem auch zeitliche Auflösung sowie relative lange Bereitstellungszeiten, Schwerefeldprodukte für zahlreiche gesellschaftlich relevante Anwendungen und Services operativ zu nutzen.

4.2 Anforderungen an ein zukünftiges satellitenbasiertes Schwerefeld-Beobachtungssystem

Die Anforderungen an eine zukünftige Schwerefeld-Satelliteninfrastruktur umfassen somit eine nachhaltige und lückenlose Langzeitbeobachtung mit höherer Genauigkeit, verbesserter räumlicher und zeitlicher Auflösung und kurzen Bereitstellungszeiten der Schwerefeldprodukte.

Im Rahmen einer koordinierten internationalen Initiative unter Beteiligung der International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) und des GGOS der IAG wurden von einer internationalen Expertengruppe Nutzeranforderungen für eine solche nachhaltige Satelliten-Infrastruktur für die zentralen Anwendungsfelder kontinentale Hydrologie, Kryosphäre, Ozean, Geophysik sowie übergreifende Themen definiert.

Neben rein wissenschaftlichen Fragestellungen stehen immer mehr Anwendungen mit klarem gesellschaftlichem Nutzen im Vordergrund. Abbildung 7 gibt einen Überblick über die zentralen wissenschaftlichen (gelb) und gesellschaftlich relevanten (blau) Themenfelder.

Zentrale wissenschaftliche Ziele sind unter anderem das Schließen der globalen Wasserbilanz auf Skalen bis zu 150–200 km, die robuste Schätzung der Eismassenbilanz für einzelne Einzugsgebiete auf Zeitskalen von Monaten bis zu Jahrzehnten, die Erfassung der Variation der globalen Ozeanzirkulation und des Massen- und Wärmetransports zumindest auf regionalen Skalen, die Trennung von Massen- und Volumenanteilen des globalen und regionalen Meeresspiegelanstiegs, die Erfassung von Erdbeben mit Magnituden größer als 7, die Signaltrennung von tektonischen, GIA-, hydrologischen und kryosphärischen Masseneffekten, und die Trennung von natürlichen und vom Menschen verursach-

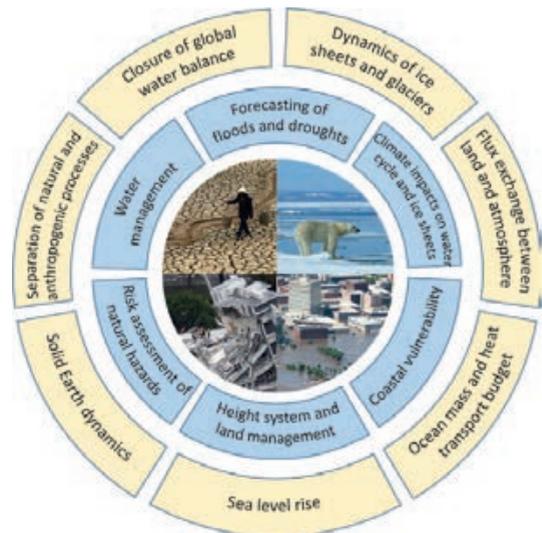


Abb. 7: Wissenschaftliche (gelb) und gesellschaftlich relevante (blau) Anwendungen und Fragestellungen eines nachhaltigen Schwerefeldsatelliten-Beobachtungssystems

ten Beiträgen zum Klimawandel auf regionalen Skalen.

Daneben sollte Satellitengravimetrie mittelfristig als ein nachhaltiges Beobachtungssystem etabliert werden, dessen Produkte in operationelle Modellierungs- und Vorhersagesysteme eingespeist werden. Wenn hohe zeitliche Auflösung und kurze Bereitstellungszeiten sichergestellt sind, können signifikante Beiträge zum Wassermanagement, zur operationellen Vorhersage von Flut- und Dürreereignissen oder Risikomanagement hinsichtlich Naturgefahren geleistet werden. Das Verständnis der Dynamik des regionalen Meeresspiegels ist Grundvoraussetzung zur Abschätzung des Gefährdungspotentials an den Küsten. Das verbesserte Verständnis von Klimaeinflüssen auf kontinentale Hydrologie, Eismassen, Ozeane und Atmosphäre wird kurz- bis mittelfristige Klimaprognosen signifikant unterstützen.

Daraus ergeben sich folgende Anforderungen:

- nachhaltige und lückenlose Beobachtung von Massentransportprozessen mittels geeigneter Satelliten-Infrastruktur mit
- signifikant verbesserter Genauigkeit von 1–2 Zehnerpotenzen relativ zur aktuellen Situation,
- verbesserter räumlicher Auflösung von mindestens 100 km,
- verbesserter zeitlicher Auflösung von wenigen Tagen, und

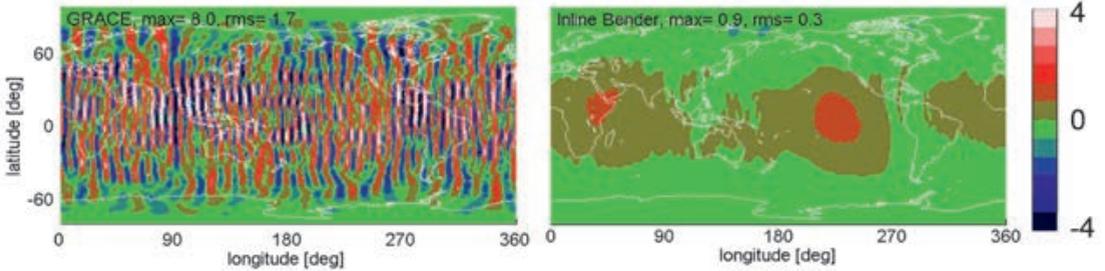


Abb. 8: Typische Fehlerstruktur einer GRACE-ähnlichen Einzelpaar-Mission (links) und einer Doppelpaarmission in Bender-Konfiguration (rechts)

■ kurzen Bereitstellungszeiten von Produkten.

Mittelfristig sollten Satelliten-Schwerefeldbeobachtungen mit komplementärer Information kombiniert und in physikalische Erdsystemmodelle assimiliert werden.

4.3 Zukünftiges Verbesserungspotential

Diese Verbesserungen können erreicht werden durch

A) Neue Messtechnologien

Bei GRACE Follow-On wird neben der Inter satelliten-Distanzmessung mittels K-Band-Mikrowellensystem erstmals Laserinterferometrie als Demonstrator eingesetzt. Damit kann die Distanzmessgenauigkeit zumindest um einen Faktor von 10 gesteigert werden. Daneben werden völlig neuartige Konzepte wie Cold Atom-Gradiometrie (Carraz et al. 2014) oder Schwerfeldmessung mittels optischer Uhren entwickelt, deren praktische Umsetzbarkeit allerdings erst in entfernterer Zukunft realistisch ist.

B) Satellitenkonstellationen und -formationen

Durch den Einsatz mehrerer Satelliten oder Satellitenpaare kann gleichzeitig die räumliche und zeitliche Auflösung erhöht werden. Abbildung 8 zeigt exemplarisch die Reduktion von Aliasing-Effekten durch die Ergänzung eines polaren Paares durch ein zweites Satellitenpaar, das idealerweise eine Inklination von 65–70° aufweist („Bender-Konfiguration“). Während Abbildung 8 links das typische GRACE-Fehlerverhalten des „Stripings“ zeigt, können diese Artefakte durch ein zweites Satellitenpaar in Bender-Konfiguration (Abbildung 8 rechts) signifikant reduziert werden.

Durch geeignete Bahnwahl sowie Orbithöhe und Wiederholperiode können unterschiedliche Missionsziele optimiert werden. Abbildung 9 zeigt beispielsweise die Leistungsfähigkeit einer Doppelpaarmission für unterschiedliche geogra-

phische Breiten in Abhängigkeit der Inklination des zweiten Satellitenpaars. Während im Äquatorialbereich durch eine stärker inklinierte Bahn eine bessere Beobachtungsgeometrie und damit auch leicht bessere Schwerfeld-Genauigkeiten erzielt werden können, werden in einer solchen Konstellation die Polregionen nur von einem der beiden Paare besucht, sodass stark inklinierte Orbits für Eisanwendungen nicht empfehlenswert sind.

In Murböck et al. (2014) konnte überdies gezeigt werden, dass Aliasingeffekte auch durch Wahl einer geeigneten Bahnhöhe signifikant reduziert oder zumindest in den Bereich höherer harmonischer Grade migriert werden können. Damit müssen Schwerfeldlösungen a posteriori weniger stark gefiltert werden.

C) Verbesserte Prozessierungstechniken

Aktuelle zeitvariable Schwerfeldlösungen werden üblicherweise als monatliche Mittelwerte zur Verfügung gestellt. Doppelpaar- oder

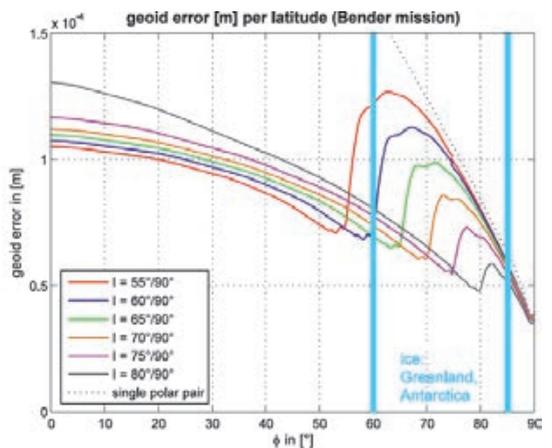


Abb. 9: Erzielbare Schwerfeldgenauigkeiten einer Doppelpaar-Mission in Abhängigkeit der Bahninklination des zweiten Satellitenpaars; das erste Paar hat hier stets einen polaren Orbit (aus: Gruber et al. 2014)

gar Multipaarkonfigurationen bieten aber die Möglichkeit, innovative Methoden zur besseren raum-zeitlichen Modellierung zu entwickeln und anzuwenden. Ziel muss es sein, so viel Signal wie möglich in möglichst kurzen Perioden zu schätzen (Wiese et al. 2009). Die Erhöhung der zeitlichen Auflösung ist nicht nur interessant für zahlreiche Anwendungen, sondern hilft auch zur Reduktion von Aliasing-Effekten, da hochfrequente Signale nun parametrisiert werden, anstelle sich als systematische Fehler in der Lösung abzubilden.

4.4 Missionsvorschläge

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Vorschläge für zukünftige Satelliten-Schwerefeldmissionskonzepte entwickelt. Im Rahmen der Earth Explorer 8 Ausschreibung der Europäischen Weltraumbehörde ESA wurde der Missionsvorschlag e.motion eingereicht (Panet et al. 2013). Dieser basierte auf einer Einzelpaarmission mit einem sogenannten Pendelorbit. Dabei bewegt sich durch geeignete Bahnwahl der zweite Satellit wie ein Pendel relativ zum ersten, sodass zusätzlich die Querkomponente der intersatelliten-Distanz gemessen werden kann, was zu einer Verringerung des „Striping“-Effekts führt. Dieser Missionsvorschlag war zwar nicht erfolgreich, kann jedoch in mehrfacher Hinsicht als Meilenstein und Basis für weiterführende Initiativen gesehen werden.

Eine solche ist die Vorbereitung auf die ESA-Ausschreibung einer Earth Explorer 9 Mission. Im Rahmen eines nationalen deutschen Projekts, gefördert durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), wurde ein Missionsszenario entwickelt, das auf einer Bender-Konfiguration beruht. Im Zuge dieses Projekts wurden Nutzer- und Missionsanforderungen definiert, die technische Machbarkeit analysiert sowie realistische numerische Missionssimulationen durchgeführt (Gruber et al. 2014).

Die Installierung eines nachhaltigen Satellitenschwerefeld-Beobachtungssystems wird aus Kostengründen vermutlich nur durch Kooperation internationaler Weltraumorganisationen möglich sein. Bestrebungen in diese Richtung sind bereits im Gange. Die Definition von zugehörigen Nutzeranforderungen, wie sie in Kapitel 4.2 adressiert wurden, stellen dazu eine wichtige flankierende Maßnahme dar, um die Notwendigkeit und den Mehrwert eines solchen Systems für ein verbessertes Verständnis unseres dynamischen Systems Erde, von klimarelevanten Prozessen

und der Bedienung zahlreicher gesellschaftsrelevanter Anwendungen festzustellen.

5. Schlussfolgerungen

Aus den wissenschaftlichen Erfolgen der ersten Generation der Satellitenschwerefeldmissionen in zahlreichen geowissenschaftlichen Anwendungen resultiert die Notwendigkeit, über Systeme zur nachhaltigen und lückenlosen Beobachtung von Massentransportprozessen im Erdsystem nachzudenken. Diese sind gleichzeitig integraler Bestandteil eines GGOS-Beobachtungssystems. Um die an sie gestellten Anforderungen, wie signifikant verbesserte Beobachtungsgenauigkeiten sowie erhöhte räumliche und zeitliche Auflösung, erfüllen zu können, ist die Entwicklung innovativer Missionskonzepte, verbesserter Beobachtungstechnologien sowie neuer Ansätze in der Datenauswertung notwendig. Um ein solches System zur Überwachung von Massentransportprozessen rechtzeitig nach Beendigung einer hoffentlich erfolgreichen GRACE-FO-Mission im Orbit zu haben (Zieldaten 2025 bis 2030), sind bereits jetzt die programmatischen, technologischen und wissenschaftlichen Weichen dafür zu stellen.

Referenzen

- Bingham, R.J., Knudsen, P., Andersen, O., Pail, R. (2011): An initial estimate of the North Atlantic steady-state geostrophic circulation from GOCE. *Geophysical Research Letters*, 38, EID L01606, American Geophysical Union, doi: 10.1029/2010GL045633.
- Bock, H., Jäggi, A., Meyer, U., Visser, P., van den IJssel, J., van Helleputte, T., Heinze, M., Hugentobler, U. (2011): GPS-derived orbits for the GOCE satellite. *Journal of Geodesy*, 85(11):807–818, doi: 10.1007/s00190-011-0484-9.
- Braitenberg, C. (2014): Exploration of tectonic structures with GOCE in Africa and across continents. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 01/2014, in press, doi: 10.1016/j.jag.2014.01.013.
- Brockmann, J.M., Zehentner, N., Höck, E., Pail, R., Loth, I., Mayer-Gürr, T., Schuh, W.-D. (2014): EGM_TIM_RL05: An independent Geoid with Centimeter Accuracy purely based on the GOCE Mission. *Geophysical Research Letters*, Wiley, doi: 10.1002/2014GL061904.
- Carraz, O., Siemes, C., Massotti, L., Haagmans, R., Silvestrin, P. (2014): A Spaceborne Gravity Gradiometer Concept Based on Cold Atom Interferometers for Measuring Earth's Gravity Field. *Microgravity Science and Technology*, 26(3), 139-145, doi: 10.1007/s12217-014-9385-x.
- Dahle, C., Flechtner, F., Gruber, C., König, D., König, R., Michalak, G., Neumayer, K.-H. (2012): GFZ GRACE Level-2 Processing Standards Document for Level-2 Product Release 0005, (Scientific Technical Report STR12/02 – Data, Revised Edition, January 2013), Potsdam, 21 p., doi: 10.2312/GFZ.b103-1202-25.

- Drinkwater, M.R., Floborghagen, R., Haagmans, R., Muzi, D., Popescu, A. (2003): GOCE: ESA's first Earth Explorer Core mission. In Beutler, G., Drinkwater, M.R., Rummel, R., von Steiger, R. (eds.), *Earth Gravity Field from Space – From Sensors to Earth Sciences*, Space Sciences Series of ISSI, vol. 17. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, S. 419–432, ISBN: 1-4020-1408-2.
- Gruber, T., Murböck, M., *NGGM-D Team* (2014): e2.motion – Earth System Mass Transport Mission (Square) – Concept for a Next Generation Gravity Field Mission. Final Report of Project „Satellite Gravimetry of the Next Generation (NGGM-D)“; Deutsche Geodätische Kommission der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe B, *Angewandte Geodäsie*, Vol. 2014, Heft 318, C.H. Beck, ISBN (Print) 978-3-7696-8597-8, ISSN 0065-5317.
- Han, S.-C., Sauber, J., Riva, R. (2011): Contribution of satellite gravimetry to understanding seismic source processes of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophysical Research Letters*, 38, L24312, doi: 10.1029/2011GL049975.
- Hosse, M., Pail, R., Horwath, M., Holzrichter, N., Gutknecht, B.D. (2014): Combined regional gravity model of the Andean convergent subduction zone and its application to crustal density modelling in active plate margins. *Surveys in Geophysics*, 2014(6), 1393-1415, Springer, doi: 10.1007/s10712-014-9307-x.
- Knudsen, P., Bingham, R., Andersen, O., Rio, M.-H. (2011): A global mean dynamic topography and ocean circulation estimation using a preliminary GOCE gravity model. *Journal of Geodesy*, 85(11):861–879, doi: 10.1007/s00190-011-0485-8.
- Mayer-Gürr, T., Zehentner, N., Klínger, B., Kvas, A. (2014): ITSG-Grace2014: a new GRACE gravity field release computed in Graz. Presented at GRACE Science Team Meeting (GSTM), Potsdam, 29.09.2014.
- Murböck, M., Pail, R., Daras, I., Gruber, T. (2014): Optimal orbits for temporal gravity recovery regarding temporal aliasing. *Journal of Geodesy*, 88(2), 113-126, Springer Berlin Heidelberg, doi: 10.1007/s00190-013-0671-y.
- Panet, I., Flury, J., Biancale, R., Gruber, T., Johannessen, J., van den Broeke, M.R., van Dam, T., Gegout, P., Hughes, C., Ramillien, G., Sasgen, I., Seoane, L., Thomas, M. (2013): Earth System Mass Transport Mission (e.motion): A Concept for Future Earth Gravity Field Measurements from Space. *Surveys in Geophysics*, 34(2), 141-163, Springer, doi: 10.1007/s10712-012-9209-8.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J.K. (2012): The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *J. Geophys. Res.*, 117, B04406, 38, doi:10.1029/2011JB008916.
- Plag, H.-P., Pearlman, M. (eds.) (2009): *Global Geodetic Observing System – Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020*. Springer Berlin Heidelberg, doi: 10.1007/978-3-642-02687-4.
- Reigber, C., Balmino, G., Schwintzer, P., Biancale, R., Bode, A., Lemoine, J.-M., Koenig, R., Loyer, S., Neumayer, H., Marty, J.C., Barthelmes, F., Perossanz, F. (2002): A high quality global gravity field model from CHAMP GPS tracking data and accelerometry (EIGEN-1S). *Geophysical Research Letters*, 29, 14, http://dx.doi.org/10.1029/2002GL015064.
- Rio, M.-H., Mulet, S., Picot N. (2014): Beyond GOCE for the ocean circulation estimate: Synergetic use of altimetry, gravimetry, and in situ data provides new insight into geostrophic and Ekman currents. *Geophysical Research Letters*, 41(24), 8918–8925, doi: 10.1002/2014GL061773.
- Rummel, R. (2013): Height unification using GOCE; *Journal of Geodetic Science*. Vol. 2012, Nr. 2, Heft 4, 355-362, Versita, doi: 10.2478/v10156-011-0047-2.
- Sampietro, D., Reguzzoni, M., Braitenberg, C. (2014): The GOCE Estimated Moho Beneath the Tibetan Plateau and Himalaya. In Rizos, C., Willis, P. (eds.), *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet*, International Association of Geodesy Symposia Volume 139, 2014, 391-397, 10.1007/978-3-642-37222-3_52.
- Shepherd, A., Ivins, E. R., Geruo, Barletta, V. R., Bentley, M. J., Bettadpur, S., Briggs, K. H., Bromwich, D. H., Forsberg, R., Galin, N., Horwath, M., Jacobs, S., Joughin, I., King, M. A., Lenaerts, J. T. M., Li, J., Ligtenberg, S. R. M., Luckman, A., Luthcke, S. B., McMillan, M., Meister, R., Milne, G., Mouginot, J., Muir, A., Nicolas, J. P., Paden, J., Payne, A. J., Pritchard, H., Rignot, E., Rott, H., Sandberg Sorensen, L., Scambos, T. A., Scheuchl, B., Schrama, E. J. O., Smith, B., Sundal, A. V., van Angelen, J. H., van de Berg, W. J., van den Broeke, M. R., Vaughan, D. G., Velicogna, I., Wahr, J., Whitehouse, P. L., Wingham, D. J., Yi, D., Young, D., Zwally, H. J. (2012): A Reconciled Estimate of Ice-Sheet Mass Balance, *Science*, 338(6111), 1183-1189, doi: 10.1126/science.1228102.
- Tapley, B.D., Bettadpur, S., Watkins, M., Reigber, C. (2004): The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31(9), L09607, American Geophysical Union, http://dx.doi.org/10.1029/2004GL019920.
- Tiwari, V.M., Wahr, J., Swenson, S. (2009): Dwindling groundwater resources in northern India, from satellite gravity observations. *Geophysical Research Letters*, 36, L18401, doi: 10.1029/2009GL039401.
- van der Meijde, M., Julià, J., Assumpção, M. (2013): Gravity derived Moho for South America. *Tectonophysics*, 609, 456-467, http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.03.023.
- Velicogna, I., Sutterley, T.C., van den Broeke M.R. (2014): Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data. *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1002/2014GL06105.
- Wiese, D., Folkner, W. and Nerem, R. (2009): *Alternative Mission Architectures for a Gravity Recovery Satellite Mission*. *Journal of Geodesy*, 83: 569-581, http://dx.doi.org/10.4236/jig.2014.53027.

Anschrift des Autors

Univ.-Prof. Dr. Roland Pail, Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie, TU München, Arcisstraße 21, 80333 München, Deutschland.

E-mail: pail@bv.tum.de