



GOCE goes application – Status und Erkenntnisgewinn

Roland Pail, München

Kurzfassung

Die ESA-Schwerefeldmission GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) vermisst seit Oktober 2009 das globale Schwerefeld der Erde. Die wissenschaftliche Datenauswertung und Schwerefeldmodellierung wird im Rahmen des ESA-Projektes „GOCE High-Level Processing Facility (HPF)“ durchgeführt. Die bislang veröffentlichten drei GOCE-Schwerefeldmodelle, die auf ca. 2/6/12 Monaten GOCE-Daten beruhen und unter Anwendung der „time-wise“-Methode berechnet wurden, zeigen kontinuierlich verbesserte Genauigkeiten. Die dritte Version erreicht globale Genauigkeiten von ca. 4.5 cm in Geoidhöhe und ca. 1.35 mGal hinsichtlich Schwereanomalien bei einer räumlichen Auflösung von 100 km räumlicher Wellenlänge. Eine weitere Verbesserung ist durch einen gesicherten Missionsbetrieb bis Dezember 2012 gewährleistet. Neben diesen ausschließlich auf GOCE-Daten basierenden Modellen führt eine im Rahmen der GOCO-Initiative durchgeführte konsistente Kombination mit komplementärer Schwerefeldinformation zu weiteren Verbesserungen sowohl im langwelligen Bereich (durch GRACE und SLR) als auch in hohen Frequenzen durch terrestrische Schwerefeldinformation und Daten der Satellitenaltimetrie über den Ozeanen. Viele Anwendungen im Bereich der Geodäsie, Ozeanographie und Geophysik profitieren schon jetzt von dem sich durch die neuen GOCE-Modelle ergebenden Erkenntnisgewinn. Am Beispiel der Ableitung globaler Transportprozesse in den Ozeanen durch Kombination von Satellitenaltimetrie und Schwerefeld kann demonstriert werden, dass GOCE signifikant zu einem besseren Verständnis von Prozessen im System Erde beitragen kann.

Schlüsselwörter: GOCE, Erdschwerefeld, Schwerefeldmodellierung, Kombinationslösungen, Schwerefeldanwendungen

Abstract

Since October 2009 ESA's dedicated satellite gravity mission GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) observes the global gravity field of the Earth. The scientific data processing and gravity field modelling is performed in the frame of the ESA project „GOCE High-Level Processing Facility (HPF)“. Up to now, three releases of GOCE gravity field models, which are based on approximately 2/6/12 months of GOCE data, have been processed applying the time-wise method. The third release achieves global geoid height accuracies of 4.5 cm and gravity anomaly accuracies of 1.35 mGal at a spatial wavelength of 100 km. Further improvement is expected, because the operation of the GOCE mission has been extended to at least December 2012. In addition to these pure GOCE-only models, in the frame of the GOCO initiative consistent combined gravity field models are processed by including GRACE and SLR data (improving the long wavelengths), as well as terrestrial gravity information and satellite altimetry (improving the high-frequency component). Numerous fields of applications in geodesy, oceanography and geophysics can benefit already now from the new GOCE models. As an example, the derivation of global ocean transport processes from a combination of satellite altimetry and global gravity information demonstrates that GOCE can contribute significantly to an improved understanding of processes in system Earth.

Keywords: GOCE, Earth's gravity field, gravity field modelling, combined solutions, gravity field applications

1. Einleitung

Die Satelliten-Schwerefeldmission GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer; Abb. 1), eine Earth Explorer Mission der ESA, wurde am 17. März 2009 erfolgreich in eine extrem niedrige Umlaufbahn von ca. 255 km gebracht und liefert seit Oktober 2009 operationelle Messdaten. Hauptziel von GOCE ist die Bestimmung des globalen Schwerefeldes der Erde mit hoher Genauigkeit und räumlicher Auflösung. Missionsspezifikationen sind 2 cm Genauigkeit des globalen Geoids und 1 mGal

hinsichtlich Schwereanomalien bei einer räumlichen Wellenlänge von 100 km ([6]).

Das Messkonzept von GOCE basiert auf Sensorfusion: Der langwellige Anteil des globalen Schwerefeldes wird aus der Analyse hochgenauer Bahninformation gewonnen (satellite-to-satellite tracking in high-low mode; hl-SST). Dabei kann die Bahn des GOCE-Satelliten mittels kontinuierlicher GPS-Ortung mit einer 3D-Positionsgenauigkeit von ca. 2 cm bestimmt werden ([3]). Das Kerninstrument des GOCE-Satelliten ist das weltweit erstmals gebaute und eingesetzte



Abb. 1: GOCE-Satellit in seiner Umlaufbahn um die Erde (Quelle: AOES Medialab)

Gravitations-Gradiometer. Mittels des Verfahrens der Satelliten-Gravitationsgradiometrie (SGG), also der Beobachtung zweiter Ableitungen des Gravitationspotentials, werden die mittel- bis kurzwelligen Anteile des Erdschwerefeldes gemessen. Daneben leistet das Gradiometer auch die Messung der auf den Satelliten wirkenden nicht-konservativen Kräfte, wie z. B. Luftwiderstand oder Solardruck. Diese werden mittels Ionenstrahltriebwerken aktiv kompensiert, sodass sich der Satellit im freien Fall um die Erde bewegt. Nur diese Kompensation des auf den Satelliten wirkenden Luftwiderstands ermöglicht die extrem niedrige Flughöhe von nur ca. 255 km und damit eine Messung möglichst nahe am Untersuchungsobjekt Erde, um eine hohe räumliche Auflösung der Detailstrukturen des Erdschwerefeldes zu erzielen.

In diesem Beitrag sollen der aktuelle Status der GOCE-Mission und die bislang erzielten Ergebnisse präsentiert werden. Weiters werden exemplarisch einige wichtige Anwendungsfelder von GOCE-Schwerefeldmodellen und der daraus ableitbare Erkenntnisgewinn diskutiert und ein kurzer Ausblick hinsichtlich noch zu erwartender Verbesserungen gegeben.

2. Das globale Erdschwerefeld, GOCE-Beobachtungsgrößen und Modellierungsstrategien

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

$$V(r, \vartheta, \lambda) = \frac{GM}{R} \sum_{n=0}^L \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \cdot \quad (1)$$

$$\sum_{m=-n}^n \bar{P}_{nm}(\cos \vartheta) [\bar{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda)]$$

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 ist es also, die Koeffizienten der Reihenentwicklung $\{\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}\}$ sowie zugehörige Genauigkeitsinformation bis zu einem maximalen Grad der Reihenentwicklung L bestmöglich aus den GOCE-Beobachtungen zu schätzen. Letztere sind Funktionale des Gravitationspotentials V . Gemessen werden – neben kinematischen GPS-Orbits – die Gravitationsgradienten, also zweite räumliche Ableitungen des Potentials

$$V_{ij} = \frac{\partial^2 V}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (2)$$

in einem lokalen, rotierenden Referenzrahmen, dessen Achsen x_i , mit $i, j = X, Y, Z$, nach den Gradiometer-Achsen ausgerichtet sind und von einem idealen radial ausgerichteten Referenzrahmen um $3-5^\circ$ abweichen ([22]). Abbildung 2 zeigt das spektrale Verhalten des Gradiometer-Rauschens als Leistungsdichtespektrum für alle sechs Gradiometrie-Komponenten V_{ij} . Das Gradiometer besteht aus sechs 3D-Beschleunigungsmessern, die je zwei hochgenaue und eine um einen Faktor von ca. 1000 weniger genaue Messrichtung aufweisen. Aufgrund der speziellen Anordnung innerhalb des Gradiometers unterscheiden sich die sechs Gradiometrie-Komponenten hinsichtlich der Rauschamplituden eklatant. Nur die Komponenten V_{XX} , V_{YY} , V_{ZZ} und V_{XZ} weisen eine hohe Messgenauigkeit innerhalb der Messbandbreite von 5-100 mHz auf, da in diese nur Messungen entlang der hochgenauen Achsen der Beschleunigungsmesser eingehen ([22]).

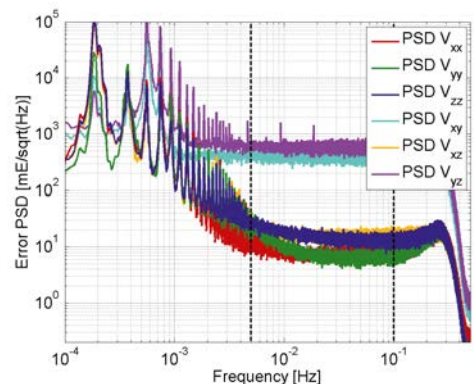


Abb. 2: Leistungsdichtespektrum des Rauschens der sechs GOCE-Gradiometrie-Komponenten

GOCE-Schwerefeldmodelle werden im Rahmen des ESA-Projekts “High-Level Processing Facility” ([20]), einem Konsortium aus 10 europäischen Universitäten und Forschungseinrichtungen, berechnet. Aufgrund der Tatsache, dass GOCE ein völlig neuartiges Messsystem darstellt, werden von drei Teilkonsortien unabhängige und komplementäre Prozessierungsstrategien angewendet, die als „direct method“ (DIR; [4]), „time-wise method“ (TIM; [17]) und „space-wise method“ (SPW; [15]) bezeichnet werden. Einen Überblick über diese unterschiedlichen Ansätze und eine Bewertung und Validierung der damit erzielten Ergebnisse findet sich in [16]. Die in diesem Beitrag vorwiegend dargestellten TIM-Modelle werden in einer Kooperation von TU Graz, Universität Bonn und TU München berechnet.

3. GOCE-Schwerefeldmodelle

Im Rahmen der „time-wise“-Methode werden volle Normalgleichungen für SST-hl und SGG aufgestellt und optimal miteinander kombiniert. Für ein Modell bis Grad/Ordnung $L = 250$ werden also ca. 63 000 Parameter und die zugehörige Genauigkeitsinformation in Form einer vollen Varianz-Kovarianz-Matrix (VKM) mittels einer strengen Ausgleichung ermittelt. Ein Kernelement der SGG-Prozessierung ist die korrekte stochastische Modellierung des farbigen Rauschverhaltens aller Gradiometrie-Komponenten V_{ij} ([12]; siehe Abb. 2) sowie der Bahnfehler der kinematischen Orbits. Die Lösungen sind hinsichtlich der (nahe-)zonalen Koeffizienten sowie den Koeffizienten der Grade $n > 180$ Kaula-regularisiert.

Ein Spezifikum dieser TIM-Schwerefeldmodelle ist die Tatsache, dass sie völlig unabhängig von externer Schwerfeldinformation sind und somit ausschließlich auf GOCE-Daten basieren. Es wird kein externes Referenzmodell benutzt, und auch die Regularisierung wird gegen ein Nullmodell durchgeführt. Damit eignen sich diese TIM-Modelle hervorragend für eine konsistente Kombination mit externer, komplementärer Schwerfeldinformation (siehe Abschnitt 4). Details zur TIM-Strategie finden sich in [16], [17].

Bislang wurden drei TIM-Schwerefeldmodelle berechnet und der Nutzergemeinde zur Verfügung gestellt (icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/). Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die wesentlichsten Eigenschaften dieser Modelle: den maximalen Entwicklungsgrad L , die zugrunde liegende Datenperiode und die effektiv verwendete

Anzahl von Beobachtungsepochen (nach Reduktion von Datenlücken und Ausreißern).

Modell	Max. Grad	Datenperiode	# Epochen (in Mio.)
TIM_R1	224	01/11/2009 – 11/01/2010	6.2
TIM_R2	250	01/11/2009 – 05/07/2010	19.5
TIM_R3	250	01/11/2009 – 17/04/2011	31.3

Tabelle 1: Charakteristika der drei GOCE-TIM-Schwerefeldmodelle

Abbildung 3 zeigt als Maß für die erzielten Genauigkeiten die Gradmediane der formalen Fehler:

$$\sigma_n = \text{median}_m \left\{ \sigma_{\bar{c}_{nm}}, \sigma_{\bar{s}_{nm}} \right\} \quad (3)$$

Sie illustriert die kontinuierliche Steigerung der erzielbaren Genauigkeit bei Inkludierung von mehr und mehr GOCE-Daten. Die Verbesserungen gehorchen näherungsweise dem Gaußschen Gesetz unkorrelierter Beobachtungen gemäß \sqrt{N} . Der Genauigkeitssprung von TIM_R1 zu TIM_R2, das ca. die dreifache Datenmenge enthält, ist also in etwa $\sqrt{3}$, TIM_R3 zeigt gegenüber TIM_R2 eine weitere Genauigkeitssteigerung fast um $\sqrt{2}$.

Diverse externe Validierungen zeigen, dass aufgrund der realistischen stochastischen Modellierung aller Beobachtungskomponenten, die als Gewichtung in die Ausgleichung eingehen, die sich ergebenden formalen Fehler eine sehr realistische Schätzung für die wahren Genauigkeiten der TIM-Schwerefeldmodelle sind. Abbildung 4 zeigt die globale Verteilung von Geoidhöhenungenauigkeiten bei Grad/Ordnung $L = 200$,

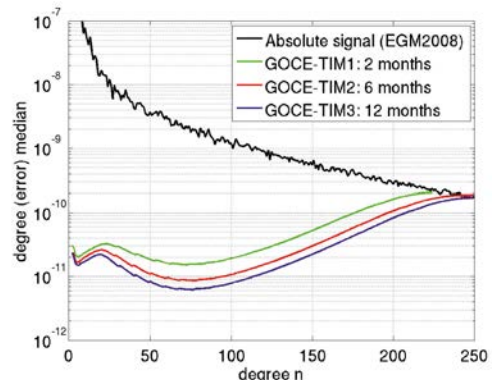


Abb. 3: Fehlermediane je harmonischen Grad der 3 TIM-Schwerefeldlösungen

die sich durch strenge Kovarianzfortpflanzung basierend auf der vollen Koeffizienten-VKM ergeben. Die leichte Asymmetrie bezüglich des Äquators resultiert aus der GOCE-Orbitkonfiguration und einer etwas größeren mittleren Orbithöhe über der Südhemisphäre. Die charakteristische Struktur südlich von Australien in TIM_R2 und TIM_R3 spiegelt Datenprobleme der V_{YY} -Komponente wider. Diese Messungen wurden regional eliminiert, sodass sich hier eine geringe Anzahl von Beobachtungen ergibt.

Neben der Betrachtung der reinen formalen Fehler ist zur Beurteilung der Güte eines Schwerfeldes natürlich auch der Vergleich mit exter-

ner Schwerfeldinformation erforderlich. Abbildung 5 zeigt Schweranomalie-Differenzen bis Grad/Ordnung $L=200$ zum unabhängigen globalen Schwerfeldmodell EGM2008 ([19]), das vor allem auf GRACE-Satellitendaten, terrestrischer Schwerfeldinformation und Satellitenaltimetrie über den Ozeanen basiert, also noch keine GOCE-Information enthält. Generell ist zu beobachten, dass die Differenzen in Regionen, wo schon bislang sehr gute Schwerfeldinformation vorhanden war, also z. B. in Nordamerika, Australien, Europa und teilweise auch den Ozeanen, durch Inkludierung von mehr und mehr GOCE-Daten kleiner werden. Detailanalysen zeigen, dass die schrittweisen Verbesserungen in diesen Regionen tatsächlich konsistent mit der Verringerung der formalen Fehler gemäß \sqrt{N} sind. Daraus lässt sich auch folgern, dass die TIM-GOCE-Modelle keine signifikanten systema-

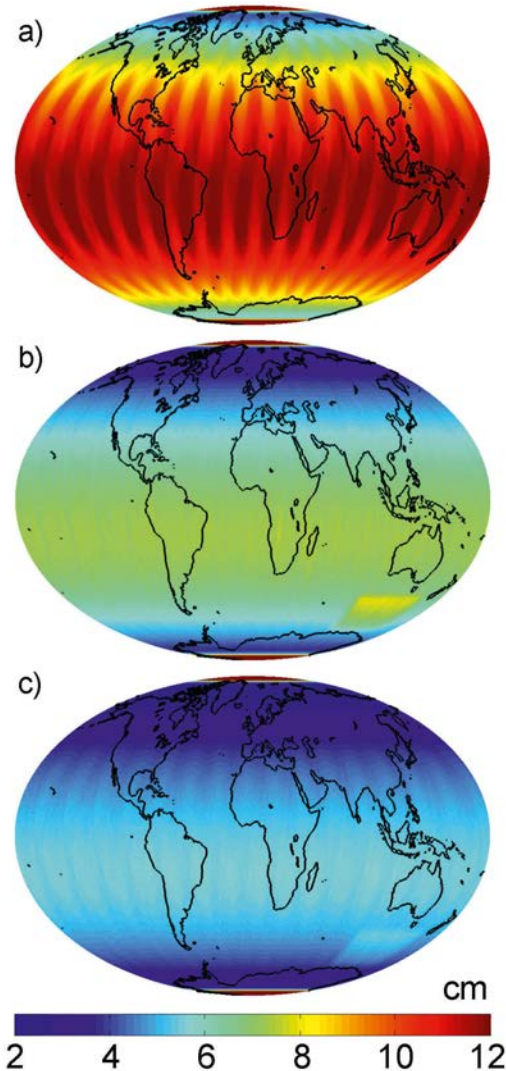


Abb. 4: Geoidhöhenfehler der TIM-Schwerfeldmodelle bei Grad/Ordnung 200: a) TIM_R1; b) TIM_R2; c) TIM_R3

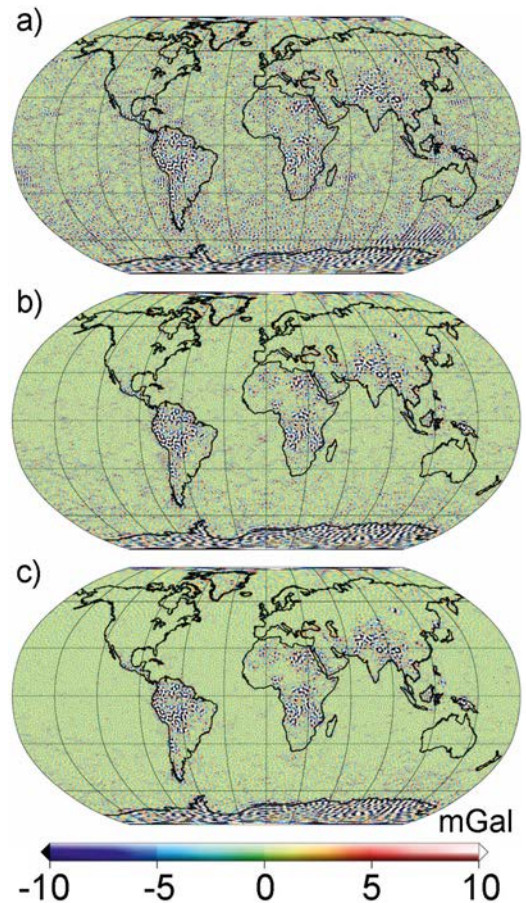


Abb. 5: Differenzen der 3 TIM-Schwerfeldlösungen zu EGM2008 bis Grad/Ordnung 200: a) TIM_R1; b) TIM_R2; c) TIM_R3

tischen Fehleranteile enthalten. Außerdem sind in einigen Regionen signifikante Unterschiede zu EGM2008 erkennbar, die bei umfangreichere GOCE-Datenmenge umso deutlicher werden. Es handelt sich dabei um Regionen, die auch für die geophysikalische Interpretation und Modellierung von hohem Interesse sind, wie z. B. Himalaya, die Subduktionszone in Südamerika oder der Ostafrikanische Grabenbruch. In diesen Gebieten, in denen bislang kaum oder nur schlechte terrestrische Schwerefeldmessungen vorhanden waren, liefert GOCE also gänzlich neue Schwerefeldinformation.

Eine weitere Möglichkeit der externen Validierung besteht im Vergleich der GOCE-Modelle mit aus Präzisionsnivellement und Langzeit-GPS-Beobachtungen ermittelten „direkten“ Geoidbeobachtungen ([8]). Exemplarisch wird dies in Abbildung 6 für 673 Stationen in Deutschland für einen maximalen Entwicklungsgrad von $L=190$ gezeigt. Neben den drei TIM-Lösungen wurde auch das aktuelle Bonner GRACE-Modell ITG-Grace2010S ([14]; hier nur bis zum maximalen Grad $L=180$ dieses Modells) dieser Validierung unterzogen.

Auch hier zeigt sich, dass die GOCE-Lösungen durch größere Datenvolumina immer besser

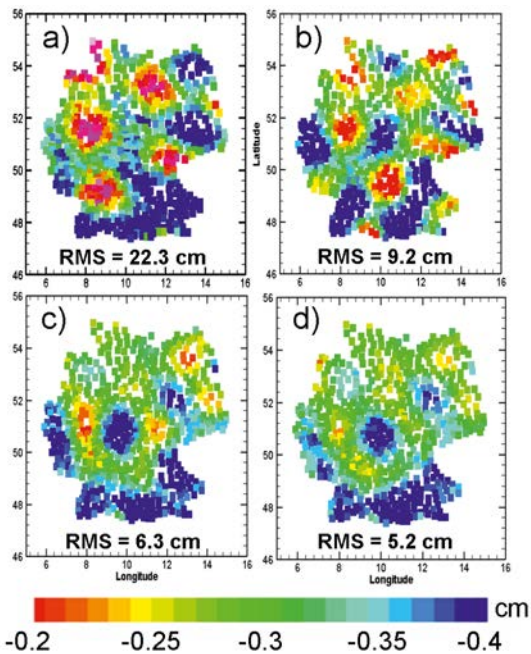


Abb. 6: Geoidhöhendifferenzen an 673 GPS/Nivellementpunkten in Deutschland, evaluiert bis Grad/Ordnung 190: a) ITG-GRACE2010S, b) TIM_R1; c) TIM_R2; d) TIM_R3

werden. Zu beachten ist dabei, dass die Ungenauigkeit der GPS/Nivellementbeobachtungen selbst mit ca. 3-4 cm angenommen werden kann. Mittlerweile stellte sich im Rahmen neuer Messungen im Rahmen der Generierung des neuen Deutschen Haupthöhennetzes DHHN 2006-2011 heraus, dass das charakteristische Minimum in Zentraldeutschland auf einen systematischen Fehler im Nivellement zurückzuführen ist und die neue Version in dieser Region wesentlich konsistenter zu GOCE sein wird. Daraus kann geschlossen werden, dass mit GOCE mittlerweile global (!) ein Genauigkeitsniveau erreicht wird, um damit terrestrische Präzisionsnivellements validieren zu können.

4. Kombinationmodelle

Im Rahmen der Projektinitiative GOCO („Gravity Observation Combination“) wird an einer konsistenten Kombination von GOCE mit komplementärer Schwerefeldinformation gearbeitet. Mit dem Modell GOCO01S konnte die weltweit erste Kombinationslösung aus GRACE und GOCE berechnet werden ([18]). Das Nachfolgemodell GOCO02S ([7]) enthält neben 7 Jahren GRACE auch Normalgleichungen basierend auf 8 Jahren CHAMP und 5 Jahren Satellite Laser Ranging (SLR) zu 5 Satelliten. Abbildung 7 zeigt die formalen Fehler des Modells GOCO02S sowie seiner beiden Hauptbeiträge GOCE (entsprechend der Datenbasis des TIM_R2-Modells) und GRACE (Normalgleichungen von ITG-Grace2010S). Es ist deutlich zu erkennen, dass GRACE aufgrund der Messtechnologie des Mikrowellen-Trackings zwischen zwei einander in ca. 200 km Abstand auf derselben Bahnspur folgenden Satelliten in den niedrigen bis mittleren Graden n überlegen ist, während GOCE in den hohen Graden dominiert. Die anderen Beobachtungskomponenten CHAMP und SLR spielen nur eine untergeordnete Rolle. GOCO02S ist eine optimale Kombinationslösung aus all diesen in Summe ca. 280 Millionen satellitenbasierten Schwerefeldbeobachtungen. Am Nachfolgemodell GOCO03S wird derzeit gearbeitet.

Neben reinen Satellitenmodellen wird im Rahmen von GOCO auch an Kombinationsmodellen mit terrestrischer Schwerefeldinformation und Satellitenaltimetrie gearbeitet. Ziel ist hier, ein kombiniertes globales Schwerefeldmodell basierend auf vollen Normalgleichungen bis zum maximalen Grad 720 (ca. 520 000 Unbekannte) zu berechnen ([5]). Eine erste GOCO-C-Lösung wird für Ende 2012 angestrebt.

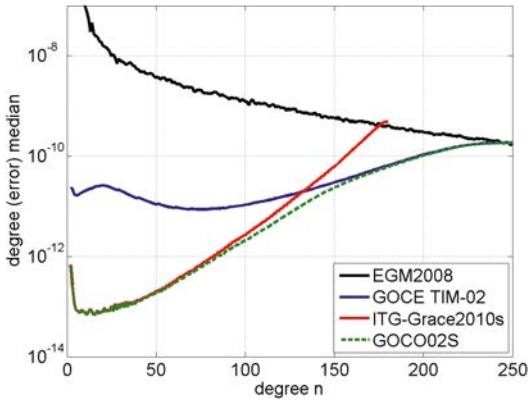


Abb. 7: Fehlermediane je Grad des Schwerefeldmodells GOCO02S (grün) und seiner beiden Hauptbeiträge GRACE (rot) und GOCE (blau)

5. GOCE-Anwendungen

Die neuen GOCE-Schwerefeldmodelle finden zahlreiche Anwendungsfelder. In der Geodäsie kann GOCE unter anderem dazu beitragen, nationale Höhensysteme zu vereinheitlichen und an ein global konsistentes Höhensystem zu koppeln ([21]). Im Bereich der Geophysik liefert GOCE Randwerte zur Modellierung von Strukturen und Prozessen der Lithosphäre ([9]) und kann zur Schätzung von Grenzflächen, wie z. B. der Moho, genutzt werden ([25]). Eines der wichtigsten geowissenschaftlichen Anwendungsgebiete ist die Ozeanographie, wo die statische Schwerefeldinformation, kombiniert mit Langzeitmessungen des mittleren Meeresniveaus mittels Satellitenaltimetrie, zur Berechnung der mittleren dynamischen Ozeantopographie und damit der geostrophischen Oberflächenströmungen der Ozean verwendet wird ([2], [11]). Erstmals ist es damit also möglich, ausschließlich aus (Satelliten-)Messungen globale Transportprozesse in den Ozeanen in hohem Detailgrad bis zu Wellenlängen von 100 km direkt zu beobachten. Dies soll hier exemplarisch erläutert werden.

Die (geodätische) mittlere dynamische Topographie (MDT) H ist definiert als die Differenz zwischen dem mittleren Meeresniveau h und dem statischen Geoid N : $H = h - N$. Zweites kann aus globalen Schwerefeldmodellen berechnet werden. Die geostrophischen Oberflächengeschwindigkeiten können dann aus einer vereinfachten Form der Navier-Stokes-Gleichung berechnet werden, wobei Beschleunigungs- und Reibungsterme sowie horizontale Druckgradienten in der Atmosphäre vernachlässigt wurden:

$$u = -\frac{\gamma}{f} \frac{1}{R} \frac{\partial H}{\partial \vartheta} \quad (4)$$

$$v = \frac{\gamma}{f} \frac{1}{R \sin \vartheta} \frac{\partial H}{\partial \lambda}$$

Hier bezeichnet $f = 2\Omega \cos \vartheta$ den Coriolis-Term und Ω die Erddrehrate. Man beachte, dass die Ostkomponente u durch Differentiation der MDT bezüglich der (Ko-)Breite ϑ und die Nordkomponente v durch Differentiation bezüglich der Länge λ erhalten wird. Physikalisch betrachtet bedeutet dies, dass die Ozeanströmungen nicht von höheren zu niedrigeren Werten der MDT fließen, sondern entlang ihrer Isolinien. Der nicht-geostrophe Anteil ist vergleichsweise sehr klein, daher sind geostrophe Geschwindigkeiten eine sehr gute Näherung für totale Ozeanströmungsgeschwindigkeiten.

Die MDT und Strömungsgeschwindigkeiten wurden aus dem mittleren Meeresniveau des Modells DGF110 ([1]), das aus Daten der mehrerer Satellitenaltimetrie-Missionen für die Periode Oktober 1992 bis April 2010 abgeleitet wurde, und verschiedenen Schwerefeldmodellen berechnet. Um spektrale Konsistenz zu gewährleisten, wurde allen Daten durch Anwendung eines Gauss-Filters ([10]) auf eine einheitliche Wellenlänge entsprechend Grad/Ordnung 180 gebracht. Die Resultate werden verglichen mit in-situ mittels Schwimmbojen gemessenen Geschwindigkeiten, die im Rahmen des Projekts „Drifter Data Assembly Center“, einem Segment des von NOAA und AOML koordinierten „Global Drifter“ Programms, kompiliert wurden ([13]). In Abbildung 8 sei hier exemplarisch das Ergebnis für den Golfstrom gezeigt. Als statisches Schwerefeldmodell wurden entweder das GRACE-Modell ITG-Grace2010S (a) oder das GOCE-Modell TIM_R3 (b) verwendet. Während bei der Verwendung von GRACE noch deutliche numerische Artefakte zu erkennen sind, gibt GOCE die Strömungsgeschwindigkeiten des Golfstroms sehr sauber und deutlich wider. Auch ein Vergleich mit den Schwimmer-Daten (c) zeigt gute Konsistenz. Ein Teil der verbleibenden Differenzen (d) ist auch darauf zurückzuführen, dass die Schwimmer-Daten nur punktweise Beobachtungen und keine flächige Information liefern, sodass die räumliche Auflösung dieser Schwimmer-Daten dadurch limitiert ist.

6. GOCE: Status und Ausblick

Die ursprüngliche nominelle Missionsphase von GOCE war bis April 2011 geplant. Aufgrund des großen Erfolges und der sich schon jetzt

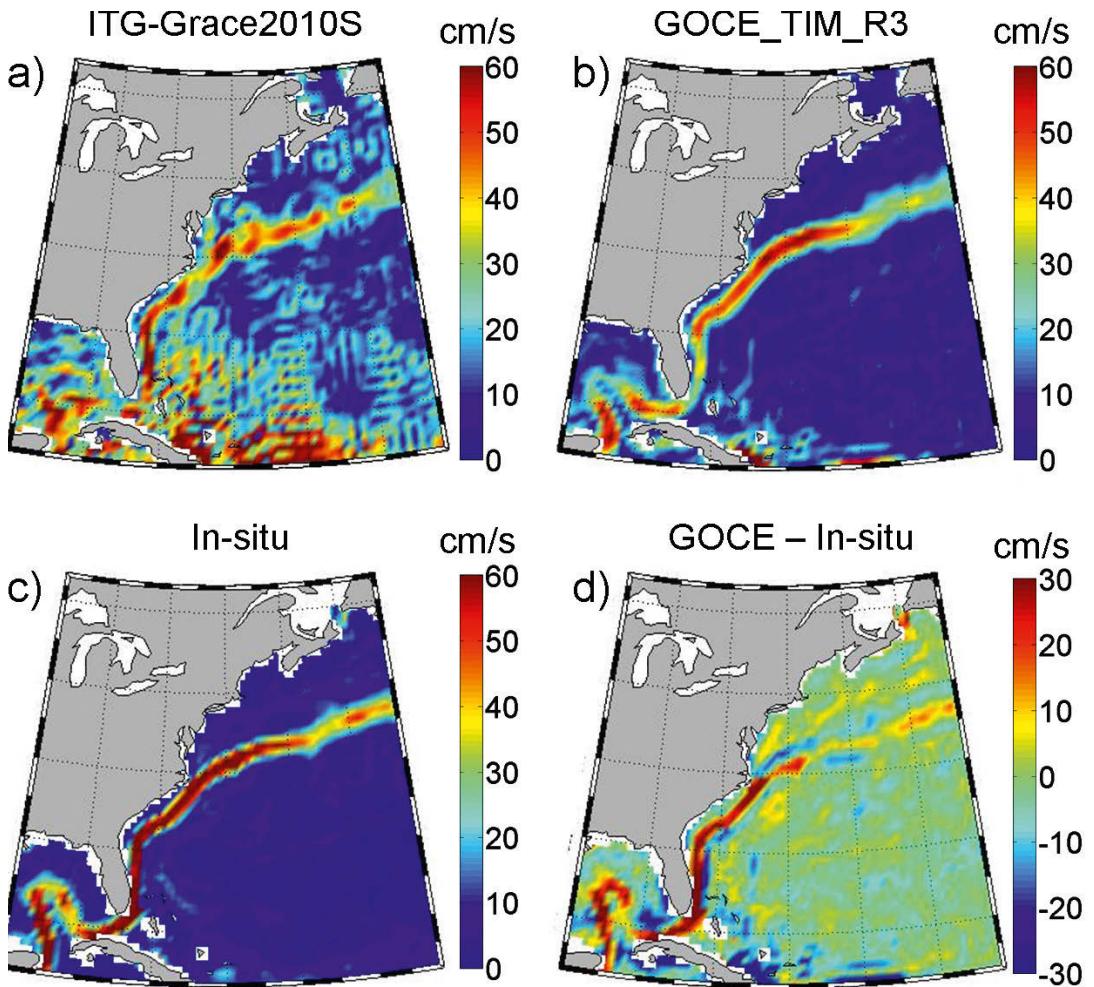


Abb. 8: Ozeanströmungsgeschwindigkeiten, abgeleitet aus geodätischer MDT basierend auf dem mittleren Meeressniveau DGF12010 und: a) ITG_GRACE2010S; b) GOCE_TIM_R3. c) Strömungsgeschwindigkeiten aus in-situ Schwimmerdaten; d) Differenz zwischen GOCE_TIM_R3 und Schwimmerdaten

abzeichnenden vielversprechenden Ergebnisse wurde die GOCE-Mission bis mindestens Dezember 2012 verlängert.

Abbildung 9 zeigt die aktuell mit GOCE erzielbaren Genauigkeiten in Form von kumulativen Schwereanomalienfehlern, sowie eine Vorhersage unter der Annahme kontinuierlicher Messungen bis Ende 2012. Mit dem Modell TIM_R3 (blau) wird bei Grad/Ordnung 200 (= 100 km halbe Wellenlänge) eine Genauigkeit von 1.35 mGal erreicht. Laut der hochgerechneten Genauigkeit für Ende 2012 (schwarz) wird mit 0.8 mGal die Missionsspezifikation von 1 mGal deutlich unterschritten werden können. Eine ähnliche Analyse für Geoidhöhenfehler zeigt, dass die Missionsspezifikation von 2 cm auch Ende

2012 nicht ganz erreicht werden kann, es wird eine globale Geoidhöhen-Genauigkeit von 2.9 cm zu erzielen sein.

Potential für weitere Genauigkeitssteigerungen ergibt sich dadurch, dass die Gradienten-Vorprozessierung modifiziert wurde, was signifikant verbesserte Gradientenprodukte insbesondere im Bereich langer bis mittlerer Wellenlängen erwarten lässt. Die von [23] entwickelten Algorithmen wurden in den offiziellen Prozessor der ESA implementiert ([24]). Sämtliche Missionsdaten seit 2009 werden nun reprozessiert und der Nutzergemeinde zur Verfügung gestellt. Diese reprozessierten Daten werden dann auch für die nächsten Schwerefeldmodelle verwendet werden.

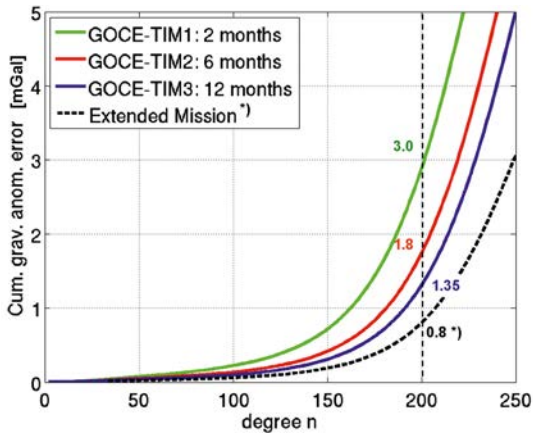


Abb. 9: Kumulative Schwereanomalie-Fehler je Grad n der 3 TIM-Schwerefeldmodelle und Prädiktion für Missionsbetrieb bis Ende 2012

Aus heutiger Sicht ist ein Weiterbetrieb von GOCE auch nach 2012 möglich. Wenn die Vorschläge für die zukünftige Sonnenaktivität und – damit direkt korreliert – die Atmosphärendichte eintreffen, wird GOCE Ende 2012 noch Treibstoff für ein weiteres Jahr Missionsbetrieb in einer mittleren Orbithöhe von 255 km haben. Es gibt allerdings auch Überlegungen, einen kürzeren Zeitraum in einer um 10 bis 20 km niedrigeren Höhe zu fliegen, um damit noch näher am Untersuchungsobjekt Erde zu sein und damit noch höhere Auflösungen zu erzielen. Simulationen zur Abschätzung von Nutzen und Risiken sind im Gange.

7. Schlussfolgerungen

Aus den Daten der GOCE-Mission konnten globale statische Schwerefeldmodelle abgeleitet werden, deren Genauigkeit mit der Inkludierung von mehr und mehr GOCE-Daten kontinuierlich steigt. Schon heute werden die a priori definierten Missionsziele weitgehend erreicht. Eine konsistente Kombination von GOCE mit komplementärer Schwerefeldinformation führt zu weiteren Verbesserungen sowohl im langwelligen Bereich (durch GRACE und SLR), aber auch die räumliche Auflösung kann durch Kombination mit terrestrischer Schwerefeldinformation und Daten der Satellitenaltimetrie weiter gesteigert werden.

GOCE bedient zahlreiche Anwendungsfelder in der Geodäsie, Ozeanographie und Geophysik. Am Beispiel einer ozeanographischen Anwendung, nämlich der Ableitung globaler Transportprozesse in den Ozeanen, konnte eindrucksvoll demonstriert werden, dass GOCE zu einem besseren Verständnis des Erdsystems beiträgt und

damit eine wichtige Komponente des Globalen Geodätischen Beobachtungssystems (GGOS) darstellt.

Danksagung

Dank geht an die European Space Agency für die Bereitstellung der GOCE-Daten. Signifikante Teile dieser Arbeit sind im Rahmen des ESA-Projekts GOCE High-Level Processing Facility (Vertrag Nr. 18308/04/NL/MM) entstanden. Dank geht an die Projektpartner von GOCE HPF und GOCO. Dank geht ebenfalls an das Leibniz Rechenzentrum für die Bereitstellung umfangreicher Rechenkapazitäten.

Literatur

- [1] Albertella, A., Savcenko, R., Janjic, T., Rummel, R., Bosch, W., Schröter, J. (2012): First experiments with high resolution dynamic topography computation from GOCE. Submitted to Geophys. J. Int.
- [2] Bingham, R. J., Knudsen, P., Andersen, O., Pail, R. (2011): An initial estimate of the North Atlantic steady-state geostrophic circulation from GOCE. Geophys. Res. Lett., 38, EID L01606, American Geophysical Union, doi: 10.1029/2010GL045633.
- [3] 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. J. Geod., 85:11, 807–818, doi: 10.1007/s00190-011-0484-9.
- [4] Bruinsma, S.L., Marty, J.C., Balmino, G., Biancale, R., Förste, C., Abrikosov, O., Neumayer, H. (2010): GOCE Gravity Field Recovery by Means of the Direct Numerical Method. In: Lacoste-Francois H (ed.): Proceedings of the ESA Living Planet Symposium, ESA Publication SP-686, ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
- [5] Fecher, T., Pail, R., Gruber, T. (2011): Global gravity field determination by combining GOCE and complementary data. In: Ouwehand, L. (eds.): Proceedings of the 4th International GOCE User Workshop, ESA Publication SP-696, ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
- [6] Floberghagen, R., Fehring, M., Lamarre, D., Muzi, D., Frommknecht, B., Steiger, C., Piñeiro, J., da Costa, A. (2011): Mission design, operation and exploitation of the gravity field and steady-state ocean circulation explorer mission. J. Geod., 85:11, 749–758, doi: 10.1007/s00190-011-0498-3.
- [7] Goiginger, H., Höck, E., Rieser, D., Mayer-Gürr, T., Maier, A., Krauss, S., Pail, R., Fecher, T., Gruber, T., Brockmann, J.M., Krasbutter, I., Schuh, W.-D., Jäggi, A., Prange, L., Hausleitner, W., Baur, O., Kusche, J. (2011): The combined satellite-only global gravity field model GOCO02S. Presented at the 2011 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 4–8, 2011.
- [8] Gruber, T., Visser, P. N. A. M., Ackermann, C., Hosse, M. (2011): Validation of GOCE gravity field models by means of orbit residuals and geoid comparisons. J. Geod., 85:11, 845–860, Springer, doi: 10.1007/s00190-011-0486-7.
- [9] Hosse, M., Pail, R., Horwath, M., Mahatsente, R., Götze, H., Jahr, T., Jentzsch, M., Gutknecht, B.D., Köther,

- N., Lücke, O., Sharma, R., Zeumann, S. (2011): Integrated Modeling of Satellite Gravity Data of active Plate Margins - Bridging the Gap between Geodesy and Geophysics. Poster presented at AGU Fall Meeting 2011, San Francisco, October 8, 2011.
- [10] Jekeli, C. (1981): Alternative methods to smooth the earth's gravity field. OSU Report no. 327, D. Sci. & Surv., Ohio State University, Columbus, Ohio.
- [11] 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. *J. Geod.*, 85:11, 861–879, doi: 10.1007/s00190-011-0485-8.
- [12] Krasbutter, I., Brockmann, J. M., Kargoll, B., Schuh, W.-D., Goiginger, H., Pail, R. (2011): Refinement of the stochastic model of GOCE scientific data in a long time series. In: Ouwehand, L. (eds.): Proceedings of the 4th International GOCE User Workshop, ESA Publication SP-696, ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
- [13] Lumpkin, R., Pazos, M. (2006): Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: the instrument, its data, and some recent results. In: Griffo et al. (eds.): Lagrangian Analysis and Prediction of Coastal and Ocean Dynamics (LAPCOD), chapter 2, Cambridge University Press.
- [14] Mayer-Gürr, T., Kurtenbach, E., Eicker, A. (2010): ITG-Grace2010 Gravity Field Model. <http://www.igg.uni-bonn.de/apmg/index.php?id=itg-grace2010>.
- [15] Migliaccio, F., Reguzzoni, M., Sansò, F., Tscherning, C.C., Veicherts, M. (2010): GOCE data analysis: the space-wise approach and the first space-wise gravity field model. In: Lacoste-Francis H. (ed) Proceedings of the ESA Living Planet Symposium, ESA Publication SP-686, ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
- [16] Pail, R., Bruinsma, S., Migliaccio, F., Förste, C., Goiginger, H., Schuh, W.-D., Höck, E., Reguzzoni, M., Brockmann, J.M., Abrikosov, O., Veicherts, M., Fecher, T., Mayrhofer, R., Krasbutter, I., Sansò, F., Tscherning, C.C. (2011): First GOCE gravity field models derived by three different approaches. *J. Geod.*, 85:11, 819–843, doi: 10.1007/s00190-011-0467-x.
- [17] Pail, R., Goiginger, H., Mayrhofer, R., Schuh, W.-D., Brockmann, J.M., Krasbutter, I., Höck, E., Fecher, T. (2010): Global gravity field model derived from orbit and gradiometry data applying the time-wise method. In: Lacoste-Francis H. (ed.) Proceedings of the ESA Living Planet Symposium, ESA Publication SP-686, ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
- [18] Pail, R., Goiginger, H., Schuh, W.-D., Höck, E., Brockmann, J.M., Fecher, T., Gruber, T., Mayer-Gürr, T., Kusche, J., Jäggi, A., Rieser, D. (2010): Combined satellite gravity field model GOCO01S derived from GOCE and GRACE. *Geophys. Res. Lett.*, 37: EID L20314, American Geophysical Union, doi: 10.1029/2010GL044906.
- [19] Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor J. (2008). *An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008*. Presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18, 2008
- [20] Rummel, R., Gruber, T., Koop, R (2004): High Level Processing Facility for GOCE: Products and Processing Strategy. In: Lacoste H (ed.): Proceedings of the 2nd International GOCE User Workshop "GOCE, The Geoid and Oceanography", ESA SP-569, ESA, Noordwijk, The Netherlands.
- [21] Rummel, R., Ihde, J., Liebsch, G., Sideris, M., Rangelova, E., Woodworth, P., Hughes, C., Gerlach, C. (2011): GOCE's Impact on World Height System Unification. Poster presented at AGU Fall Meeting 2011, San Francisco, October 9, 2011.
- [22] Rummel, R., Yi, W., Stummer, C. (2011): GOCE gravitational gradiometry. *J. Geod.*, 85:11, 777–790, doi: 10.1007/s00190-011-0500-0.
- [23] Stummer, C., Fecher, T., Pail, R. (2011): Alternative method for angular rate determination within the GOCE gradiometer processing. *J. Geod.*, 85:9, 585–596, Springer, doi: 10.1007/s00190-011-0461-3.
- [24] Stummer, C., Siemes, C., Pail, R., Frommknecht, B., Floberghagen, R. (2012): Upgrade of the GOCE Level 1b gradiometer processor. *Advances in Space Research*, 49:4, 739–752, doi: 10.1016/j.asr.2011.11.027, 2012.
- [25] Tecla, G.E., van der Meijde, M., Nyblade, A.A., van der Meer, F.D. (2011): A crustal thickness map of Africa derived from a global gravity field model using Euler deconvolution. *Geophys. J. Int.*, 187:1, 1-9, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05140.x.

Anschrift des Autors

Univ.-Prof. Mag.rer.nat. Dr.techn. Roland Pail, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München, Arcisstraße 21, D-80333 München. E-mail: pail@bv.tum.de

Vortragender

Univ.-Prof. Dr. Roland Pail

- geb. 1972 Mariazell
- 1995 Magister der Naturwissenschaften (Geophysik), Universität Wien
- 1999 Doktorat an der TU Graz, Promotion sub auspiciis praesidentis
- 2002 Habilitation: Lehrbefugnis in Theoretischer Geodäsie, TU Graz
- 2002–2009 Universitätsdozent, TU Graz, Institut für Navigation und Satellitengeodäsie
- seit 2010 Universitätsprofessor, TU München, Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie

Forschungsschwerpunkte:

Satellitengeodäsie, Satellitengradiometrie, globale und regionale Erdschwerefeldbestimmung

Mehr als 65 Publikationen.

Auszeichnungen:

Josef-Krainer-Förderungspreis 2000, Allmer-Löschner-Preis der Österreichischen Geodätischen Kommission (ÖGK), Young Authors Award 2005 der International Association of Geodesy (IAG)