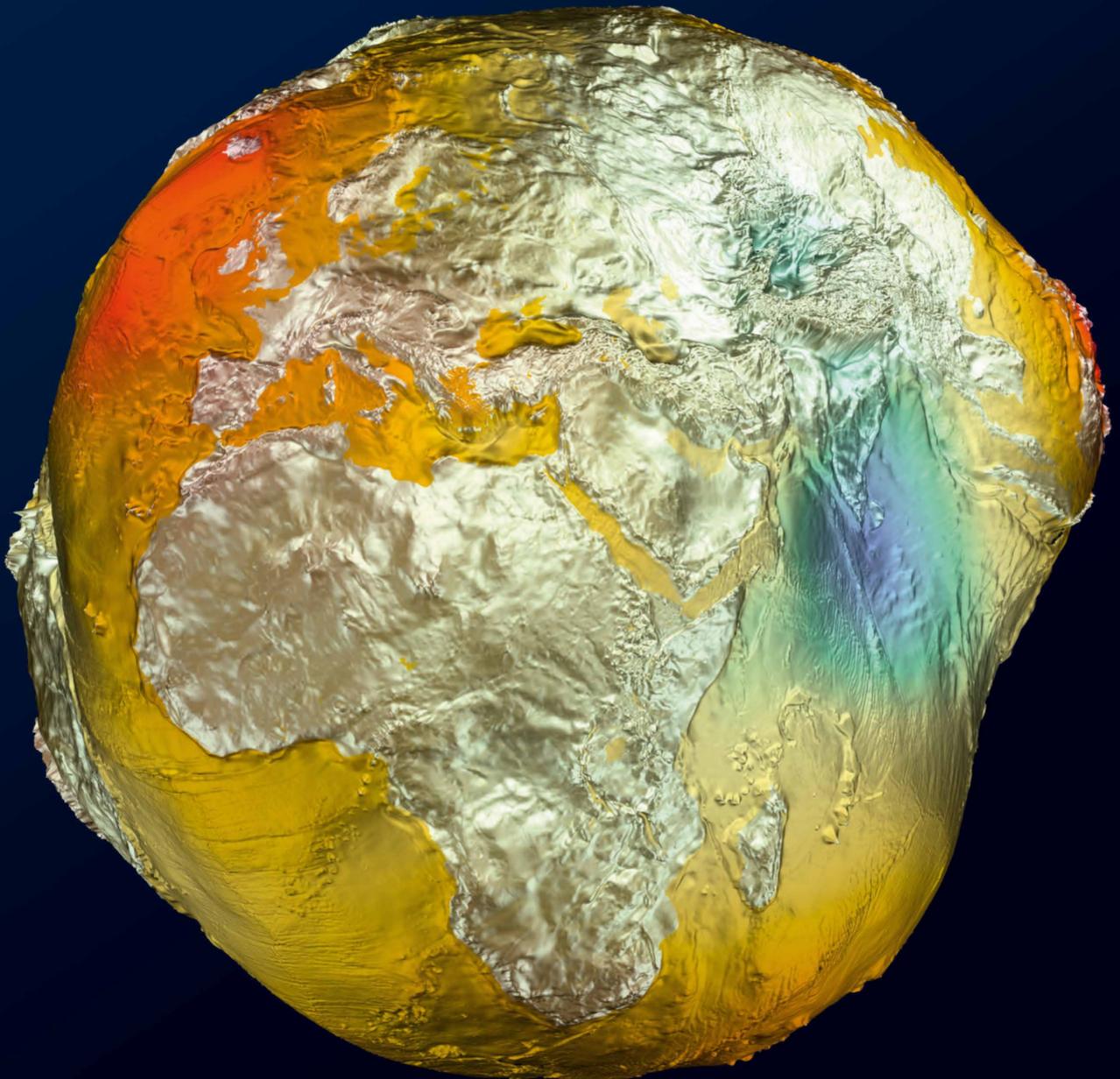


GFZ

Helmholtz-Zentrum
POTS DAM

Die Erde als Kartoffel

Das Potsdamer Geoid



Die Erde als Kartoffel

Aus dem Weltraum gesehen wirkt unsere Erde auf den ersten Blick wie eine Kugel. Aus geodätischen Messungen, die auch schon vor dem Satellitenzeitalter durchgeführt wurden, weiß man aber, dass die Erde abgeplattet ist. Diese Abplattung ergibt sich durch die Rotation der Erde, die sich dabei wie ein zähflüssiger Körper verhält. Die Resultate sind eine Verkürzung des Erdradius um 21 km an den Polen und ein „Äquatorwulst“, die mit menschlichem Auge aus dem Weltraum allerdings kaum sichtbar sind. Damit hat die Erde in erster Näherung die Figur eines Rotationsellipsoids.

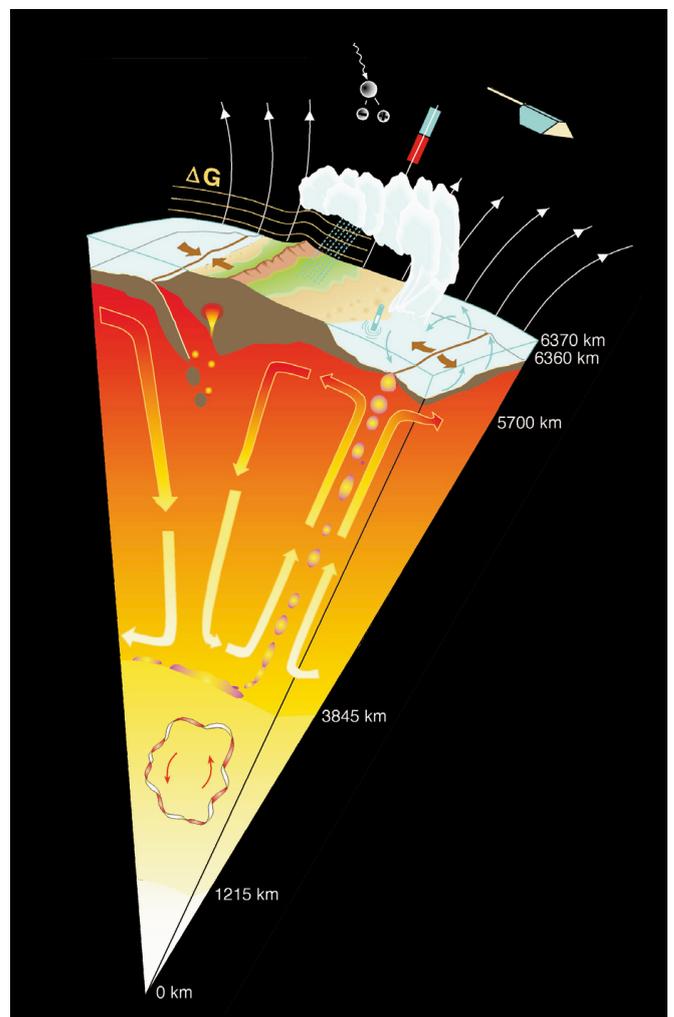
Aber auch die Abplattung der Erde ist nicht perfekt. Es gibt weitere Abweichungen, da die Verteilung der Erdmassen – und damit das gestaltprägende Schwerfeld – räumlich ungleichförmig ist. Die Darstellung der schwerkraft-bedingten Abweichungen der Erdgestalt gegenüber der regelmäßigen Ellipsoidoberfläche ist als „Potsdamer Kartoffel“ bekannt geworden. Grundlage dieser Abbildung ist ein am GeoForschungsZentrum Potsdam berechnetes Modell der Schwere. Wissenschaftlich wird die dargestellte Fläche als „Geoid“ bezeichnet. Dabei sind die Abweichungen von maximal $\pm 100\text{ m}$ gegenüber dem Rotationsellipsoid stark überhöht dargestellt, um gegenüber dem mittleren Erdradius von 6371 km sichtbar zu werden. Gedanklich ergäbe sich das Geoid als Gleichgewichtsfigur der Erde, wenn ihre Oberfläche vollständig mit in Ruhe befindlichem Wasser bedeckt wäre, d. h. Wasser, das allein der Fliehkraft durch die Erdrotation und der Schwerkraft ausgesetzt ist und auf das keine Gezeiten, Meeresströmungen und Winde einwirken. Das Geoid bildet damit als Gleichgewichtsfigur die physikalisch begründete Referenzfläche für alle topographischen Höhen („Normal Null“).

Die Beulen und Dellen, die dem Geoid das kartoffelartige Aussehen verleihen, werden durch Anomalien der Schwere hervorgerufen, die ihrerseits durch Dichteverteilungen im Aufbau des Erdkörpers entstehen. Solche Variationen ergeben sich erstens durch konvektive Prozesse im Erdinnern, die über geologische Zeiträume zu temperatur- und materialbedingten Dichteveränderungen und damit letztlich zu den Unregelmäßigkeiten im Schwerfeld führen. Zweitens sorgt im Bereich der Erdkruste die ungleichmäßige Verteilung der topographischen Massen auf den Kontinenten und dem Meeresboden für weitere Variationen des Schwerfeldes, die sich in die Gestalt des Geoids einprägen. Und drittens bewirken anhaltende geophysikalisch und klimatisch bedingte Prozesse jahreszeitliche und langfristige Änderungen der Schwerkraft aufgrund von Massenverlagerungen in der Atmosphäre (Luft), Hydrosphäre (Wasser) und Kryosphäre (Eis).

Satelliten als Schwerfeldsensoren

Die Bahn eines Satelliten, der die Erde umkreist, erfährt unter dem Einfluss der unregelmäßigen Struktur des Erdschwerfeldes Störungen, die gemessen und für die Berechnung eines globalen Erdschwerfeldmodells verwendet werden können. Mit diesem Prinzip wurde das Schwerfeld bereits seit Beginn der Satellitenära kontinuierlich kartiert und durch die Auswer-

tung von immer mehr und genaueren Messungen in den letzten Jahrzehnten fortlaufend verbessert. Zunächst blieb die Vermessung des Schwerfeldes mit Hilfe künstlicher Erdsatelliten auf die Auflösung sehr großer Strukturen mit einigen tausend Kilometern Ausdehnung beschränkt. Erst mit Hilfe einer Reihe spezieller Schwerfeld-Satelliten konnten in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte in der räumlichen Auflösung und der Genauigkeit des Schwerfeldmodells erzielt werden. Diese Satellitenmissionen waren bzw. sind die unter Federführung oder unter maßgeblicher Beteiligung des GFZ konzipierten und realisierten GFZ-1 (1995–1999), CHAMP (2000–2010), und GRACE (2002–2017) und GRACE Follow-on (seit 2018). Hinzu kam 2009 bis 2013 die europäische Schwerfeldmission GOCE, an deren Datenauswertung das GFZ mitgewirkt hat.



In den Variationen der Schwere an der Erdoberfläche manifestieren sich die unregelmäßigen Massen- bzw. Dichteverteilungen im Erdinnern.



Der Geoforschungssatellit CHAMP war Ausgangspunkt für eine Generation von Satelliten und -messverfahren (CHALLENGING Mini-Satellite Payload for Geosciences and Application).
Abb.: AIRBUS

Heute erreicht man mit Hilfe der amerikanisch-deutschen Missionen GRACE und GRACE-FO in Kombination mit den Daten der europäischen Mission GOCE eine räumliche Auflösung von Strukturen des Schwerefeldes mit ca. 80 Kilometern Ausdehnung. Zudem erlauben insbesondere die GRACE- und GRACE-FO-Mission erstmals die Erfassung zeitlicher (monatlicher) Variationen des Schwerefeldes mit einer räumlichen Auflösung von einigen hundert Kilometern.

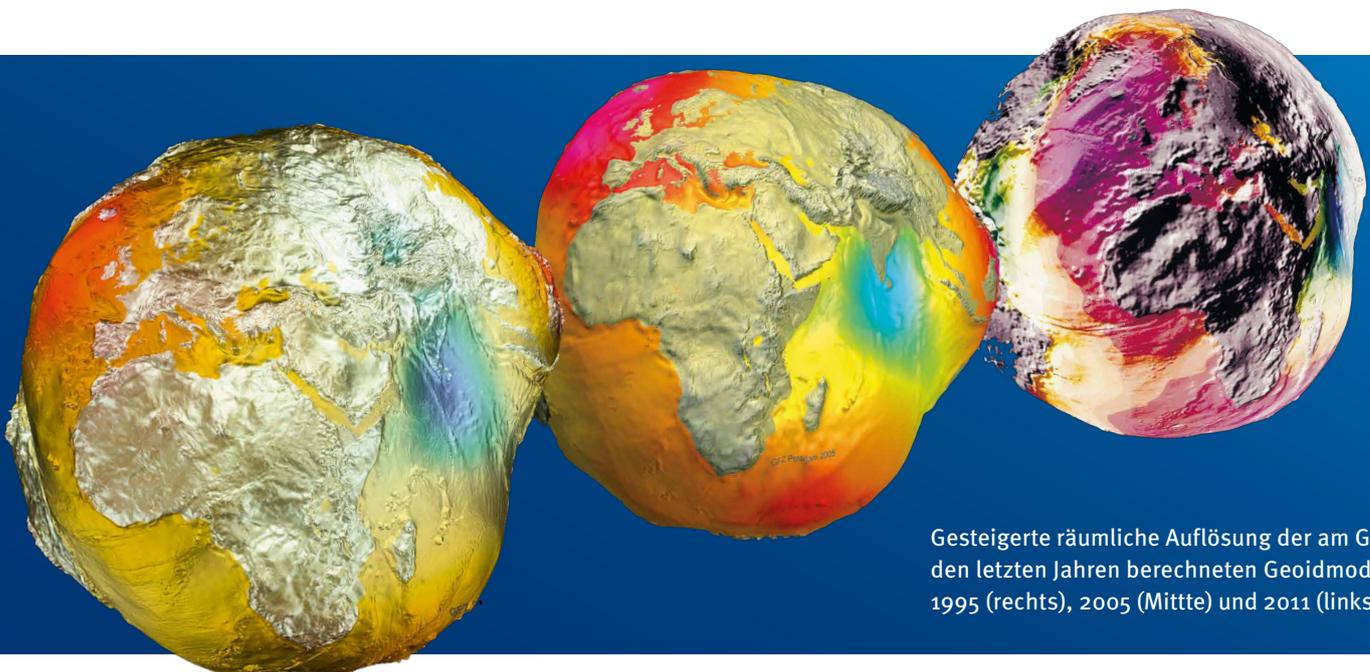
Nutzen für die Landes- und Ozeanvermessung

Die globalen Modelle des Erdschwerefeldes aus Satellitendaten stellen eine gleichmäßig genaue, globale, und vor allem physikalisch fundierte Bezugsfläche für alle topographischen Höhen bereit, eben das Geoid. Mit den heutigen Möglichkeiten der geometrischen Höhenübertragung zwischen beliebig weit voneinander entfernten Punkten auf der Erde mit Hilfe von Satellitennavigationssystemen wie dem amerikanischen Global Positioning System (GPS) oder dem europäischen Galileo-System, ist die Verfügbarkeit eines genauen Geoids für Aufgaben der Landesvermessung, aber auch der Navigation von Wasser-, Land-, Luft- und Raumfahrzeugen von zentraler Bedeutung.

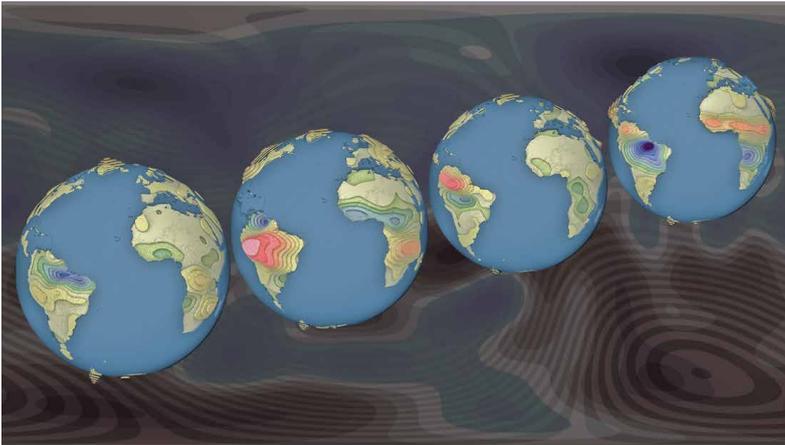


Das Satellitenpaar GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) Abb.: AIRBUS

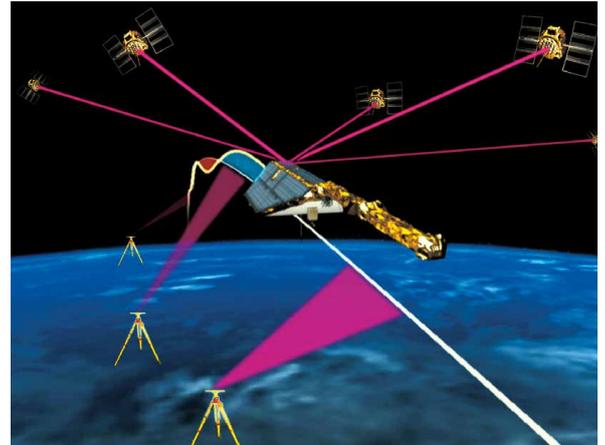
Die gemessenen räumlichen Variationen der Schwere an der Meeresoberfläche sind insbesondere auf eine ungleichmäßige Dichteverteilung im Erdinnern zurückzuführen. Insbesondere große Dichtekontraste wie beispielsweise zwischen ozeanischer Kruste (ca. 2.9 g/cm^3) und Meerwasser (1 g/cm^3) haben einen starken Einfluss auf die Schwere, so dass aus den beobachteten Geoidvariationen unmittelbar auf die Tiefenverteilung im Weltozean rückgeschlossen werden kann. Insbesondere in Regionen mit wenig Schiffsverkehr und einem daraus folgenden Mangel an Daten von Fächerloten oder anderen Beobachtungen vor Ort liefern geodätische Satellitenmissionen sehr wichtige Daten über die Bathymetrie.



Gesteigerte räumliche Auflösung der am GFZ in den letzten Jahren berechneten Geoidmodelle: 1995 (rechts), 2005 (Mitte) und 2011 (links)



Jahreszeitliche Variation der kontinentalen Wasserspeicherung als veränderliches Signal des Erdschwerefeldes abgeleitet aus GRACE-Daten (im Januar, April, Juli und Oktober 2008, v. l. n. r.)



Bahnstörungen erdnahe Satelliten am Beispiel von CHAMP

Geophysikalische Anwendungen

Auch über den Kontinenten kann aus den im Außenraum erhobenen Schwerefeld-Daten auf die ungleichmäßige Dichteverteilung innerhalb des Erdkörpers geschlossen werden. Die Dichtekontraste sind zwar deutlich kleiner als zwischen Meerwasser und basaltischer Kruste. Aber die Mächtigkeiten der unterschiedlichen Schichten in Kruste und oberem Mantel sind im Gegenzug deutlich größer. Schwerefelddaten liefern somit einzigartige Informationen über den Schichtenaufbau der Erde, die gemeinsam mit anderen Beobachtungsdaten (Seismik, Geoelektrik, Magnetotellurik) zu verbesserten Modellvorstellungen über Zusammensetzung und Temperaturverteilung im Erdinnern führen. Nicht zuletzt in Regionen mit eingeschränkter Zugänglichkeit wie der Antarktis liefern Satellitendaten wertvolle neue Erkenntnisse über den Aufbau der Kruste und damit indirekt auch über die Orogenese der verschiedenen Gesteinsformationen.

Die Potsdamer Kartoffel repräsentiert einen mittleren Zustand des Erdschwerefeldes, welcher aus unterschiedlichsten Beobachtungen aus mehreren Jahrzehnten kompiliert worden ist. Vielfältige dynamische Prozesse im Erdinnern und den oberflächennahen geophysikalischen Fluiden (Atmosphäre und Hydrosphäre) bewirken aber auch zeitliche Änderungen im Schwerefeld auf Zeitskalen von Sekunden (Erdbeben) bis zu Jahrhunderten (langsames Abschmelzen von Inlandeismassen). Diese sehr kleinen Änderungen lassen sich heutzutage mit den unter Beteiligung des GFZ entwickelten Schwerefeldmission GRACE und GRACE-FO hochgenau vermessen. Beispiele für solche bereits untersuchten Vorgänge sind die großräumigen Meereszirkulationssysteme, Meeresspiegeländerungen aufgrund von erhöhtem Schmelzwassereintrag sowie die noch anhaltende postglaziale Landhebung nach dem Abschmelzen der Eismassen der letzten Eiszeit.

Helmholtz-Zentrum Potsdam –
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ

Telegrafenberg
14473 Potsdam

Telefon: +49 (0)331 288-1040
e-mail: presse@gfz-potsdam.de

www.gfz-potsdam.de