

Ozeanographische Anwendungen der GRACE-Mission

Henryk Dobslaw, Saskia Esselborn, Maik Thomas
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

From 15 years of time-variable gravity fields of the GRACE mission, the mass-induced part of the global mean sea-level rise is estimated to be 1.5 mm/a, superimposed with large seasonal and also interannual variations as a consequence of climate change and anthropogenic use of continental water resources. Circulation-induced bottom pressure anomalies additionally observed by GRACE are found to be in line with predictions from ocean general circulation models and are related to large-scale variations in ocean transport in response to shifts in the surface wind regimes.



Die verschiedenen Sensoren an Bord der Satelliten-Schwerfeldmission GRACE ermöglichen seit dem Start im Jahr 2002 die Bestimmung eines jeweils neuen, hochauflösenden globalen Erdschwerfeldmodells aus den Daten eines einzelnen Monats. Der Vergleich einzelner Monate dieser mittlerweile mehr als 15 Jahre überdeckenden Zeitreihe eröffnet den Blick auf Massenvariationen im System Erde, die über den Ozeanen in allererster Linie durch Änderungen des relativen Meeresspiegels entstehen. Deren Verständnis und eine daraus idealerweise folgende Vorhersagbarkeit sind von hoher Relevanz für die Raumplanung in oftmals extrem dicht besiedelten Küstenregionen.

Im Folgenden werden die wichtigsten dynamischen Ursachen für die beobachteten zeitlichen Änderungen des Schwerfelds über den Ozeanen beleuchtet und beispielhaft insbesondere die wichtigsten Erkenntnisse aus GRACE-Beobachtungen für ozeanographische Anwendungen diskutiert. Zur Illustration der Ergebnisse wird die aktuelle Reprozessierung RLo5a der GRACE-Zeitreihe vom Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ verwendet (<http://gravis.gfz-potsdam.de>).

Dynamik der festen Erde und relative Meeresspiegeländerungen

Die Höhe des Meeresspiegels an einer Küste wird von einer Vielzahl ganz unterschiedlicher Prozesse beeinflusst. Neben Änderungen der in den Ozeanen gespeicherten Gesamtwassermenge und deren Dichteverteilung bewirken auch tektonische, sedimentologische oder thermische Phänomene an der Erdoberfläche und im Erdinnern absolute Höhenänderungen von Küstenbereichen, die – sofern es sich um Absenkungen handelt – als relativer Anstieg des Meeresspiegels wahrgenommen werden. Gleichzeitig bewirken die mit diesen Prozessen in Verbindung stehenden Umschichtungen von insbesondere Krusten- und Mantelmaterial auch kleine Änderungen im Erdschwerfeld: da sich der globale Meeresspiegel langfristig immer entlang einer Fläche konstanten Erdschwerepotenzials – dem Geoid – ausrichtet, die punktuell

Links: Mit Hilfe der Sensordaten der Satellitenmission GRACE können zeitliche Änderungen der Massenverteilung im Ozean aufgrund von atmosphärischen und hydrosphärischen Energie- und Impulsflüssen beobachtet werden. (Illustration: Astrium/GFZ)

Left: With the help of the sensor data of the satellite mission GRACE, temporal changes in the mass distribution in the ocean due to atmospheric and hydrosphere energy and momentum fluxes are observed.



Kontakt: Henryk Dobslaw
(dobslaw@gfz-potsdam.de)

um bis zu 120 m vom bestangepassten Rotationsellipsoid abweicht, kann sich auch dieser Prozess lokal als Änderung des relativen Meeresspiegels manifestieren. Ein besonders wichtiger geodynamischer Prozess für den relativen Meeresspiegel ist die glazialisostatische Anpassung (GIA), welche die Reaktion der festen Erde auf die Vereisungszyklen der letzten Millionen Jahre beschreibt. Diese schließt auch Deformationen durch die in der heutigen Zeit wieder stärker abschmelzenden Gletscher mit ein (Klemann und Martinec, 2011).

Masseninduzierte Meeresspiegeländerungen

Die Gesamtmenge des Wassers im Weltozean ändert sich ständig aufgrund von Unterschieden zwischen den globalen Summen des Niederschlags, der Verdunstung und der kontinentalen Abflüsse über die Flusssysteme. Insbesondere Veränderungen in der Massenbilanz der großen Eisschilde der Antarktis und Grönlands tragen gegenwärtig zum Anstieg des mittleren Meeresspiegels bei (Sasgen et al., 2010). Von Bedeutung sind aber auch langfristige Änderungen des in Boden und Aquiferen gespeicherten Wassers aufgrund von natürlicher Variabilität, langfristigen Klimaänderungen oder anthropogener Übernutzung zur Deckung des Wasserbedarfs der Landwirtschaft.

Mit Hilfe der Zeitreihe monatlicher Erdschwerfelder der GRACE-Mission können die masseninduzierten Variationen des globalen Meeresspiegels quantifiziert werden (Bergmann-Wolf et al., 2014). Die Zeitreihe wird dominiert von saisonalen Variationen mit einer Amplitude von etwa 10 mm und einem langfristigen Anstieg von etwa 1,5 mm pro Jahr (Abb. 1). Eine ergänzende Tiefpassfilterung mit einem gleitenden Mittel über zwölf Monate offenbart niederfrequente Fluktuationen des Meeresspiegels, die in einzelnen Jahren auch zu einem Absinken im Vergleich zum Vorjahr führen können. Diese zwischenjährlichen Schwankungen stehen in engem Zusammenhang mit natürlichen Variationen des Klimasystems. In diesem Fall sind es insbesondere Verschiebungen der oberflächennahen Windsysteme und damit Änderungen der Menge der Niederschläge in einzelnen Festlandsregionen, deren geomorphologische und hydrogeologische Eigenschaften die Geschwindigkeiten der kontinentalen Abflüsse bestimmen.

Masseninduzierte Meeresspiegeländerungen sind nur in erster Näherung global homogen. Änderungen in den kontinental gespeicherten Wassermassen bewirken genauso wie Massenverschiebungen in der festen Erde lokale Höhenänderungen der Niveaulächen des Erdschwerfelds. Diese führen konsequenterweise zu einer entsprechenden Anpassung des Meeresspiegels, wobei auch Sekundäreffekte – z. B. die durch die Änderung des Massenträgheitsmoments der Erde erzwungene Verlagerung des Rotationspols der Erde – zu beachten sind. Zusätzlich sind auch die deutlich kleineren Selbstanziehungseffekte der ozeanischen Wassermassen auf die ozeanische Dynamik zu berücksichtigen (Kuhlmann et al., 2011).

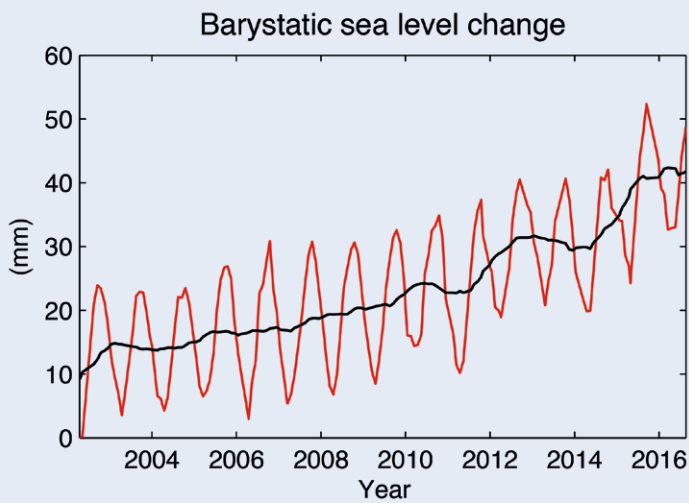


Abb. 1: Variationen des masseninduzierten Anteils des globalen Meeresspiegels basierend auf GFZ-RLO5a-Monatslösungen (April 2002 bis August 2016) der GRACE-Mission (rot) und zusätzlich nach einer Tiefpassfilterung (gleitendes Mittel über zwölf Monate) zur Unterdrückung der saisonalen Variationen (schwarz) (basierend auf Bergmann-Wolf et al., 2014).

Fig. 1: Time variations of the mass-induced contributions to global sea-level change based on GFZ RLO5a monthly gravity field solutions (April 2002 - August 2016) from the GRACE mission (red), and additionally filtered with a 12 months running average filter to suppress seasonal variations (black) (based on Bergmann-Wolf et al., 2014).

Trotz der hohen Genauigkeit von GRACE ist die Identifikation eines langfristig gültigen und damit potenziell extrapolationsfähigen Trends oder gar eines Beschleunigungsterms im Meeresspiegelanstieg aus der gegenwärtig vorliegenden GRACE-Zeitreihe nur mit verhältnismäßig großen Unsicherheiten möglich: aktuelle Schätzungen liegen bei Restfehlern von etwa 0,3 mm pro Jahr im mittleren Anstieg. Die lückenlose Fortsetzung der Beobachtungen mit der für den Frühling 2018 geplanten Nachfolge-mission GRACE-FO und die so entstehende längere Zeitreihe wird diese Unsicherheiten perspektivisch aber weiter verringern (Flechtner et al., 2016).

Zirkulationsinduzierte ozeanische Massenverlagerungen

Unabhängig von Veränderungen in der Gesamtmasse und der Höhe des Geoids werden Wassermassen durch die allgemeine ozeanische Zirkulation regional umverteilt. Dabei etablieren externe Schubspannungen durch die Wirkung der oberflächennahen Winde sowie dreidimensionale räumliche Dichtegradienten im Meerwasser Druckdifferenzen, die entsprechende Ausgleichsströmungen auslösen. Aufgrund ihrer relativ kleinen Geschwindigkeiten sind diese stark von der Wirkung von Corioliskräften beeinflusst. Diese sogenannte windgetriebene und thermohaline Zirkulation führt zur Entstehung der bekannten großräumigen Strömungssysteme im Weltozean, welche maßgeblich für den Transport von Wärme in gemäßigte und polare Breiten verantwortlich sind und deren prominentestes Element der Golfstrom im Nordatlantik ist.

Die allgemeine Zirkulation im Weltozean kann mit numerischen Modellen simuliert werden, die üblicherweise auf aus der Navier-Stokes-Gleichung abgeleiteten, nichtlinearen Impulserhaltungsgleichungen, der Kontinuitätsgleichung für inkompressible Flüssigkeiten sowie den Erhaltungsgleichungen für Wärme und Salz basieren (Thomas et al., 2001). Derartige Modelle können zur Simulation des mit GRACE beobachtbaren ozeanischen Bodendruckfelds herangezogen werden; aktuelle Simulationsergebnisse zeigen gute Übereinstimmungen mit entsprechenden GRACE-Beobachtungen (Dobslaw und Thomas, 2007). Signalstärken von mehreren hPa finden sich zum einen in zahlreichen Küstenregionen, wo insbesondere in Flachwasserregionen im Schelfbereich große Bodendrucksignale durch gelegentlichen Windstau an der Küste induziert werden (Abb. 2).

Daneben finden sich auch im offenen Ozean etliche Gebiete, in welchen oberflächennahe Windsysteme räumliche Gradienten in der Meeresoberflächennähe induzieren. Gemäß dem Taylor-Proudman-Theorem übertragen sich derartige oberflächennahe Druckgradienten unmittelbar bis auf den Ozeanboden, solange die vertikale Dichteverteilung in der Wassersäule hinreichend homogen ist. Während diese Voraussetzung im tropischen Ozean durch die Existenz einer thermischen Sprungschicht in einigen 100 m Tiefe nicht gegeben ist, wird insbesondere der Südozean durch die vorherrschenden starken Winde intensiv durchmischt. Dabei können bei günstiger Geometrie des Ozeanbodens resonante Moden im Bodendruck entstehen, die über große Regionen kohärent und daher mit hoher Genauigkeit durch GRACE beobachtbar sind. Die grundsätzliche Übereinstimmung von Modellsimulationen und Beobachtungsdaten führte in jüngerer Zeit zu zahlreichen Datenassimilationsexperimenten (Saynisch et al., 2015), um über die Synthese von Beobachtungsdaten und theoretischem Wissen über die Fluidynamik eine genauere Vorstellung der vorherrschenden Prozesse im Ozean zu entwickeln.

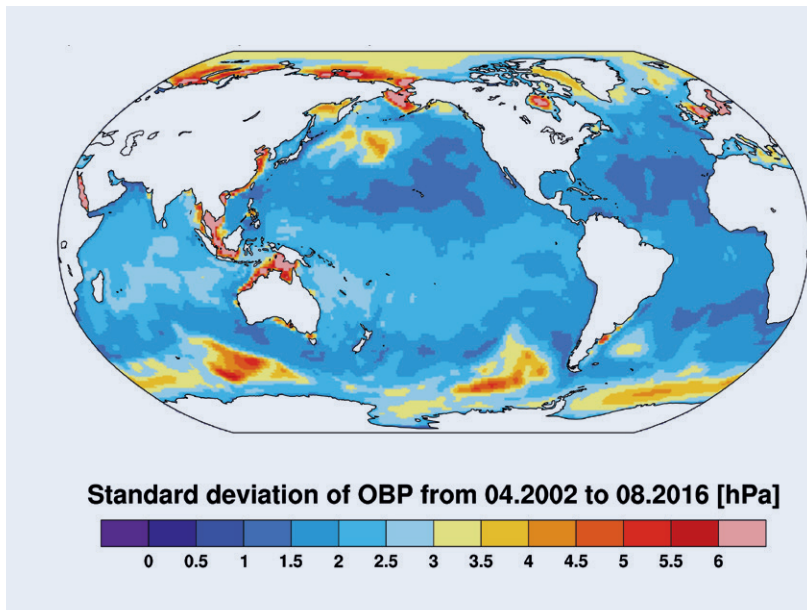


Abb. 2: Variabilität des Ozeanbodendrucks (OBP) basierend auf GFZ-RL05a-Monatslösungen (April 2002 bis August 2016) der GRACE-Mission aufgrund von interner Ozeandynamik wie wind- oder thermohalin getriebener allgemeiner Ozeanzirkulation (nach Dobslaw und Thomas, 2007)

Fig. 2: Ocean bottom pressure (OBP) variability obtained from GFZ RL05a monthly gravity fields of the GRACE mission due to internal ocean dynamics as the wind-driven or the thermo-haline circulation (updated from Dobslaw and Thomas, 2007)

Transportvariationen des Antarktischen Zirkumpolarstroms

Neben der Assimilation von GRACE-Beobachtungen in ein numerisches Ozeanmodell lassen sich die abgeleiteten zirkulationsinduzierten Bodendruckvariationen auch als Indikator für die vorherrschende Dynamik in ausgewählten Regionen der Erde verwenden. So war es bereits mit wenigen Jahren GRACE-Beobachtungen möglich, aus meridionalen Druckgradienten im südlichen Pazifik die zeitlichen Variationen im zonalen Transport des Antarktischen Zirkumpolarstroms zu schätzen und den kausalen Zusammenhang mit den vorherrschenden Windverhältnissen in den gemäßigten Breiten der südlichen Hemisphäre zu belegen (Abb. 3). Dabei wurden gute Korrelationen mit Meeresspiegelbeobachtungen auf der Antarktischen Halbinsel festgestellt. Zugleich konnte gezeigt werden, dass GRACE insbesondere in hohen Breiten auch auf Perioden von wenigen Wochen bis hinunter zu Tagen geophysikalisch relevante Informationen liefern kann (Bergmann und Dobslaw, 2012).

Die entwickelten Konzepte lassen sich grundsätzlich auch auf andere Weltregionen übertragen. So konnte beispielsweise auch für den Nordpazifik die Entstehung der dortigen Bodendruckvariationen mit nur wenigen dominanten Moden der großräumigen Windverhältnisse in der Region erklärt werden (Petrick et al., 2014). Derartige Studien gewinnen insbesondere Bedeutung mit Blick auf die Tatsache, dass auch zeitliche Variationen der westlichen Randströme wie der Golfstrom im Nordatlantik Bodendrucksignale hervorrufen. Diese müssen aber zunächst von den deutlich stärkeren, windgetriebenen Signalen getrennt werden, ehe sie zur satellitengestützten Überwachung dieses für die klimatischen Verhältnisse in Europa außerordentlich wichtigen Strömungssystems herangezogen werden können.

Schlußfolgerungen

Die Satellitenmission GRACE liefert als einziges gegenwärtig bekanntes Fernerkundungsverfahren quantitative Abschätzungen von Massenverlagerungen im System Erde. Damit ist es erstmals möglich, verschiedene Beiträge zu relativen Meeresspiegeländerungen auf globalen Skalen messtechnisch zu erfassen und unter Nutzung ergänzender Datenquellen und numerischer Modelldaten in verschiedene Einzelbeiträge zu separieren. In der Kombination mit Beobachtungen von Satellitenaltimetrie (siehe Infobox, Seite 23) und Küstenpegeln konnten somit in der vergangenen Dekade die Unsicherheiten im globalen Meeresspiegel-Budget deutlich reduziert werden. Basierend auf den GRACE-Ergebnissen können aktuelle Prognosemodelle für mittel- und langfristige Meeresspiegelvariationen detailliert in ihren Einzelkomponenten validiert werden.

Gleichzeitig ist die räumliche Auflösung der GRACE-Mission aber noch ein limitierender Faktor für viele ozeanographische Anwendungen. Mit der kurz vor dem Start befindlichen Mission GRACE-FO und der erstmals realisierten laserbasierten Abstandsmessung zwischen beiden Satelliten sollten hierfür erste Verbesserungen erzielt werden können. Ein Durchbruch für die Quantifizierung zirkulationsinduzierter Bodendrucksignale bis hin zur Überwachung der meridionalen Umwälzzirkulation mit gravimetrischen Verfahren kann allerdings erst von einer Schwerefeldmission der nächsten Generation erwartet werden, für die nach gegenwärtigem Stand des Wissens mindestens zwei Satellitenpaare auf unterschiedlich inklinierten Orbits in einer nochmals deutlich reduzierten Bahnhöhe erforderlich sein werden.

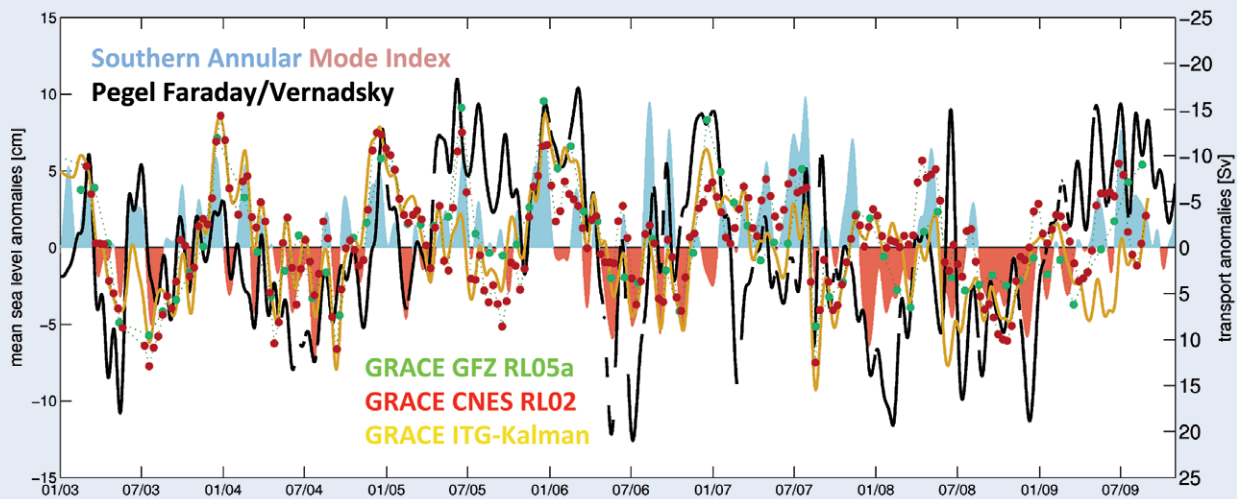


Abb. 3: Transportvariationen des Antarktischen Zirkumpolarstroms abgeleitet aus verschiedenen Zeitreihen von GRACE-Schwerefeldern: GFZ-RL05a (grüne Punkte), CNES-RL02 (rote Punkte), ITG-Kalman (gelbe Linie). Gegenübergestellt sind mit diesen Transportvariationen eng korrelierte Meeresspiegelvariationen am Pegel Faraday/Vernadsky an der Küste der Antarktischen Halbinsel (schwarze Linie), sowie ein auf globalen Wettermodelldaten basierender Index für die Windverhältnisse der mittleren Breiten der südlichen Hemisphäre (hellblau/hellrot); weitere Einzelheiten in Bergmann und Dobsław (2012)

Fig. 3: Variations in ocean transport of the Antarctic Circumpolar Current as derived from different time-series of GRACE gravity fields: GFZ RL05a (green dots), CNES RL02 (red dots), ITG-Kalman (yellow line). High correlations are found between those transport variations and local sea-level variations as observed at tide gauge Faraday/Vernadsky located at the coast of the Antarctic Peninsula (black line) as well as with an index for the Southern Annular Mode based on a global numerical weather prediction model that is characterizing the hemispheric wind pattern in moderate latitudes of the Southern Hemisphere. Further details are given in Bergmann and Dobsław (2012).

Literatur

- Bergmann-Wolf, I., Zhang, L., Dobsław, H. (2014): Global eustatic sea-level variations for the approximation of geocenter motion from Grace. - *Journal of Geodetic Science*, 4, 1, pp. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.2478/jogs-2014-0006>
- Bergmann-Wolf [Bergmann], I., Dobsław, H. (2012): Short-term transport variability of the Antarctic circumpolar current from satellite gravity observations. - *Journal of Geophysical Research*, 117, C05044. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JCo07872>
- Dobsław, H., Thomas, M. (2007): Simulation and observation of global ocean mass anomalies. - *Journal of Geophysical Research*, 112, C5, C05040. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006JCo04035>
- Esselborn, S., Rudenko, S., Schöne, T. (2017 online): Orbit related sea level errors for TOPEX altimetry at seasonal to decadal time scales. - *Ocean Science Discussion*. DOI: <https://doi.org/10.5194/os-2017-51>
- Flechtner, F., Neumayer, K.-H., Dahle, C., Dobsław, H., Fagiolini, E., Raimondo, J.-C., Güntner, A. (2016): What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications? - *Surveys in Geophysics*, 37, 2, pp. 453–470. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9338-y>
- Klemann, V., Martinec, Z. (2011): Contribution of glacial-isostatic adjustment to the geocenter motion. - *Tectonophysics*, 511, 3-4, pp. 99–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.08.031>
- Kuhlmann, J., Dobsław, H., Thomas, M. (2011): Improved modeling of sea level patterns by incorporating self-attraction and loading. - *Journal of Geophysical Research*, 116, C11036. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011JCo07399>
- Petrick, C., Dobsław, H., Bergmann, I., Schön, N., Matthes, K., Thomas, M. (2014): Low-frequency ocean bottom pressure variations in the North Pacific in response to time-variable surface winds. - *Journal of Geophysical Research*, 119, 8, pp. 5190–5202. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JCo09635>
- Rudenko, S., Neumayer, K., Dettmering, D., Esselborn, S., Schöne, T., Raimondo, J.-C. (2017): Improvements in precise orbits of altimetry satellites and their impact on mean sea level monitoring. - *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55, 6, pp. 3382–3395. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2670061>

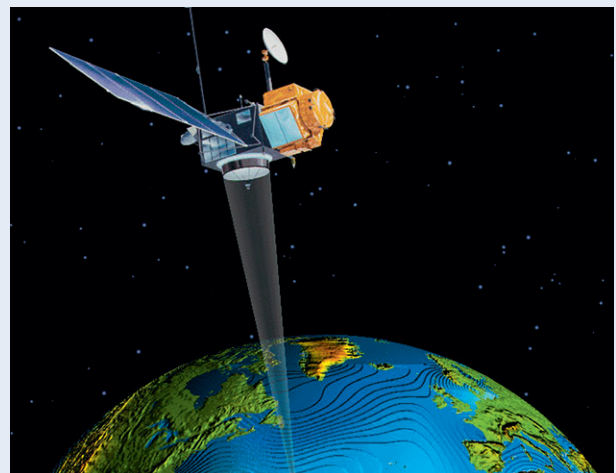
Satellitaltimetrie

Seit 1991 vermessen Altimetersatelliten die Höhe der Meeresoberfläche im offenen Ozean. Aus Flughöhen von bis zu 1300 km werden Radarsignale zur Erde gesendet, welche von Wasser- oder Eisoberflächen reflektiert werden. Aus der Laufzeit dieser Signale kann der Abstand zwischen Satellit und Reflektionsfläche mit Zentimetergenauigkeit bestimmt werden. Besonders interessant sind hierbei die zeitlichen Änderungen des mittleren Meeresspiegels sowie großräumige Muster in den Meereshöhenvariationen, die im Zusammenhang mit langperiodischen Klimaschwankungen stehen. Im Unterschied zur GRACE-Mission werden durch die Altimetrie gleichzeitig massen- und dichteinduzierte Meeresspiegeländerungen gemessen, so dass sich beide Satellitensysteme in idealer Weise ergänzen.

Altimetrische Messungen sind im Gegensatz zu Küstenpegeldaten grundsätzlich unabhängig von vertikalen Landbewegungen und überdecken den Ozean nahezu global. Allerdings ist es eine große wissenschaftliche Herausforderung, diese Messungen über Jahrzehnte genau zu halten. Satellitenmissionen haben nur eine begrenzte Lebensdauer und beim Übergang zwischen einzelnen Missionen können Sprünge in der Zeitreihe auftreten. Auch die Identifikation von Driften, die beispielsweise durch das Altern der Satellitenelektronik auftreten können, ist von herausragender Wichtigkeit für die Langzeitstabilität des Messverfahrens.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten am GFZ liegt auf der Berechnung hochgenauer Satellitenbahnen für Missionen wie ERS-1, ERS-2, Envisat, TOPEX/Poseidon, Jason-1 oder Jason-2 (Rudenko *et al.*, 2017). Besonderes Augenmerk liegt auf dem Einfluss von

Unsicherheiten in der Bahnbestimmung auf saisonale und interannuelle Änderungen der altimetrie-basierten Meereshöhen. So konnte gezeigt werden, dass die zeitvariable Komponente des zur Bahnbestimmung herangezogenen Erdschwerefelds großräumige und lokal nicht vernachlässigbare Auswirkungen auf saisonale und dekadische Variationen des Meeresspiegels hat (Rudenko *et al.*, 2014). Besonders problematisch für die Bestimmung globaler und regionaler Meeresspiegeltrends ist die Genauigkeit der Daten der frühen Altimetermissionen aus den 1990er Jahren. Exemplarisch konnte für die TOPEX/Poseidon-Mission gezeigt werden, dass mehrjährige globale Schwankungen des Meeresspiegels systematische Effekte enthalten, die auf Unsicherheiten in der Bahnbestimmung beruhen (Esselborn *et al.*, 2017).



Topex/Poseidon (courtesy NASA/JPL-Caltech)

Rudenko, S., Dettmering, D., Esselborn, S., Schöne, T., Förste, C., Lemoine, J.-M., Ablain, M., Alexandre, D., Neumayer, K.-H. (2014): Influence of time variable geopotential models on precise orbits of altimetry satellites, global and regional mean sea level trends. - *Advances in Space Research*, 54, 1, pp. 92–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.03.010>

Sasgen, I., Dobslaw, H., Martinec, Z., Thomas, M. (2010): Satellite gravimetry observation of Antarctic snow accumulation related to ENSO. - *Earth and Planetary Science Letters*, 299, 3-4, pp. 352–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.09.015>

Saynisch, J., Bergmann, I., Thomas, M. (2015): Assimilation of GRACE-derived oceanic mass distributions with a global ocean circulation model. - *Journal of Geodesy*, 89, 2, pp. 121–139. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0766-0>

Thomas, M., Sündermann, J., Maier-Reimer, E. (2001): Consideration of ocean tides in an OGCM and impacts on subseasonal to decadal polar motion excitation. – *Geophysical Research Letters*, 28, 12, pp. 2457–2460. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000GL012234>