

Globale Beobachtungen des Meeresspiegels und seiner Änderungen

Saskia Esselborn und Tilo Schöne
Deutsches GeoForschungszentrum GFZ, Potsdam

Present-day sea level rise is an important issue due to its potential impact on densely populated areas close to the oceans. The global mean sea level rise of more than 3 mm/year during the last two decades has regional excesses, which can be four times larger or smaller than the average. The main factors driving the observed sea level rise and its non-uniformity are the warming of the global oceans, oceanic mass transport and the import of additional water into the ocean.

GFZ is working on the estimation of sea level variability and trends based on satellite radar altimetry. An important aspect is the monitoring of the vertical movements of tide gauge stations using GPS measurements which also ensure the precession and long-term stability of the altimeter measurements. Another question still under debate is how much of the observed sea level rise can be attributed to ocean warming and to melting of land ice, resp. With the availability of the GRACE-mission it is now feasible to study this question on global and regional basis.



In der Erdgeschichte schwankte der Meeresspiegel als Folge von Warmzeiten und Eiszeiten um nahezu 200 m in der Höhe. Während der letzten 2000 Jahre war er relativ konstant, steigt aber seit Mitte des neunzehnten Jahrhunderts global und regional differenziert an. Für das zwanzigste Jahrhundert wurde mit Gezeitenpegeln ein Anstieg von durchschnittlich 1,8 mm/Jahr gemessen, für die letzten zwei Dekaden zeigen jedoch moderne Satellitenmessungen einen Anstieg von gut 3 mm/Jahr (Abb. 1). Ursache dafür sind vermutlich überwiegend anthropogene Klimaänderungen, wobei das langfristige Signal typischerweise von einer dekadischen natürlichen Klimavariabilität überlagert ist. Zwei Effekte dominieren den Anstieg des globalen Meeresspiegels: zum einen die Erwärmung und die damit zusammenhängende thermische Ausdehnung des Wassers und zum anderen der Eintrag von zusätzlichem Wasser in den Weltozean. Die Hauptquellen hierfür sind schmelzende Eisschilde und Gletscher, auf kürzeren zeitlichen Skalen sind aber durchaus auch Schwankungen des globalen Wasserhaushalts, d. h. Änderungen des Wasseraustauschs zwischen Land und Ozean sowie auch zwischen Atmosphäre und Ozean zu beobachten.

Für die weltweit rund 200 Millionen Menschen, die küstennah derzeit weniger als 5 m über dem mittleren Meeresspiegel wohnen, ist der regionale Wasserstand besonders bedeutsam. Anhand der Satellitendaten der letzten 20 Jahre (Abb. 2) konnte gezeigt werden, dass die regionalen Trends des Meeresspiegels mit bis zu 12 mm/Jahr teilweise erheblich von denen des globalen mittleren Anstiegs abweichen – einige Regionen weisen sogar negative Trends auf. Hier spielen einerseits regionale Wasser- und Wärme Flüsse zwischen Ozean, Atmosphäre und Land eine Rolle, andererseits auch Veränderungen der Ozeandynamik. Letztere umfassen beispielsweise die Verlagerung aber auch die Abschwächung bzw. Verstärkung von Strömungen, die sowohl Veränderungen in der Verteilung der Dichte als auch in der Verteilung der Masse des Ozeans hervorrufen können.

Links: Küstenpegel bei Pangandaran (Java, Indonesien) als Teil des Tsunami-frühwarnsystems und zur Untersuchung von Meeresspiegeländerungen

Left: Coastal tide gauge at Pangandaran (Java, Indonesia) as part of the Tsunami Early Warning System and part of the Global Ocean Observing System for Sea Level



Kontakt: S. Esselborn
(essel@gfz-potsdam.de)

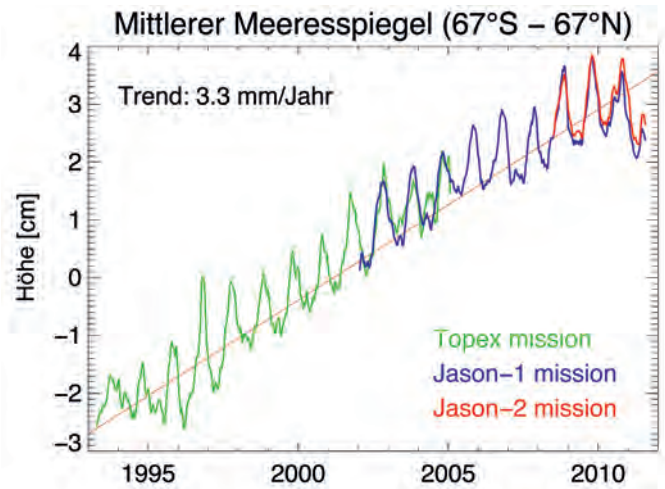


Abb. 1: Zeitreihe des global gemittelten Meeresspiegels aus Radaraltimetrie

Fig. 1: Time series of the global mean sea level from radar altimetry

Messungen des Meeresspiegels

Welche Methoden und Instrumente kommen bei der Messung des Meeresspiegels und seiner Komponenten konkret zum Einsatz?

Erste systematische Messungen des Meeresspiegels durch Pegel wurden nach 1660 durch die Royal Society of London angeregt. Allerdings ist die Abschätzung des globalen Meeresspiegelanstiegs aus diesen Messungen insofern problematisch, als sich die Pegel infolge von Prozessen wie Landhebung und -senkung oder auch Erdbeben relativ zum Meeresspiegel bewegen können. Ein weiteres Problem ist die geographisch höchst ungleichmäßige Verteilung der Instrumente über den Globus. Seit dem Beginn der satellitengestützten Radaraltimetrie im Jahr 1991 kann der Weltozean nun auch global vermessen werden. Altimeter tasten mit Wiederholungsraten zwischen zehn Tagen und einem Monat große Teile des Weltozeans ab. Die Genauigkeit liegt hier bei etwa 2 cm pro Einzelmessung bei einer Flughöhe von rund 1000 km.

Die Dichte des Wassers, und damit das Volumen des Ozeans, lässt sich durch lokale Messungen der Temperatur und des Salzgehalts der Wassersäule bestimmen. Diese Messungen konnten über lange Zeit nur punktuell durch verankerte Messbojen oder von Forschungsschiffen aus durchgeführt werden. Seit dem Jahr 2000 werden durch das internationale Argo-Projekt (<http://www-argo.ucsd.edu/>) frei driftende Bojen im Weltozean ausgesetzt, die alle zehn Tage die Temperatur und den Salzgehalt über die oberen 2000 m der Wassersäule messen und per Satellit weitergeben. Zurzeit existieren rund 3500 aktive Bojen, was eine gute räumliche und zeitliche Überdeckung des Weltozeans gewährleistet.

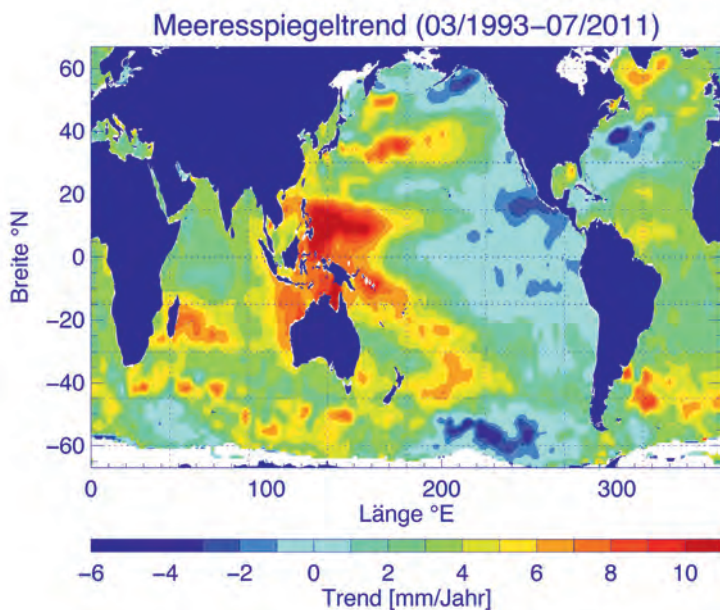


Abb. 2: Aus 18 Jahren Radaraltimeterdaten abgeleiteter Meeresspiegeltrend (1993 bis 2011) der Missionen Topex, Jason-1 und Jason-2 in mm/Jahr. Der gemittelte globale Trend für diesen Zeitraum beträgt 3,3 mm/Jahr.

Fig. 2: Sea level trend [mm/year] derived from 18 years of radar altimeter data (1993 to 2011) of the missions Topex, Jason-1 and Jason-2. The mean global trend for this period is 3.3 mm/yr.

Änderungen der ozeanischen Masse konnten bis vor kurzem ebenfalls nur lokal durch Drucksensoren auf dem Ozeanboden oder indirekt mit Hilfe von Modellen abgeschätzt werden. Seit dem Beginn der GRACE-Mission im Jahr 2002 (vgl. dazu den Beitrag von Flechtner und Förste in diesem Heft) bestimmen GFZ-Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Massenänderungen von Satelliten aus. Diese Messungen liegen mit zeitlichen Auflösungen von einem Monat bis zu einem Tag vor. Da die GRACE-Satelliten Änderungen des Gesamtschweresignals (=Masse) erfassen, müssen alle Massenänderungen außerhalb des Ozeanwasserkörpers quantifiziert und subtrahiert werden. Voraussetzung für die Bestimmung des Trends der Ozeanmasse ist daher eine gute Modellierung von Schwerfeldänderungen infolge von beispielsweise großen Erdbeben, nacheiszeitlichen Landhebungen oder dem Abschmelzen großer Eismassen.

Am GFZ werden Altimeterdaten für die Untersuchung langfristiger Klimatrends (Schöne et al., 2010) oder der Rekonstruktion von Meeresspiegelanomalien (Schön et al., 2010) genutzt. Die Untersuchungen umfassen die Angleichung von Daten verschiedener Missionen und die Untersuchung der Langzeitstabilität der Altimetermessungen sowie der nötigen Korrekturwerte. Die Ergebnisse werden über das „Altimeter Database and Processing System ADS“ (<http://adsc.gfz-potsdam>).

de/ads) international zur Verfügung gestellt. Weitere für die Klimaforschung relevante Schwerpunkte sind die Messungen der Vertikalbewegungen an Pegelstationen sowie die Untersuchung der regionalen Änderungen des Meeresspiegels im Nordatlantik.

Vertikalbewegungen der Pegelstationen

Auch im Zeitalter globaler Altimetrie bleiben Pegelmessungen ein wichtiges Instrument der Meeresforschung. Zum einen sind Pegelmessungen aufgrund ihrer hohen zeitlichen Abtastrate ein unverzichtbarer Datensatz für die Untersuchung von lokalen, zeitlich hochfrequenten Phänomenen wie beispielsweise Strömungssystemen. Zum anderen stellen die globalen Pegelmessungen die Genauigkeit der Radaraltimetrie sicher, da sie zur Kalibrierung und zur Überwachung der Langzeitstabilität der Messungen eingesetzt werden können. Voraussetzung für Letzteres ist allerdings die genaue Kenntnis der Vertikalbewegungen der verwendeten Pegelstationen. GNSS-korrigierte Pegelmessungen garantieren die bodengestützte Langzeitreferenz für die raumbasierten Altimetermessungen. Im Rahmen des vom GFZ geleiteten TIGA-Projekts des International GNSS Services (IGS; Schöne et al., 2009) werden global verteilte GNSS-Stationen an Pegeln analysiert und die Vertikalbewegungen international verfügbar gemacht.

Der Meeresspiegel im Nordatlantik

In der Helmholtz-Initiative REKLIM (Regionale Klimaänderungen) werden unter anderem die Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserstand im Nordatlantik untersucht. Die zentrale Frage ist dabei, wie der Meeresspiegel lokal auf die Erwärmung und die Zufuhr von Schmelzwasser reagiert. Die Karte der Meeresspiegeltrends – ermittelt auf Basis der Altimeterdaten seit 1993 (Abb. 1) – zeigt im Nordatlantik einen Anstieg von einigen Millimetern pro Jahr, in den Tropen ein Absinken im Subtropenwirbel von bis zu 4 mm/Jahr und einen Anstieg von bis zu 6 mm/Jahr im subpolaren Bereich südlich von Grönland. Dieses Muster ist ein Anzeichen für Veränderungen der großräumigen Ozeanzirkulation im Subtropen- und Subpolarwirbel und damit im Golfstromsystem. Um die Ursachen dieses Musters zu untersuchen, wurden Messungen des Meeresspiegels von Radaraltimetern, frei driftenden Argo-Bojen und den GRACE-Satelliten für den Zeitraum von August 2002 bis Dezember 2010 analysiert. Der Trend des totalen Meeresspiegels und der des Dichteanteils sind mit starker räumlicher Glättung in Abbildung 3 dargestellt.

Es ist für beide Größen ein Tripol-Muster mit Zentren im Subtropenwirbel, im Übergangsbereich zwischen Subtropen- und Subpolarwirbel und im nordöstlichen Nordatlantik zu erkennen. Einem entsprechenden Muster folgen in abgeschwächter

Form auch die Massenänderungen (ohne Abbildung). Dies ist ein deutlicher Hinweis auf eine Abschwächung der mittleren Zirkulation im Golfstromsystem während der letzten acht Jahre. Der 8-jährige Trend des Meeresspiegels gemittelt über den Nordatlantik (südlich von 55° N) liegt nahe Null, wobei der Dichteanteil einen Negativbeitrag von etwa 1 mm/Jahr liefert, der Massenanteil jedoch um etwa 0,5 mm/Jahr zugenommen hat. Berücksichtigt man die Genauigkeiten der einzelnen Messungen, ist die Bilanz des Meeresspiegels in diesem Bereich geschlossen. Die in der Bilanz noch fehlenden 0,5 mm/Jahr könnten mit einer Erwärmung des tiefen Ozeans zusammenhängen, der durch die Argo-Bojen nicht überwacht wird. Eine noch offene Frage ist, wodurch die beobachteten Änderungen des Meeresspiegels und der Ozeanzirkulation verursacht werden und ob es sich um transiente oder längerfristige Änderungen handelt. Diese Fragen sollen gemeinsam mit Projektpartnern des REKLIM-Verbands durch den Vergleich mit Simulationen mit einem numerischen Ozeanzirkulationsmodell untersucht werden.

Ausblick

Etwa 2,5 Milliarden Menschen leben nicht weiter als 60 km von einer Küste entfernt. Änderungen im Klima beeinflussen den Meeresspiegel und haben damit direkte Konsequenzen für

die Bewohner und die Nutzung von Küsten, den Küstenschutz, die dortige Wasserversorgung sowie auch für die küstennahen Ökosysteme. Das GFZ stellt sich diesen gesellschaftlichen Herausforderungen mit einem integrierten Ansatz zum globalen Monitoring des Meeresspiegels und seiner Änderungen. Zukünftige Altimeter- und Schwerefeldmissionen werden die grundlegenden Beobachtungen für ein besseres Verständnis der beteiligten Prozesse und die Trennung von dekadischen und langfristigen Signalen liefern.

Literatur

- Schöne, T., Schön, N., Thaller, D. (2009): IGS Tide Gauge Benchmark Monitoring Pilot Project (TIGA): scientific benefits. - *Journal of Geodesy*, 83, 3-4, 249-261, 10.1007/s00190-008-0269-y.
- Schöne, T., Esselborn, S., Rudenko, S., Raimondo, J.-C. (2010): Radar Altimetry Derived Sea Level Anomalies - The Benefit of New Orbits and Harmonization - In: Flechtner, F., Gruber, T., Güntner, A., Manda, M., Rothacher, M., Schöne, T., Wickert, J. (Eds.), *System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques*, (Advanced Technologies in Earth Sciences), Springer, 317-324.
- Schön, N., Esselborn, S., Schöne, T. (2010): A 15-year reconstruction of sea level anomalies using radar altimetry and GPS-corrected tide gauge data - In: Flechtner, F., Gruber, T., Güntner, A., Manda, M., Rothacher, M., Schöne, T., Wickert, J. (Eds.), *System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques*, (Advanced Technologies in Earth Sciences), Springer, 359-365.

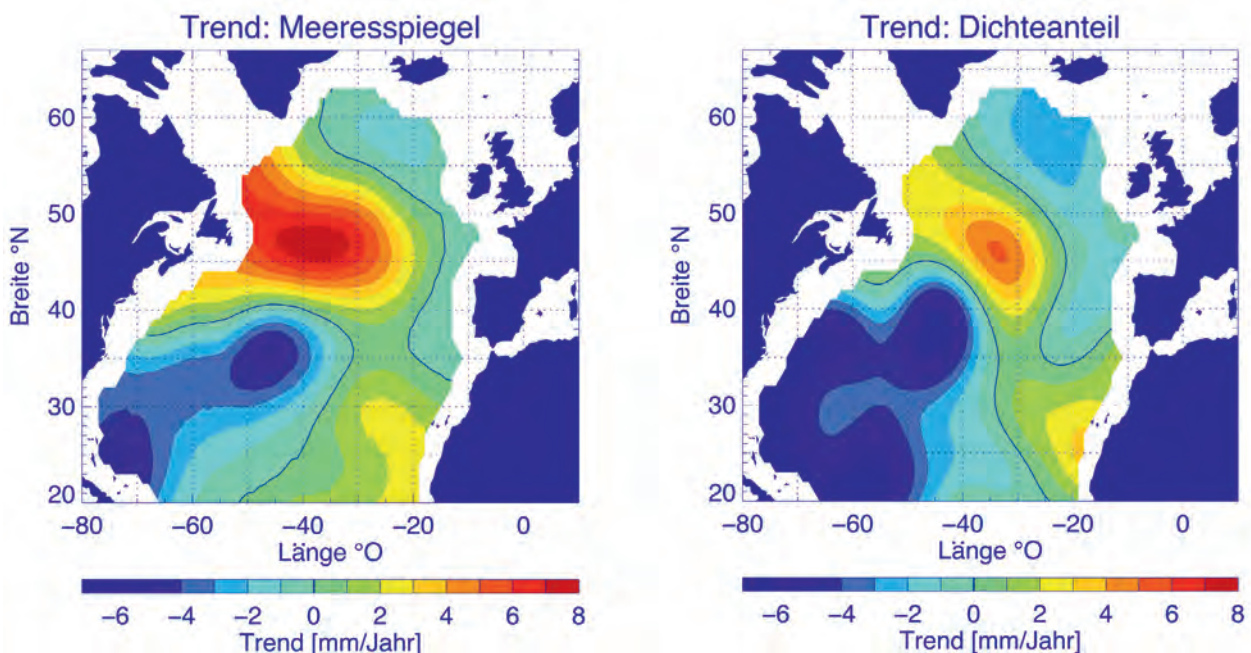


Abb.3: Meeresspiegeltrend für den Zeitraum August 2002 bis Dezember 2010 im Nordatlantik. Links: Gesamttrend berechnet aus Jason-1 und Jason-2 Altimeterdaten, rechts: Dichteanteil berechnet aus Daten des globalen Argo-Netzes

Fig. 3: Sea level trend for the period between August 2002 to December 2010 in the North Atlantic. Left: total trend estimated from Jason-1 and Jason-2 altimeter data, right: density contribution estimated from data of the global Argo-array