



GEODÄSIE

# Der Meeresspiegel – ansteigend und fast im Lot

WIE MODERNSTE GEODÄTISCHE WELTRAUMVERFAHREN STRUKTUR UND KINEMATIK DER MEERESOBERFLÄCHE BESTIMMEN UND DAMIT KOMPLEXE PROZESSE DES SYSTEMS ERDE VERSTEHEN HELFEN.

VON WOLFGANG BOSCH

**Abb. 1: TOPEX/Poseidon, der bisher erfolgreichste Altimetersatellit, hat 13 Jahre lang alle 10 Tage die Meeresoberfläche neu vermessen. Heute setzt der Nachfolgersatellit Jason1 die Messreihe fort. (Mit freundlicher Genehmigung des JPL, Pasadena)**

Der Meeresspiegelanstieg gilt zu Recht als prominentester Indikator für den globalen Wandel, denn die Auswirkungen sind für viele Millionen Menschen, die in Küstennähe und nur wenige Meter über dem Meeresspiegel wohnen, von lebenswichtiger Bedeutung.

Das belegen nicht nur Extremereignisse wie der verhängnisvolle Tsunami nach dem Sumatrabeben im Dezember 2004 oder die Überflutung New Orleans' durch

den Hurrikan Katrina in 2005. Die Küste ist ein wichtiger Lebens- und Wirtschaftsraum und die nachhaltige Bewahrung ihres Ökosystems ist eine wichtige Zielsetzung, die immense Kosten verursacht.

Das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut (DGFI) beteiligt sich seit vielen Jahren an der Auswertung von Weltraumverfahren, die den Meeresspiegel vermessen und seine zeitlichen Änderungen protokollieren. Dazu werden einige aktuelle Forschungsergebnisse dargestellt und der Zusammenhang zu wichtigen geophysikalischen Prozessen hergestellt.

## Pegel

Bereits vor 150 Jahren wurden Pegel zur Sicherung der Schifffahrt in Flussmündungen und Häfen installiert. Die Pegelbeobachtungen erlauben eine sehr präzise Vermessung des Meeresspiegels, wenn sie über einen ausreichend langen Zeitraum durchgeführt und sorgfältig kontrolliert werden. Eine nennenswerte Anzahl kontrollierter Messreihen von über 40 Jahren Länge liegen allerdings nur in Europa, Nordamerika und Japan vor. Auf der Südhalbkugel, insbesondere an den Küsten von Afrika, Australien und der Antarktis, fehlen solche Messreihen fast vollständig.

Pegel bieten nur eine punktweise Überwachung des Meeresspiegels. Zudem sind die Messreihen in

Häfen und Flussmündungen auch nicht immer repräsentativ für den offenen Ozean. Schließlich muss bedacht werden, dass Pegel alle tektonischen Bewegungen des Untergrundes mitmachen, auf dem sie errichtet sind. Durch die postglaziale Landhebung in Skandinavien sind alle dortigen Pegelreihen abfallend und täuschen ein Absinken des Meeresspiegels vor. Um aus Pegelreihen absolute Änderungen des Meeresspiegels abzuleiten, ist eine geozentrische Kontrolle durch Satellitennavigationsverfahren (GPS) erforderlich – eine Aufgabe, an der sich auch das DGFI beteiligt.

## Satellitaltimetrie

Seit wenigen Jahrzehnten wird der Meeresspiegel mit der Satellitaltimetrie sehr genau und nahezu global vermessen. In den letzten Jahren waren sogar bis zu fünf Altimetersysteme gleichzeitig im Einsatz. Das dabei eingesetzte Radarverfahren ist im Prinzip einfach: Eine dichte Folge von kurzen Radarimpulsen wird vom Satelliten senkrecht zur Meeresoberfläche ausgestrahlt (siehe Abbildung 1), dort reflektiert und nach kurzer Laufzeit von dem Radarsystem des Satelliten wieder empfangen. Die reflektierende Fläche ist vom Seegang abhängig und besitzt einen Radius von 2–10 km, so dass sich Wellen ausmitteln. Aus der Laufzeit der Radarimpulse ergibt sich die Höhe der Radarantenne über dem aktuellen, ruhenden Meeresspiegel.



JPL PASADENA

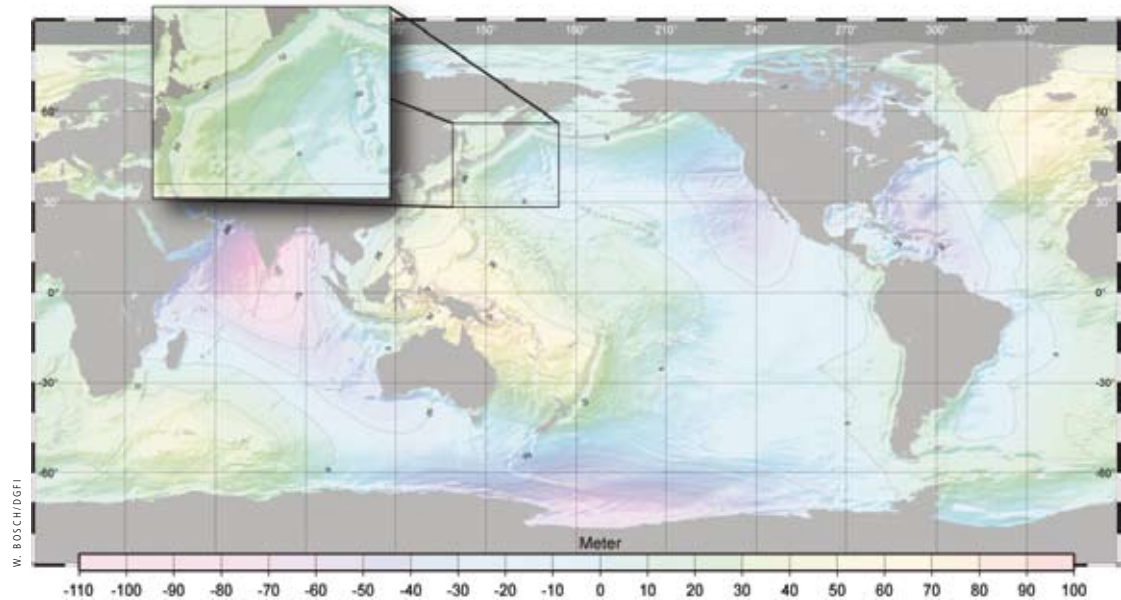


Um diese Messungen in Meereshöhen zu überführen, sind zahlreiche Korrekturschritte erforderlich: Die Messung muss wegen instrumenteller Fehler berichtigt und auf den Schwerpunkt des Satelliten bezogen werden. Laufzeitverzögerungen durch die Atmosphäre sind zu korrigieren. Die Höhenmessung wird mit zunehmendem Seegang zu lang, weil Wellentäler stärker reflektieren als Wellenspitzen. Um Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten vergleichen zu können, wird der Gezeitenhub des Meeres und der festen Erde abgezogen und die Reaktion des Ozeans auf Luftdruckschwankungen berücksichtigt. Schließlich muss die Bahn des Satelliten durch numerische Integration und Anpassung von Bahnverfolgungsdaten (Laser/Mikrowellen) bestimmt werden. Die Bahnhöhe des Satelliten wird relativ zu einem die Erde gut anpassenden Rotationsellipsoid beschrieben, so dass sich nach Abzug der korrigierten Altimetermessung ellipsoidische Meereshöhen ergeben.

#### Die Ozeanoberfläche: ein Abbild des Meeresbodens

Trotz der zahlreichen Korrekturen ist es aber möglich, mittlere Meereshöhen mit wenigen Zentimetern Genauigkeit zu bestimmen. Damit ist die Oberfläche der Ozeane besser bekannt als die der meisten Landgebiete. Das Ergebnis (siehe Abbildung 2) ist faszinierend: Die Karte der Meeresoberfläche ist keineswegs regelmäßig, sondern weist – relativ zu einem mittleren Erdellipsoid – Hügel und Täler auf. An der Südspitze Indiens liegt der Meeresspiegel z. B. mehr als 100 Meter unter dem Ellipsoid, nördlich von Neu-Guinea hingegen ca. 80 Meter darüber.

Die Meeresoberfläche ist aber auch nicht glatt; die bekannten Tiefseegräben des Westpazifiks



bilden sich in ihr ab. Ebenso sind Gebirgsketten des Meeresbodens, tektonische Bruchzonen und Verwerfungen zu erkennen. Tatsächlich bilden sich alle Massenunregelmäßigkeiten des Meeresbodens ab, weil die Wassermassen in erster Näherung im Gleichgewicht mit der Schwerkraft stehen und sich der Wasserspiegel senkrecht zur örtlichen Lotrichtung ausrichtet. Dass uns diese Oberflächenstruktur der Weltmeere bei der letzten Kreuzfahrt nicht aufgefallen ist, hat zwei Gründe: Zum einen orientiert sich unser Gleichgewichtssinn selbst an der örtlichen Lotrichtung – wir empfinden deshalb auch eine gegenüber dem Erdellipsoid geneigte Meeresoberfläche als horizontal. Zum anderen sind die Neigungen der Meeresoberfläche und deren Änderungen sehr gering: Über den Tiefseegräben des Westpazifiks vertieft sich der Meeresspiegel um etwa 20 Meter; diese Versenkung bildet sich aber über eine Strecke von 200 bis 300 km aus und ist deshalb mit bloßem Auge nicht zu erkennen. (Auf einer Entfernung von 200 km macht die Erdkrümmung, d. h. die Abweichung von einer Tangentialebene, bereits mehr als 3 km aus.)

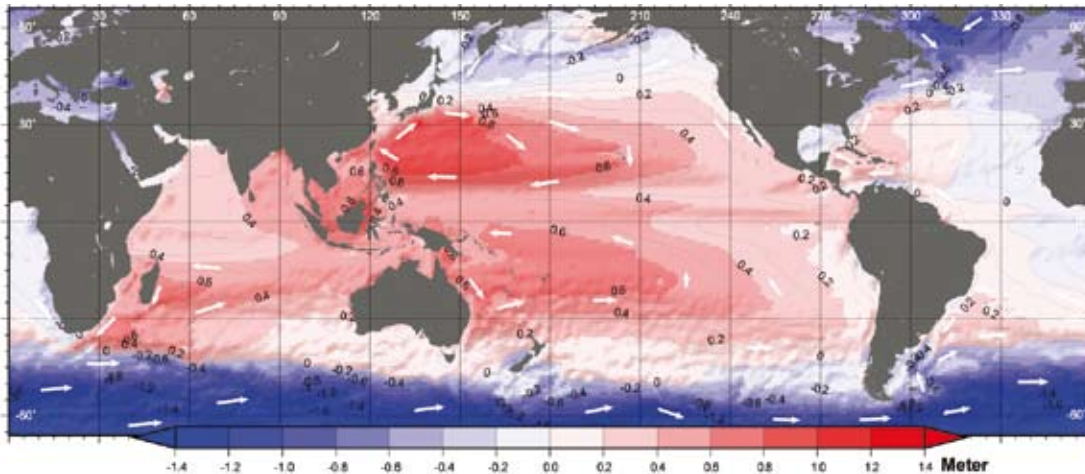
Das geglättete Abbild des Meeresbodens wird seit vielen Jahren genutzt, um die Strukturen der Meeresbodentopographie zu überprüfen. Tatsächlich konnten durch diese Inversion unbekannte Strukturen des Meeresbodens entdeckt werden.

#### Fast alles im Lot: die Meerestopographie

Neben den Altimetersatelliten gibt es seit einigen Jahren auch andere geodätische Satellitenmissionen (CHAMP, GRACE und bald auch GOCE), die es mit innovativen Messsystemen ermöglichen, das Schwerefeld der Erde so exakt wie nie zuvor zu beschreiben. Damit lässt sich die Lotrichtung überall berechnen und mit dem mittleren Meeresspiegel vergleichen.

Es stellt sich heraus, dass doch nicht alles genau im Lot ist. Das Gleichgewicht zwischen Wassermassen und Schwerkraft wird nämlich geringfügig durch die großräumigen Meeresströmungen gestört, die durch Winde und Dichteunterschiede angetrieben und durch die Rotation der Erde beeinflusst werden. Tatsächlich

**Abb. 2: Die Höhen der Meeresoberfläche in Metern über einem Ellipsoid. Die Meeresoberfläche richtet sich in erster Näherung senkrecht zur örtlichen Lotrichtung aus, die selbst durch die Massenunregelmäßigkeiten des Meeresbodens beeinflusst wird. Dadurch entsteht ein geglättetes Abbild des Meeresbodens, in dem Gräben und Berge der Tiefsee sowie tektonische Bruchzonen erkennbar sind.**



**Abb. 3: Die Meerestopographie (Meter): geringfügige Abweichungen gegenüber dem Gleichgewicht mit der Schwerkraft. Sie wird verursacht durch die großräumigen Oberflächenströmungen der Ozeane, deren Richtung durch die Vektoren dargestellt ist und deren Stärke mit der Dichte der Isolinien zunimmt.**

weicht der mittlere Meeresspiegel um 1 bis 2 Meter von einer Fläche ab, die sich ausbilden würde, wenn nur die Schwerkraft wirken würde. Diese Abweichungen werden als Meerestopographie bezeichnet. Die geographische Verteilung der Meerestopographie ist in Abbildung 3 dargestellt – überlagert mit dem Vektorfeld der Oberflächenströmungen, die diese Meerestopographie verursacht.

Die Kombination von Satellitenaltimetrie und Schwerefeldmissionen erlaubt es erstmals, die Meerestopographie mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen, um daraus Rückschlüsse auf die großräumigen Oberflächenströmungen der Weltmeere zu ziehen. Die Ergebnisse stimmen gut mit unabhängigen, sehr aufwändigen numerischen Modellberechnungen der Ozeanographie überein. Zusammen mit anderen Zustandsgrößen wie Salzgehalt und Temperatur können mit der Meerestopographie auch die Tiefenströmungen der Meere, vor allem aber der Transport von Masse und Energie berechnet werden – grundlegende Prozesse im System Erde, die entscheidenden Einfluss auf unser Klima besitzen. Massenverteilungen und Massentransporte sind seit eineinhalb Jahren Thema eines Forschungsschwerpunktes der

**Abb. 4: Monatsmittelwerte der durch Satellitenaltimetrie bestimmten Meereshöhen (graues Polygon) und der daraus abgeleitete langfristige Meeresspiegelanstieg von +3.4 mm/Jahr (rot).**

DFG (<http://www.massentransporte.de>), an dem sich auch das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut beteiligt.

**Immer in Bewegung: der Meeresspiegel**

Selbst wenn man die Wellen durch Mittelbildung glättet, ist der Meeresspiegel keineswegs ruhend. Die Meeresoberfläche wird durch zahlreiche Einwirkungen fortwährend verändert, wobei dies auf Zeitskalen von wenigen Stunden, Wochen, Monaten bis zu jährlichen, mehrjährigen oder ganz langfristigen Zeiträumen geschieht.

Allgemein bekannt sind die mit Perioden von rund 12 oder 24 Stunden auftretenden Gezeiten, die durch die wechselnden Anziehungskräfte von Mond und Sonne verursacht werden. Im offenen Ozean bewirken die Gezeitenkräfte einen Tidenhub (Unterschied zwischen Ebbe und Flut) von 1 bis 2 Meter.

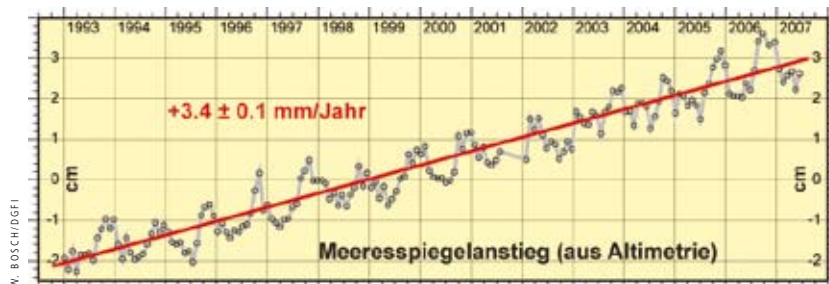
An der Küste, insbesondere bei sehr ausgedehnten Flachwassergebieten, kann der Tidenhub bis zu 10 Meter oder mehr betragen.

Weniger bekannt ist die Tatsache, dass der Meeresspiegel auch jahreszeitlich schwingt: Im Sommer bewirkt der Sonnenstand auf der Nordhalbkugel eine stärkere Sonneneinstrahlung als im Winter. Die Wassermassen der Nordhalbkugel erwärmen sich, dehnen sich aus und lassen den Meeresspiegel im Spätsommer um 1 bis 2 dm ansteigen. Im Frühjahr erreicht der Meeresspiegel der Nordhalbkugel wieder seinen tiefsten Stand. Mit sechs Monaten Verzögerung tritt der gleiche Effekt auf der Südhalbkugel auf.

Die Messreihen der Satellitenaltimetrie werden seit Oktober 1992 nahezu ununterbrochen durchgeführt und etwa alle zehn Tage wiederholt. Dadurch ist eine 15-jährige Zeitreihe entstanden, die Gezeiten, jahreszeitliche Oszillationen, aber auch Wirbelbildungen und episodische Effekte wie El-Niño erkennen lässt. Das DGFI untersucht systematisch die Kinematik des Meeresspiegels und stellt dazu einige aufschlussreiche Animationen unter <http://www.dgfi.badw.de/?sea-surface-variations> bereit.

**Der globale Meeresspiegelanstieg**

Die Messreihen der Satellitenaltimetrie lassen aber auch ganz langfristige Veränderungen des Meeresspiegels erkennen. Trägt man



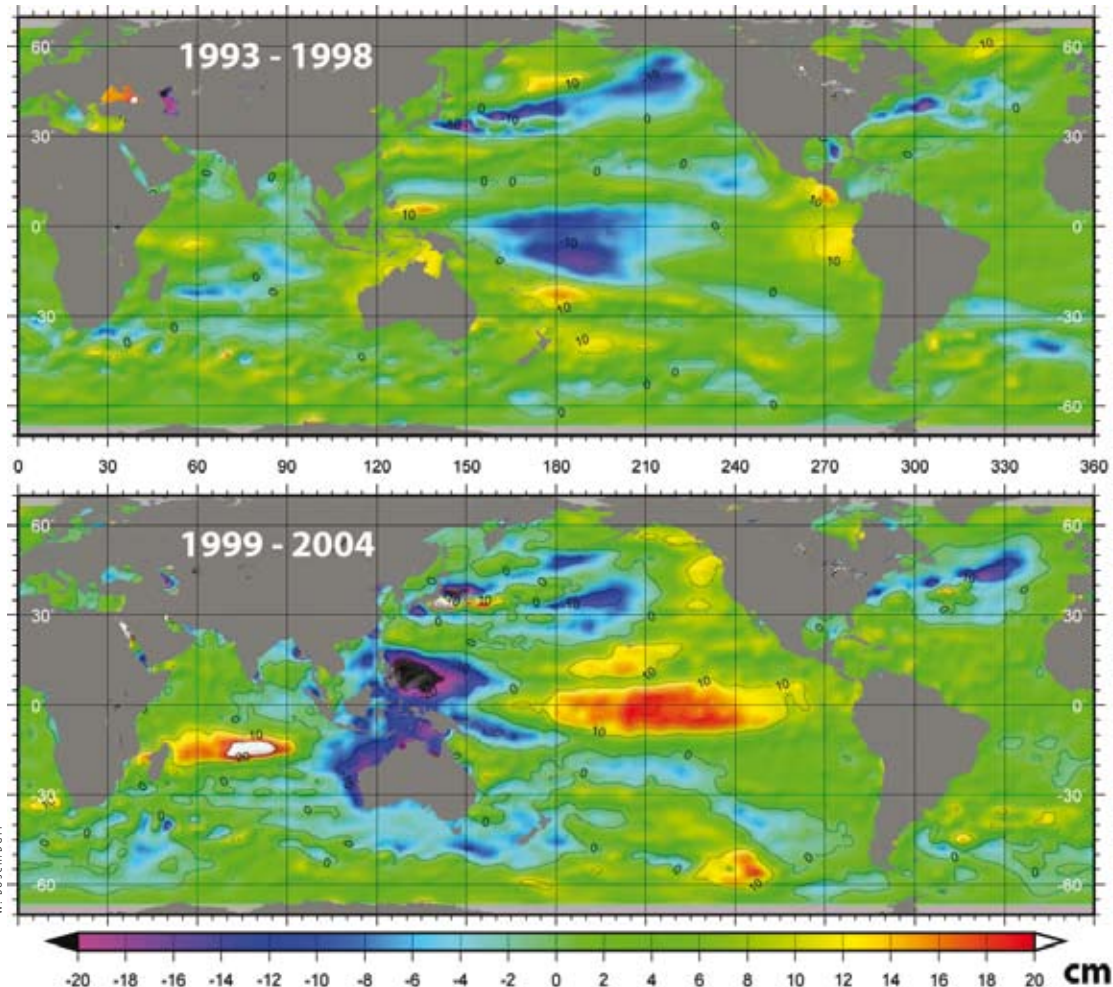


die Entwicklung der Meereshöhen über den verfügbaren Zeitraum von 15 Jahren auf, ergibt sich eine recht verlässliche Aussage über den mittleren Meeresspiegelanstieg: Abbildung 4 zeigt Monatsmittelwerte der Meereshöhen mit der daraus abgeleiteten Anstiegsrate von durchschnittlich +3.4 mm/Jahr. In den letzten 15 Jahren stieg der Meeresspiegel demnach im Mittel um etwa 5 cm. In seinem vierten Bewertungsbericht von 2007 (<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm>) bilanziert das Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) die Beiträge aller Komponenten zum Meeresspiegelanstieg mit +2.8 mm/Jahr.

Die Differenz zur Altimetrie bleibt bisher unerklärt. Das IPCC identifiziert selbst einige Unsicherheiten in seinen Abschätzungen. Die Langzeitstabilität der Altimetrie steht aber ebenfalls in Frage, und es ist zu beachten, dass die Satellitenaltimetrie einen Teil des Antarktischen Polarstroms nicht erfasst. Auch die jährlichen Schwankungen der Monatsmittelwerte (mit einem Maximum zu Beginn des letzten Quartals) werden noch nicht vollständig verstanden. In dem geschlossenen Wasserkreislauf der Erde müssen die Schwankungen der Wassermassen durch die Atmosphäre oder die kontinentale Hydrologie kompensiert werden. Trotz zahlreicher offener Fragen ist aber ein globaler Meeresspiegelanstieg von etwa +3 mm/Jahr unbestritten.

#### Dominant: regionale Meeresspiegeländerungen

Im Gegensatz zum mittleren globalen Meeresspiegelanstieg treten regional sowohl positive als auch negative Meeresspiegeländerungen mit erheblich höheren Änderungsraten von etwa  $\pm 20$  mm/Jahr auf. Der als moderat erscheinende mittlere Meeresspiegelanstieg von +3.4 mm/Jahr kann also durch



abweichende örtliche Entwicklungen völlig überlagert und dabei kompensiert oder verstärkt werden. Abbildung 5 stellt die regionalen Änderungen für die beiden Sechsjahres-Perioden 1993–1998 und 1999–2004 gegenüber. Der Vergleich der beiden Perioden lässt erkennen, dass der starke örtliche Anstieg oder Abfall des Meeresspiegels nicht als unveränderlich angesehen und in die Zukunft extrapoliert werden kann. Durch das Gleichgewicht mit der Schwerkraft müssten Anstieg oder Absinken nach einigen Jahren kompensiert werden – was zum Teil durch die gegenläufigen Entwicklungen in beiden Perioden bestätigt wird. Für den Golfstrom trifft dies allerdings nicht zu – er hat sich in beiden Sechsjahres-Perioden abgeschwächt.

Die bisher erkennbaren regionalen Änderungen können nur als Mo-

mentaufnahme einer sehr langperiodischen Variation der Meeresoberfläche verstanden werden, die erst nach einer erheblich längeren altimetrischen Zeitreihe erkennbar sein werden. Es ist deshalb zu wünschen, dass die Satellitenaltimetrie als permanentes Beobachtungsverfahren eingerichtet wird und die bisherigen Messreihen kontinuierlich fortgesetzt werden.



*Der Autor ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter und stellvertretender Direktor des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts (DGFI) verantwortlich für die Erdsystemanalyse durch Kombination geodätischer Beobachtungsverfahren. Das DGFI führt die Forschungsaufgaben der Deutschen Geodätischen Kommission (DGK) bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften aus.*

**Abb. 5: Regional steigt oder fällt der Meeresspiegel über mehrere Jahre mit erheblich höheren Änderungsraten als der mittlere globale Meeresspiegelanstieg von +3.4 mm/Jahr. 1993–1998 sank der Meeresspiegel im Zentralen Pazifik um bis zu 15 cm. Von 1999–2004 stieg er dort wieder um mehr als 15 cm, sank aber gleichzeitig im Indonesischen Ozean um mehr als 20 cm. Die Änderungen der ersten und zweiten Sechsjahres-Periode kompensieren sich zum Teil, nicht jedoch entlang der Achse des Golfstroms. Dort sank der Meeresspiegel in beiden Perioden – ein Indiz für eine Abschwächung des Golfstroms.**