

3.3 Meeresspiegelanstieg: Gefährdung kleiner Inseln

JENS SCHRÖTER

Sea level rise: hazard to small islands: sea level rise at small islands is very complex and heterogeneous. The rise rate is small in comparison to natural variability which may amount to several decimeters in amplitude and is mostly caused by ENSO. Natural processes like the growth of coral reefs stabilize the islands. However, a sea level rise of one meter and probably more is anticipated, making low lying island uninhabitable over the next centuries.

Versunkene Inseln und Kulturen haben die Menschheit seit langer Zeit fasziniert. Die Sage um das verschwundene Atlantis ist weit verbreitet. Überflutete Bauwerke – oder was man dafür halten könnte – beispielsweise im Mittelmeerraum geben immer wieder Anlass zu Spekulation. Wir brauchen aber gar nicht so weit zu gehen. An der Nordseeküste ist die Erinnerung an die große »Mandränke«, die Sturmflut, die die Stadt Rungholt verschlang, lebendig. Rungholt liegt jetzt auf dem Meeresgrund und der Sage nach hatten ihre Einwohner durch ihr Verhalten die Katastrophe selbst heraufbeschworen. Wattwanderer finden auch heute noch Spuren des Menschen aus der Vergangenheit.

Der globale Anstieg des Meeresspiegels und die Gefährdung kleiner Inseln durch Überfluten ist fast zu einem Synonym geworden. Seine Ausgabe 1/2011 macht der Bund Naturschutz Deutschland (BUND) auf mit der Luftaufnahme eines Atolls auf dem Titelblatt. Eingebildet erscheint wie aus dem Internet ein »pop-up Fenster« mit der Frage: Wollen Sie »diese Insel« wirklich löschen? Dieses Objekt wird sofort gelöscht. Diese Aktion kann nicht widerrufen werden. Darunter steht die große Überschrift: Klima schützen.

In zweifacher Hinsicht wird hier unterstellt, dass wir das Klima schützen sollen und, falls wir versagen, »diese Insel« unwiderruflich verloren sei. Tatsächlich reicht ein Anstieg des Meeresspiegels um 80 cm, um zwei Drittel der Marshall Inseln unter Wasser zu setzen; 90 cm überfluten den allergrößten Teil von Male, der Hauptstadt der Malediven. Spektakulär war die Kabinettsitzung der Regierung der Malediven, die unter Wasser stattfand. In den Medien wurde erfolgreich das Bild vermittelt: »Die kleinen Inselstaaten gehen unter und die industrialisierte Welt trägt die Verantwortung dafür«.

Während so die informierte Öffentlichkeit die Probleme der kleinen Inseln für Auswirkungen des globalen Klimawandels und des weltweiten Anstiegs des Meeresspiegels hält, kommen Gruppen, die sich als »Klimaskeptiker« bezeichnen, zu einem anderen Schluss. Sie werten Pegelmessungen des Meeresspiegels auf verschiedenen Inseln aus und wollen so einen Anstieg des Meeres widerlegen (z.B. MÖRNER et al. 2004). Dem widerspricht der Leiter des permanenten Meeresspiegelarchivs (PS-MSL) WOODWORTH (2005) vehement. Im vorliegenden

Artikel will ich die Situation der Inseln beschreiben, und besonders darauf eingehen, dass der relative Meeresspiegel nicht überall gleichmäßig ansteigt

Worin liegen die Probleme?

Als die am stärksten gefährdeten Inseln und Staaten gelten im Pazifik die Marshall Inseln, Kiribati, Tuvalu, Tonga, die Föderierten Staaten von Mikronesien und Cook Inseln, im Atlantik Antigua und Nevis sowie im Indischen Ozean die Malediven. Tuvalu, Tokelau und die Marshall Inseln besitzen eine maximale Höhe von nur 4 Metern. Eine ausführliche Beschreibung der Topographien der kleinen Inseln und ihrer Verletzlichkeit gegenüber einem Anstieg des Meeresspiegels findet man bei WOODROFFE (2008). Was wissen wir über den Wasserstand in diesen Regionen?

Der vierte Sachstandbericht (AR4) des IPCC widmet dem Meeresspiegel besondere Beachtung. Im globalen Mittel beobachten wir seit dem 18. Jahrhundert einen Anstieg um etwa 20 cm. Dabei zeigt sich in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts eine deutliche Beschleunigung (BINDOFF et al. 2007). Wie in Kap. 2.7: Köhl&Stammer dargestellt wird, sind die Messpegel räumlich nicht gleichmäßig verteilt. Gemessene Änderungen des Wasserstands hängen deutlich von regionalen und lokalen Gegebenheiten ab. GERDES (2011) führt aus: »Veränderungen der Massenverteilung, Bewegungen der Erdkruste und Veränderungen der ozeanischen Zirkulation haben Einfluss auf den Pegelstand, ohne dass der globale Meeresspiegel sich dabei notwendigerweise verändert. Weitere Einflussfaktoren sind Änderungen in der mittleren Luftdruckverteilung, natürliche Änderungen der lokalen Topographie sowie Baumaßnahmen und Änderungen im Gezeitenregime. Dementsprechend heterogen sind die lokalen Trends, die für die Abschätzung des globalen Meeresspiegels korrigiert werden müssen«.

Es sei wichtig, die Unsicherheiten zu verstehen, die aus der Veränderlichkeit des Meeresspiegels resultieren, die mit natürlichen Schwankungen der großräumigen Ozeanströmungen verbunden sind. Prinzipiell müsse damit keine Änderung des globalen Meeresspiegels verknüpft sein. Die großräumigen natürlichen Signale erschweren aber die Auswertung der Satellitendaten.

Die hier genannten lokalen Unterschiede sind in Abb. 2.7-4 (Kap. 2.7: Köhl&Stammer) gut erkennbar und im Pazifik wesentlich durch die großräumige Schwankung ENSO (El Niño/Southern Oscillation) gekennzeichnet. Im Nordatlantik bewirkt die Nordatlantischen Oszillation (NAO) Trends mit unterschiedlichen Vorzeichen. Satellitenaltimeter sind erst seit etwa 20 Jahren verlässlich. Ist also der Mittelungszeitraum von zwei Jahrzehnten zu kurz? Das Bild bleibt selbst nach 50 Jahren Mittelung komplex, mit unterschiedlichen Vorzeichen im Trend (CHURCH et al. 2004). Neben den starken Schwankungen aufgrund von ENSO hat auch die Pazifische Dekadische Oszillation (PDO) entscheidenden Einfluss auf den Meeresspiegel. Die PDO wird aus Änderungen der Oberflächentemperatur im nördlichen Pazifischen Ozean abgeleitet mit ausgeprägten Warm- und Kaltphasen, die Jahrzehnte andauern können. Entsprechend schwankt auch der Meeresspiegel in großen Gebieten des Pazifischen Ozeans.

Aus diesen Gründen kommt auch die UNESCO Konferenz über den regionalen Meeresspiegelanstieg in Paris 2011 zum Ergebnis, dass die Pegelmessungen auf kleinen Inseln nicht geeignet sind, den globalen Meeresspiegel daraus abzuleiten. Im Umkehrschluss könnte man sagen, der globale Meeresspiegel ist für die Inseln unerheblich. Das ginge aber viel zu weit. Der allgemeine Anstieg ist auf allen Inseln gemeinsam. Doch regionale und selbst lokale Schwankungen überdecken dies Signal häufig. Wir müssen daher jede Insel für sich betrachten, solange wir nicht von einem dramatischen Anstieg ausgehen wollen.

Was sind die Fakten?

Was für die Analyse des globalen Meeresspiegels als Korrekturen angesehen wird, sind für die Küstenbewohner reale Signale. Manche sind sich über eine Entfernung

von mehr als 2.000 km sehr ähnlich, wie die von Guam auf dem Marianen Archipel und Kwajalein auf den Marshall Inseln (siehe Abb. 3.3-1), die zu den längsten gut bekannten Messreihen gehören. Es ist bemerkenswert, wie ähnlich sich der Meeresspiegel bei den verschiedensten zwischenjährlichen Schwankungen verhält. Schaut man allerdings den Trend an, so ist er in Guam zwischen 1950 und 1997 negativ und in Kwajalein klar positiv (CHURCH et al. 2006). Später jedoch wird der Trend in Guam positiv und sogar größer als in Kwajalein.

Vergleicht man diese Messungen mit den Zeitreihen der Gezeitenpegel in Funafuti auf Tuvalu (Abb. 3.3-2) sieht man ähnlich große Ausschläge nach unten mit niedrigem Meeresspiegel. Sie werden durch große El-Niño Ereignisse hervorgerufen. Der Pegel von Funafuti war nicht zufriedenstellend und wurde später durch Funafuti B ergänzt. Die Serien überlappen sich für gut zehn Jahre und man kann fast von einer einzigen langen Messung sprechen. Es lohnt sich aber genauer hinzuschauen: Der Trend des älteren Pegels liegt im gemeinsamen Zeitraum um 0.6 mm/Jahr höher als der jüngere. Dies wird einer vertikalen Landbewegung zugeschrieben (CHURCH et al. 2006). Durch eine starke Entnahme von Grundwasser schrumpft das Erdreich zusammen, ein ähnlicher Vorgang wie er in Deutschland aus Bergbaugebieten bekannt ist. Die Erdoberfläche sinkt mit allen Gebäuden etc. langsam ab. Der Pegel liegt dann niedriger und zeigt so gegenüber einem unveränderten Wasserstand höhere Werte an. Für die Bestimmung des globalen Meeressiegels wäre dies ein Korrektur; für die Insel deutet es aber auf eine drohende Überflutung. Dieser Vorgang ist an der Amerikanischen Golfküste stark ausgeprägt an der Öl und Gas in großem Stil gefördert wird. Er erreicht mehrere Millimeter pro Jahr, wie Pegelmessungen unterstützt vom globalen Positionierungssystem GPS belegen.

Eine ausführliche Analyse der Pegeldata von zahl-

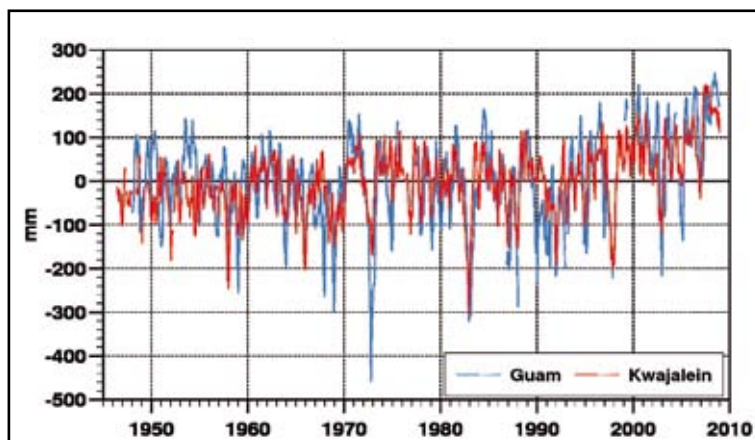


Abb. 3.3-1: Zeitreihen der Gezeitenpegel von Guam (**blaue Linie**) auf dem Marianen Archipel 17.26°N 144.39°E (ID 701001) und Kwajalein (**rote Linie**) auf den Marshall Inseln 03.44°N 167.44°E (ID 720011), die zu den längsten gut bekannten Messreihen gehören. Es ist bemerkenswert, wie ähnlich sich der Meeresspiegel über eine Entfernung von mehr als 2000 km verhält. Schaut man allerdings den Trend an, so ist er in Guam zwischen 1950 und 1997 negativ und in Kwajalein deutlich positiv (Church et al., 2006). Daten: PSMSL, Grafik Manfred Wenzel, AWI.

reichen Inseln wurde 2006 von CHURCH et al. vorgelegt. Die Besonderheiten der Lage der einzelnen Inseln sowie der Pegel wird gründlich beschrieben und in Zusammenhang gestellt. In den *Tab. 3.3-1* und *-2* werden die Ergebnisse für den Pazifischen und den Indischen Ozean zusammengefasst. Für den Pazifik liegen gute Messungen vor, die bis zum 2. Weltkrieg zurückreichen. Die beschriebene hohe Variabilität ist aus den Zahlen gut erkennbar. Es wird verständlich, dass man leicht extreme Anstiege »beweisen« kann. Ebenso finden Kritiker des globalen Klimawandels schlagkräftige Indizien dafür, »dass der Meeresspiegel nicht steigt«.

CHURCH vergleicht seine Datenanalysen mit Rekonstruktionen, die er aus einer gemeinsamen Auswertung von Pegelmessungen und Radaraltimetrie von Satelliten gewonnen hat. Während sich die Variabilität befriedigend gut abbildet, ist die Ableitung von Trends problematisch. Gegebenheiten der einzelnen Inseln sind ausschlaggebend. Einen Versuch, zeitliche Lücken in Pegelmessungen zu schließen und die Länge der Messreihen durch benachbarte Messungen in die Vergangenheit zu verlängern unternehmen WENZEL & SCHRÖTER (2010). Ebenfalls wird die Variabilität zufriedenstellend rekonstruiert. Bei den Trends sind die Abweichungen von den Beobachtungen etwas größer.

Der Ansatz von Church et al. hat den Vorteil, dass Wasserstände unmittelbar global bestimmt werden, auch an Orten an denen keine Pegelmessungen gemacht wurden. Von Nachteil ist, dass nur Messungen vom selben Zeitpunkt in die Berechnung eingehen. Bei Wenzel und Schröter werden im ersten Schritt die Lücken in den Messungen gefüllt und so die Serien homogenisiert. Dabei werden auch Daten aus verschiedenen Zeitpunkten berücksichtigt. Landbewegungen müssen nicht wie beim ersten Verfahren von außen vorgegeben werden sondern werden intern korrigiert. Ein zweiter Schritt ergibt dann wie bei Church et al. die zeitliche

Entwicklung des Meeresspiegels für jeden Ort. Beide Methoden sind empirisch. Im Bereich der trainierten Daten sind die Ergebnisse vergleichbar gut. Für die Vergangenheit zeigen sich aber Unterschiede vor allem bei dekadischen Schwankungen, die bei CHURCH et al. stärker ausgeprägt sind. Interessant ist, wie sensitiv die globalen Mittel auf die Aufbereitung der Trainingsdaten aus der Radaraltimetrie reagieren. Trends in den beobachteten Daten unterscheiden sich je nach Korrekturverfahren oft um 10–20% und die Rekonstruktionen zurück bis zum Jahr 1900 ebenso. Wir müssen Unsicherheiten in diesem Rahmen akzeptieren.

Die Rekonstruktionen gelingen für den Indischen Ozean deutlich schlechter als für andere Regionen, wie den Pazifik. Dies mag auch an der sehr starken Variabilität im Indik liegen, die vornehmlich vom Monsun und saisonalen Schwankungen geprägt ist. Auch aus den Pegelmessungen selbst lässt sich kein allgemeines, klares Bild gewinnen. Lokal gesehen bewegt sich viel und der hohe Trend bei Male auf den Malediven macht verständlich, warum deren Bewohner um ihre Inseln und ihre Zukunft fürchten. Male ist besonders gefährdet, da der Ort mittlerweile nicht nur die gesamte Insel einnimmt, sondern auch noch die umgebenden Riffe überbaut wurden.

Was bringt die Zukunft?

Welchen Anstieg des Meeresspiegels an den kleinen Inseln in den niedrigen Breiten erwarten wir bis zum Ende dieses Jahrhunderts? Die Erwärmung des Ozeans als Reaktion auf eine wärmere Atmosphäre oder veränderte Strahlungsbilanz wird noch mehrere Jahrhunderte weiter gehen. Da das Meer stabil geschichtet ist mit warmen Wasser über dem kalten Wasser, stabilisiert eine weitere Erwärmung diesen Zustand nur noch mehr. Im Gegensatz zur Atmosphäre kann die Wärme nur langsam vertikal vordringen, was die langen Reaktionszeiten des Ozean erklärt.

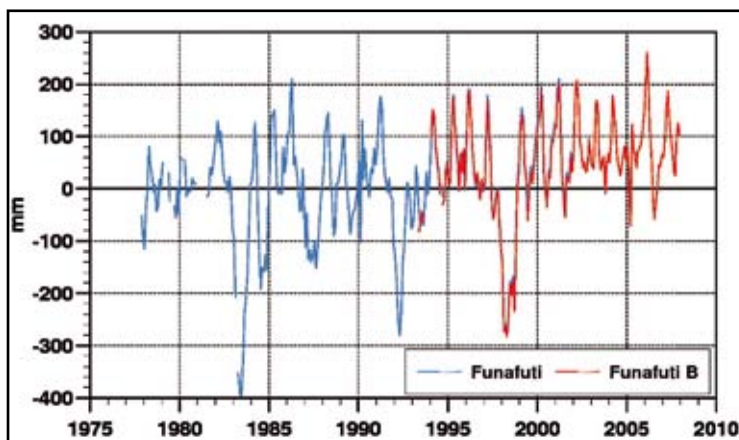


Abb. 3.3-2: Zeitreihen der Gezeitenpegel in Funafuti auf Tuvalu. Funafuti (ID 732011, **blaue Linie**) 08.32°S 179.13°E wurde durch Funafuti B (ID 732012, **rote Linie**) 08.30°S 179.12°E ergänzt. Die großen Ausschläge nach unten mit niedrigem Meeresspiegel werden durch große El-Niño Ereignisse hervorgerufen. Der Trend des älteren Pegels liegt im gemeinsamen Zeitraum um 0.6 mm pro Jahr höher als der jüngere. Dies wird durch eine vertikale Landbewegung verursacht. Daten: PSMSL, Grafik Manfred Wenzel, AWI.

Tab. 3.3-1: Trends des relativen Meeresspiegels an kleinen pazifischen Inseln (nach Church et al. 2006). Selbst nach Mittelungszeiträumen von mehreren Dekaden bleiben noch große Unsicherheiten von ± 0.3 mm/Jahr und mehr. Besonders bemerkenswert sind die regionalen Unterschiede im Trend, sogar im Vorzeichen!

Pegelstation	Länge	Breite	Beginn	Ende	Dauer	Trend
					Jahre	mm/Jahr
Guam	144°39 E	13°26 N	Jan 50	Nov 97	48	-0.6 \pm 0.5
Yap	138°08 E	9°31 N	Apr 73	Dez 00	28	-0.4 \pm 1.3
Kanton Is	171°43 W	2°49 S	Mai 72	Dez 00	29	-0.4 \pm 0.8
Honiara	159°57 E	9°26 S	Dez 74	Dez 01	27	-0.1 \pm 1.6
Christmas Is	157°29 W	1°59 N	Feb 74	Dez 00	27	-0.1 \pm 1.3
Noumea	166°26 E	22°18 S	Mrz 67	Dez 00	34	0.2 \pm 0.4
Midway Is	177°22 W	28°13 N	Jan 50	Dez 01	52	0.3 \pm 0.3
Johnston Is	169°31 W	16°45 N	Jun 53	Apr 99	46	0.4 \pm 0.3
Rikitea	134°57 W	23°08 S	Okt 69	Feb 96	26	1.0 \pm 0.6
Chuuk Moen Is	151°51 E	7°27 N	Nov 52	Okt 87	35	0.9 \pm 0.7
Malakal	134°28 E	7°20 N	Jun 69	Dez 00	32	1.0 \pm 1.2
French Frigate Shoals	166°17 W	23°52 N	Jul 74	Dez 00	27	1.0 \pm 1.0
Naviliwili Bay	159°21 W	21°58 N	Jan 55	Dez 01	47	1.3 \pm 0.3
Honolulu	157°52 W	21°19 N	Jan 50	Dez 01	52	1.3 \pm 0.2
Kwajalein	167°44 E	8°44 N	Jan 50	Dez 01	52	1.3 \pm 0.3
Pago Pago	170°41 W	14°17 S	Jan 50	Aug 00	51	1.6 \pm 0.3
Pohnpei	158°14 E	6°59 N	Apr 75	Dez 00	26	1.8 \pm 1.3
Wake Is	166°37 E	19°17 N	Jun 50	Dez 01	52	2.0 \pm 0.3
Kahului Harbor	156°28 W	20°45 N	Jan 51	Dez 01	51	2.1 \pm 0.2
Funafuti	179°13 E	8°32 S	Nov 77	Dez 01	24	2.3 \pm 1.5
Kanton Is	171°43 W	2°48 S	Jan 50	Dez 67	18	2.3 \pm 0.8
Majuro	171°22 E	7°06 N	Okt 68	Dez 01	33	2.8 \pm 0.6
Papeete	149°34 W	17°32 S	Jul 75	Dez 01	27	2.9 \pm 0.5
Suva	178°26 E	18°08 S	Mai 75	Dez 01	27	6.7 \pm 0.8

Tab. 3.3-2: Trends des relativen Meeresspiegels an kleinen Inseln im Indischen Ozean (nach Church et al., 2006). Da qualitativ gute Messreihen hier nur viel kürzer sind als im Pazifik, streuen auch die Ergebnisse stark und sind weniger verlässlich. Bemerkenswert ist der Trend in Port Louis, der vor 1964 positiv und nach 1986 negativ ist.

Pegelstation	Länge	Breite	Beginn	Ende	Dauer	Trend
					Jahre	mm/Jahr
Port Louis	57°30 E	20°09 S	Aug 86	Dez 00	14	-3.7 \pm 1.5
Rodrigues Island	63°25 E	19°40 S	Dez 86	Dez 00	14	-3.6 \pm 1.9
Port Louis	57°30 E	20°09 S	Jan 53	Nov 64	12	1.9 \pm 1.5
Male	73°32 E	4°11 N	Dez 90	Dez 00	10	3.7 \pm 1.4
Hanimaadhoo	73°10 E	6°46 N	Aug 91	Dez 00	9	4.4 \pm 1.9
Pt La Rue	55°32 E	4°40 S	Feb 93	Dez 00	8	5.6 \pm 6.6
Gan	73°09 E	0°41 S	Aug 91	Dez 00	9	8.4 \pm 1.7
Cocos Islands	96°53 E	12°07 S	Jan 93	Dez 01	9	12.1 \pm 4.6

Wo steigt der Ozean am schnellsten an? Allgemein wird vorhergesagt, dass sich die polaren Ozeane stärker als der globale Ozean erwärmen werden. Der Ausdehnungskoeffizient von kaltem Wasser ist aber klein, so dass selbst eine große Erwärmung von kaltem Wasser nur eine moderate Ausdehnung bewirkt. Bei warmem Wasser liegt der Fall anders. Der Ausdehnungskoeffizient selbst ist temperaturabhängig und steigt mit der Temperatur stark an. Demzufolge genügt eine leichte Erwärmung von warmem Wasser wie in den Tropen für erhebliche Effekte. So erklärt sich, warum im IPCC AR4 der regionale Anstieg des Meeresspiegels durch Ausdehnung im tropischen Bereich hoch und in den polaren Breiten niedrig ist. Die kleinen Inseln und Atolle liegen also ungünstig in Bezug auf ihre Gefährdung durch Meeresspiegelanstieg.

Es werden auch Wasserstandsänderungen durch Modifikationen in den Strömungen erwartet z.B. für die großen Stromsysteme wie dem Antarktischen Zirkumpolarstrom. Die Häufigkeit und die Dauer von ENSO kann variieren ebenso die Phasenlage der PDO oder der NAO. Die Schwankungen dürften sich auf die Häufigkeitsverteilung der Wasserstände auswirken und damit auf den Mittelwert. Dies gefährdet die Inseln jedoch nicht. Die eigentliche und unmittelbare Gefahr dürfte im Anstieg des Meeres durch Schmelzwasser bestehen.

Welchen Einfluss hat das Schmelzen von Gletschern und Inlandeis?

Seit dem Höhepunkt der letzten Eiszeit vor etwa 20.000 Jahren stieg der globale Meeresspiegel um über 100 Meter an. Der Anstieg fand vor ca. 10.000 Jahren sein vorläufiges Ende und Schwankungen sind seitdem sehr viel kleiner geworden. Erst im letzten Jahrhundert begann wieder ein globales Signal. Wir beobachten heute ein Abschmelzen vom Grönländischen Eisschild und dem der Antarktis, hauptsächlich in der Westantarktis und an der Antarktischen Halbinsel. Verstärkt gehen auch die Gletscher zurück.

Mit Ozeanmodellen kann man nachvollziehen, wie sich das zusätzlich Schmelzwasser über die Erde verteilt. Nahe an der Quelle nimmt der Salzgehalt deutlich ab und das Schmelzwasser folgt den lokalen Strömungen. Der Druckausgleich im Meer bewirkt aber einen globalen Anstieg der durch die zugeflossene Masse bedingt ist und oft als eustatischer Effekt bezeichnet wird. Ferner sehen wir wegen der geringeren Dichte des Schmelzwasser-Meerwassergemischs in Quellnähe einen stärkeren Anstieg, der mit sterischem Effekt bezeichnet wird. Studien, wie sich die Ozeanzirkulation in Abhängigkeit von der Quellstärke darauf

einstellt, sind zahlreich. Nach 10.000 Jahren ist in jedem Fall der Ozean gut durchmischt und so, wie wir ihn heute kennen.

Die zur Zeit gemessene Menge an Eisverlust entspricht je nach Beobachtung 1 bis 2 mm pro Jahr. Dies ist zu wenig um ernsthafte Änderungen der Zirkulation im Meer zu bewirken und die meisten Modellstudien nehmen daher auch extreme Schmelzszenarien an, um handfeste Veränderungen im Ozean zu erzielen (STAMMER 2008). Da die kleinen Inseln alle weit von den Quellregionen liegen, können wir von einem gleichmäßigen Anstieg in Äquatornähe ausgehen. Die Ozeanmodelle beziehen sich alle auf ein unverändertes Schwerfeld der Erde. Das ist jedoch nur die halbe Geschichte. Die »feste« Erde ist in gewissen Maß elastisch, auf Jahrhunderte gesehen sogar visco-elastisch. Abschmelzen von Eis bewirkt eine Umverteilung der Massen auf der Erde. Damit ändert sich das Geoid und die Lage der elastischen Erde relativ dazu.

Zur Berechnung dieser Bewegung muss die »Meeresspiegelgleichung« (sea level equation) gelöst werden. Ein veränderter Meeresspiegel bedeutet eine neue Massenverteilung auf der Erde. Sie wirkt als Kraft auf die Erde und bewirkt eine elastische Reaktion. Diese führt zu Vertikalbewegungen der Erdoberfläche, an die sich der Meeresspiegel anpasst. Die Anpassung erzeugt erneut Kräfte mit entsprechender Ausgleichsbewegung und so fort. Die Meeresspiegelgleichung bezeichnen wir als implizit, weil der Meeresspiegel auf beiden Seiten des Gleichheitszeichens steht. Sie ist nur mit einigem Aufwand lösbar und daher werden gern vereinfachende Annahmen gemacht. Hier nehmen wir an, das der aktuelle Anstieg des Meeres gering ist und keine wesentlich neue Küstenlinie erzeugt. Ferner betrachten wir kurze Zeiträume, so dass die langsame, viskose Antwort noch nicht ins Gewicht fällt.

Eine weitere Komplikation ergibt sich daraus, dass die Massenumverteilung auch den Trägheitstensor der Erdrotation beeinflusst. Aus Gründen der Drehimpulserhaltung erzeugt dies eine geringe Veränderung der Erddrehung, also der Tageslänge und der Richtung der Rotationsachse. Damit verbunden ist eine Anpassung der Fliehkräfte und des Geoids. Alle diese Effekte wurden von RIETBROEK et al. (2011) bei der Berechnung von charakteristischen »Fingerabdrücken« berücksichtigt. Die »Fingerabdrücke« zeigen räumliche Strukturen, wie sich der relative Meeresspiegel beim Eisschmelzen in verschiedenen Regionen verhält. Die Berechnung von Fingerabdrücken und ihre Verwendung bei der Analyse von Pegelmessungen wurden als erstes von MITROVICA (2001) eingeführt. Zu dem »Fingerabdruck« muss noch der oben beschriebene Meeresspiegelanstieg durch Erwärmung und Abnahme des Salzgehalts

(sterische Effekte) und angepasste Strömungen dazu gerechnet werden.

Die Ergebnisse sind in den *Abb. 3.3-3* und *-4* für Gletscherschmelzen in Alaska und im Himalaya dargestellt. Es überrascht zunächst, dass wir in Quellnähe große Regionen mit einem Abfall des Meeresspiegels finden. Hier ist die Abnahme der Erdanziehung durch den lokalen Massenverlust so groß, dass sie den allgemeinen Anstieg des Meeresspiegels überwiegt. Die blaue Farbe zeigt, dass der Abfall des Meeresspiegels bis in große Entfernungen zur Quelle reicht. Was bedeutet das Ergebnis für die kleinen Inseln? Zur Zeit wird ein erhebliches Schmelzen der Gletscher von Alaska gemessen und die in *Abb. 3.3-3* angenommene Quellstärke von 0,15 mm (globales Äquivalent) pro Jahr ist gut vertretbar. Man erkennt, dass in Äquatornähe der Anstieg leicht über dem Durchschnitt liegt. Die ganzen niedrigen Breiten sind in etwa gleichermaßen betroffen.

Das Schmelzen der Gletscher im Himalaya ist bisher weniger ausgeprägt, könnte aber beim Fortschreiten der Erwärmung ebenfalls erheblich sein. Für diese Region hat der Fingerabdruck (*Abb. 3.3-4*) eine ganz andere Form. Die negative Zone reicht bis in den Indischen Ozean hinein. Die Malediven und andere kleine Inseln wären weniger stark betroffen. Selbst im Westpazifik

liegen große Gebiete mit unterdurchschnittlichem Anstieg. Gletscherschmelze im Himalaya stellt also eine etwas geringere Gefahr für die kleinen Insel dar als für beispielsweise Nordamerika. Weitere Fingerabdrücke brauchen hier nicht gezeigt zu werden. Für Grönland geht die Nulllinie des Meeresspiegelanstiegs mitten durch den Nordatlantik. Eisverluste werden auch in Patagonien und auf der Antarktischen Halbinsel ebenso wie im Westantarktischen Eisschild beobachtet. Deren Fingerabdrücke zeigen für niedrige Breiten leicht überdurchschnittliche Werte. Im Großen und Ganzen sind die kleinen Inseln von schmelzendem Eis gleichermaßen und von der Erwärmung stärker betroffen als die durchschnittlichen Küsten. Die elastische Landbewegung sowie der Effekt einer veränderten Erdrotation sind dabei mit berücksichtigt (nach RIETBROEK et al. 2011)

War der Meeresspiegel an den Inseln nicht schon deutlich höher?

Das ist richtig. Der relative Meeresspiegel hat sich an den kleinen Inseln im Verlauf der Eiszeiten mehrfach dramatisch geändert. Während der letzten Eiszeit ragten sie hoch als Kalkfelsen über das Meer und verkarsteten. LAMBECK et al. (2010) geben eine sehr klare und ausführliche Beschreibung der geophysikalischen Zusammen-

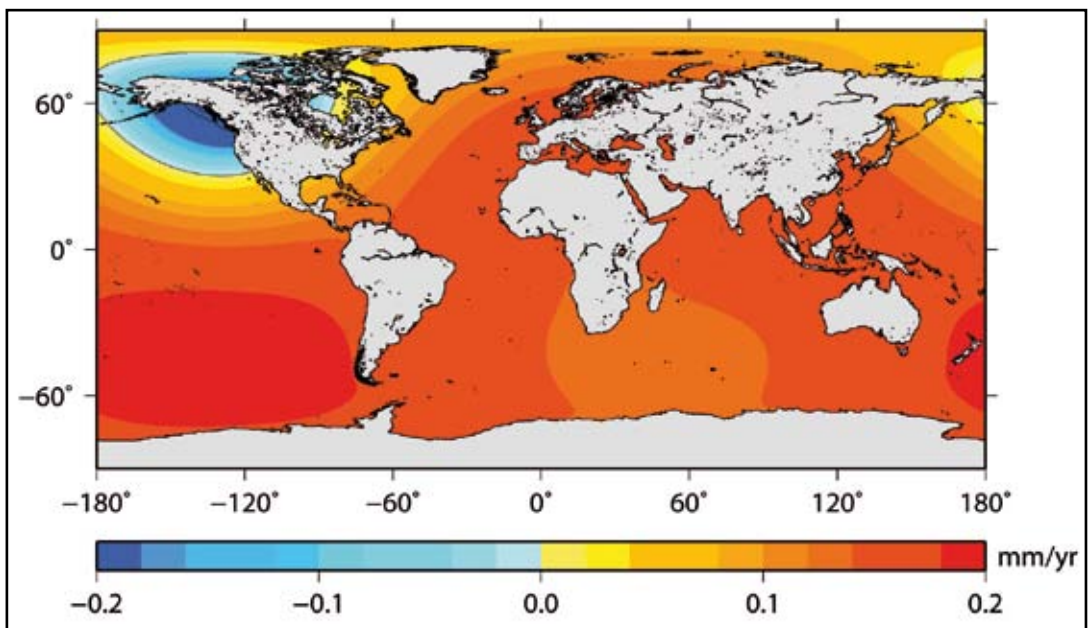


Abb. 3.3-3: Der relative Anstieg des Meeresspiegels beim Abschmelzen von Gletschern im Süden von Alaska. Die Quellstärke ist mit 0,15 mm/Jahr für den globalen Ozean angenommen. Durch die Angleichung des Schwerfelds der Erde ergibt sich eine regional stark variierende Änderung des Meeresspiegels relativ zu den Küsten. Die elastische Landbewegung sowie der Effekt einer veränderten Erdrotation sind dabei mit berücksichtigt (nach RIETBROEK et al. 2011)

hänge und der Rolle von Korallen. Die durch Vulkane entstandenen Inseln sinken nach dem Erlöschen des Vulkans langsam unter ihrem Gewicht in die Erdkruste ein. Die Erosion tut ein Übriges und langsam werden die Inseln kleiner bis sie ganz verschwinden. Dies ist gut an der Inselkette von Hawaii zu sehen. Während die Hauptinsel noch durch Lava wächst, schrumpfen die anderen Inseln schon. Ihr Schicksal ist an der Fortsetzung der Inselkette als untermeerische Vulkankegel zu sehen. Sie erstreckt sich als die Emperor Seamounts über tausende Kilometer nach Nordwesten.

In Äquatornähe ist es möglich, dass das Korallenwachstum mit dem Versinken und mit einem langsamen Anstieg des Meeresspiegels Schritt hält. Beim Anstieg des Wassers nach der Eiszeit wuchsen die Korallen mit und brachten die Inseln auf ihre heutige Gestalt. Obwohl sie nur unter Wasser wachsen sind die Korallen wesentlich für den Erhalt der Inseln. Sie lagern fortwährend neues Material ab, das durch Wellen und Stürme an den Strand und darüber geworfen wird. Wie kommt aber, dass die meisten Atolle deutlich über die Brandungszonen hinaus ragen? Die Antwort ist einfach. Der Meeresspiegel lag von gut 4.000 Jahren um mehrere Meter über dem heutigen. Historische Küstenlinien beweisen diese in Fachkreisen als high stand bezeichnete Tatsache. MITROVICA & PELTIER (1991) zeigen, wie es

zum high stand kam und warum der Meeresspiegel an den kleinen Insel danach gefallen ist.

Da hier lange Zeitskalen eine Rolle spielen muss man das viskose Verhalten der Erde berücksichtigen. Es reicht bis in den Erdmantel und wird oft als postglaziale Bewegung (postglacial rebound oder besser glacio isostatic adjustment) bezeichnet. Während der Eiszeit wurde die Erde in hohen Breiten durch die Last der Eismassen eingedrückt und im Erdmantel fand eine massive Ausgleichsbewegung in Richtung Äquator statt. Nach dem Schmelzen der Eisschilde waren die darunter liegenden Gebiete von der Last befreit. Langsam fließt der Erdmantel zurück und die abgetauten Regionen heben sich, wie wir in Skandinavien gut beobachten können. Für die Äquatornähe ergibt sich, dass die Massenanomale nun polwärts strömt und sich langsam auflöst. Der gleiche Prozess, den wir aus den Fingerabdrücken kennen, tritt hier in Erscheinung. Wo die Masse verloren geht, wenn auch langsam, sinkt der relative Meeresspiegel. MITROVICA & PELTIER (1991) schätzen den Rückgang auf etwa 2 bis 3 Meter, je nach Annahmen über die Viskosität im Erdmantel. Ein Bruchteil dieser Vertikalbewegung um mehrere Millimeter pro Jahr hält auch heute noch an. Der absolute Betrag ist weniger gewiss, aber dass die Bewegung das Leben der kleinen Inseln verlängern hilft ist klar.

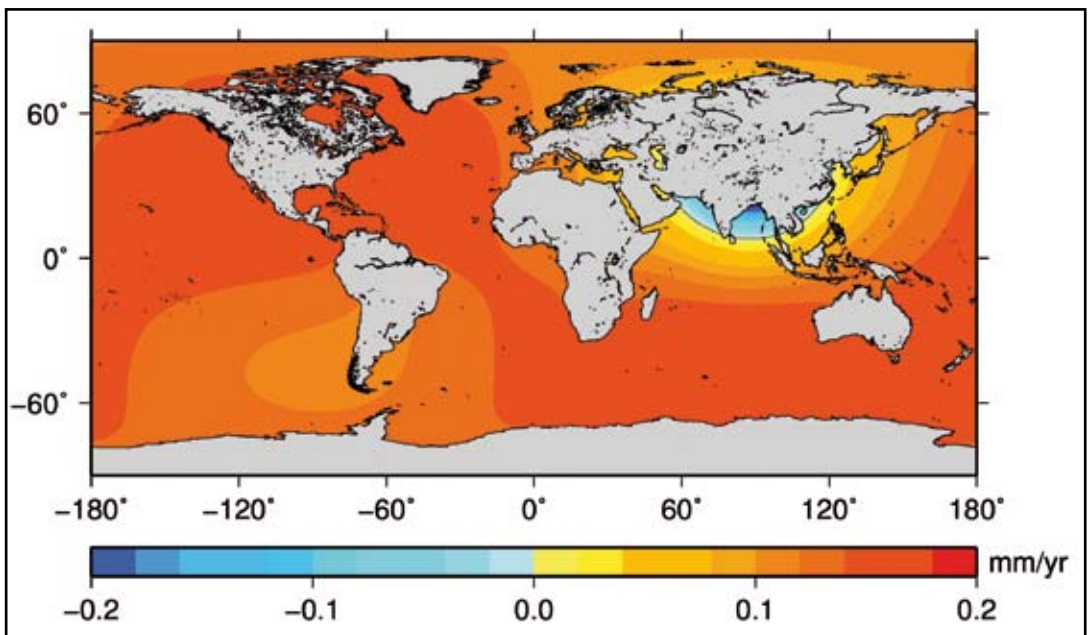


Abb. 3.3-4: Der relative Anstieg des Meeresspiegels beim Abschmelzen von Gletschern im Himalaya. Die Quellstärke mit 0,15 mm/Jahr für den globalen Ozean angenommen. Durch die Angleichung des Schwerfelds der Erde ergibt sich eine regional stark variierende Änderung des Meeresspiegels relativ zu den Küsten. Die elastische Landbewegung sowie der Effekt einer veränderten Erdrotation sind dabei mit berücksichtigt (nach RIETBROEK et al., 2011)

Fazit

Der derzeitige Anstieg des Meeresspiegels ist mit ca. 3 mm/Jahr langsam und die kleinen Inseln werden noch einige Jahrzehnte weiter bestehen können. Auf lange Sicht sieht es dagegen sehr finster aus. Allein die Erwärmung der Atmosphäre, die wir schon heute beobachten, wird den Ozean noch auf Jahrhunderte mit erwärmen, auch angenommen, es gelänge uns, das »2 Grad Ziel« für die Atmosphäre zu erreichen. Eine Faustregel (gültig für nahe Zukunft) besagt, dass für jedes Grad Erwärmung der Meeresspiegel um 0,5 Meter ansteigt. Ein Wert von einem Meter, der für viele der Inseln fatal ist, ist demnach unausweichlich. Hierbei sind die schmelzenden Gletscher und Inlandeis noch gar nicht eingerechnet, die zur Zeit erheblich beitragen. Die Inseln profitieren auch nicht von der regionalen Verteilung des Anstiegs durch Erwärmung. Im äquatorialen Bereich wird vom IPCC eine stärkere Steigerung als im Durchschnitt erwartet. Langfristig gehen also die Inseln verloren oder werden für die menschliche Besiedelung ungeeignet. PERNETTA beschreibt schon 1992 die drohenden politischen und sozio-ökonomischen Folgen.

Kurzfristig aber besteht die Gefährdung der Bevölkerung der kleinen Inseln vor allem in großen Ereignissen wie Wirbelstürmen, Tsunamis und Erdbeben. Weniger spektakulär sind die lokalen Folgen des Meeresspiegelanstiegs (GAFFIN 1997) wie vermehrte Erosion, Versalzung von Grundwasser, Verlust von Ackerland, verstärkte Gefährdung von Bauwerken sowie Verlust von Korallen durch Hitzestress (*coral bleaching*) und negative Auswirkungen auf den Tourismus.

Nicht nur die Inselstaaten werden Probleme bekommen. Auch an der deutschen Küste werden Inseln überflutet werden und manche Hafenstadt nur schwer zu verteidigen sein. Auf diese Aussichten hat das Bundesland Schleswig Holstein schon 2001 reagiert und in seinem Generalplan Küstenschutz einen »Klimazuschlag« beschlossen (MLR 2001). Er beträgt für die Deicherhöhungen an der Nordsee und Elbe 50 cm und an der Ostsee 30 cm.

Literatur

BINDOFF N.L., J. WILLEBRAND, V. ARTALE, A. CAZENAVE, J. GREGORY, S. GULEV, K. HANAWA, C. LE QUÉRÉ, S. LEVITUS, Y. NOJIRI, C.K. SHUM, L.D. TALLEY & A. UNNIKRISSHANN (2007): Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

BUND Magazin, (2011): Mitgliederzeitschrift des Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. 15. Jahrgang. 1/2011.

CHURCH J.A., WHITE N.J., COLEMAN R., LAMBECK K. & MITROVICA J.X. (2004): Estimates of the regional distribution of sea-level rise over the 1950 to 2000 period. *J. Climate* 17 (13), 2609–2625.

CHURCH J.A., NEIL J., WHITE J. & R. HUNTER (2006): Sea-level rise at tropical Pacific and Indian Ocean islands, *Global and Planetary Change* 53, 155–168.

GAFFIN S.R. (1997): Impacts of Sea Level Rise on Selected Coasts and Islands. The Environmental Defense Fund, New York, NY, USA. 34 pp.

GERDES R. (2011): Meeresspiegelanstieg – Prognosen und Szenarien, in: Küstenwandel als kulturelle und soziale Herausforderung, Eds. Fischer, L. Reise K., in press.

LAMBECK K., WOODROFFE C.D., ANTONIOLI F., ANDEZI M., GEHRELS W.R., LABOREL J. & WRIGTH A.J. (2010): Paleoenvironmental Records, Geophysical Modelling and Reconstruction of Sea-Level Trends and Variability on Centennial and longer Timescales in: John A. Church (Editor), Philip L. Woodworth (Editor), Thorkild Aarup (Editor), W. Stanley Wilson (Editor) Understanding Sea-level Rise and Variability, ISBN: 978-1-4443-3451-7 Wiley-Blackwell 61-121.

MITROVICA J.X. & W.R. PELTIER (1991): On Postglacial Geoid Subsidence Over the Equatorial Oceans, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 96, NO. B12, PAGES 20,053-20,071, NOVEMBER 10, 1991

MITROVICA J.X., M.E. TAMISIEA, J.L. DAVIS & G. A. MILNE (2001): Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea-level change, *Nature*, 409(6823), 1026-1029.

MLR (MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE RÄUME DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN) (2001): Generalplan Küstenschutz – integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein. Landesregierung Schleswig-Holstein, Kiel: 76 S. ISSN 0935-4123.

MÖRNER N.-A., TOOLEY M. & POSSNERT G. (2004): New perspectives for the future of the Maldives. *Global and Planetary Change* 40, 177–182.

PERNETTA J.C. (1992): Impacts of climate change and sea-level rise on small island states , *Global Environmental Change Volume 2, Issue 1, March 1992*, 19-31.

PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level) is the global data bank for long term sea level change information from tide gauges and bottom pressure recorders. <http://www.psmsl.org/>, last accessed April 15, 2011:

RIETBROEK R., BRUNNABEND S.-E., SCHRÖTER J. & KUSCHE J. (2011). Resolving ice sheet mass balance by fitting fingerprints to GRACE and altimetry, Special Issue SPP1257, *Journal of Geodynamics*, in press.

STAMMER D. (2008): Response of the global ocean to Greenland and Antarctic ice melting, *J. Geophys. Res.*, 113, C06022, doi:10.1029/2006JC004079.

WENZEL M. & SCHRÖTER J. (2010): Reconstruction of regional mean sea level anomalies from tide gauges using neural networks, *Journal of Geophysical Research - Oceans*, 115, C08013, doi:10.1029/2009JC005630.

UNESCO (2011): WCRP/IOC Workshop on Regional Sea Level Change (UNESCO/IOC, Paris, 7-9 February 2011).

WOODROFFE C.D. (2008): Reef-island topography and the vulnerability of atolls to sea-level rise *Global and Planetary Change* 62 (2008) 77–96.

WOODWORTH P.L. (2005): Have there been large recent sea level changes in the Maldivian Islands? *Global and Planetary Change* 49, 1–18.

Dr. Jens Schröter
 Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
 Postfach 12 01 61 - 27515 Bremerhaven
 jens.schroeter@awi.de