

## 2.7 Regionaler und globaler Anstieg des Meeresspiegels: Ursachen

ARMIN KÖHL & DETLEF STAMMER

*Regional and global sea level change - Causes: Sea level variability and changes are part of past and ongoing climate variability and change that affect a large part of the civilization living near coastal areas. Past changes, after the last glacial maximum, point at a large potential for sea level change. Different mechanisms connected to long term changes in the past associated with postglacial melting and ongoing climate change involve different factors contributing to changes in sea level. On regional scale, sea level changes related to decadal climate variability are likely to be of the same order as the predicted global change for the current century.*

**E**in Großteil der Menschheit lebt in den fruchtbaren küstennahen Regionen. Dieser Anteil wächst beständig und hinzu kommt ein nicht unbedeutender Anteil der Bevölkerung, die auf Inseln wenige Meter über dem Meeresspiegel lebt. Dieser Teil der Bevölkerung ist unmittelbar von einem globalen Anstieg des Meeresspiegels bedroht, weshalb der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) Meeresspiegelanstieg als eine der bedeutendsten Gefahren für die Menschheit eingestuft hat. Faktoren, die bei der Bewertung der Risiken zukünftiger Änderungen eine Rolle spielen, sind die unbekannte Stärke der Änderung, die zugehörigen Zeitskalen, sowie deren regionale Auswirkungen und insbesondere die Abhängigkeit der Abschätzungen von den Treibhausgasemissionen, die letztendlich direkt von den Entscheidungen der Menschheit beeinflusst werden.

Die Problematik des Anstiegs des Meeresspiegels erscheint auf den ersten Blick wegen der scheinbaren Analogie zu einem sich füllenden Becken (das sich eventuell zusätzlich erwärmt) sowohl bei der Messung wie auch der Beschreibung der Ursachen trivial. Tatsächlich sind jedoch beide Aspekte äußerst komplex, da sehr viele Faktoren Änderungen im Meeresspiegel beeinflussen, so dass sich, abgesehen von den Schwierigkeiten einer Vorhersage, schon das bloße Verständnis der momentan stattfindenden Änderungen als außerordentlich schwierig erweist (MUNK 2002).

Im folgenden beleuchten wir die Hauptfaktoren, die zu Änderungen des Meeresspiegels beitragen, um uns danach mit den Prozessen, die momentan und in unmittelbarer Zukunft zu regionalen Veränderungen führen, auseinander zu setzen. Dabei kann nicht ein vollständiger Überblick, sondern nur ein Eindruck der Komplexität der Mechanismen gegeben werden.

### Historische Entwicklung

Einen wichtigen Anhaltspunkt für die Größe möglicher Änderungen im Meeresspiegel geben historische Zeitreihen. Diese beinhalten jedoch oft nur eine Aussage über regionale Veränderungen des langjährigen mitt-

leren lokalen Meeresspiegels. Dem gegenüber stehen globale Änderungen auf Grund von Änderungen des globalen Meeresvolumens, z.B. auf Grund von Verlagerungen von Wassermassen vom Festland in die Ozeane durch das Schmelzen der Eisflächen auf dem Land. Letzteres ist zugleich der Hauptprozess, der über die vergangenen zwanzigtausend Jahre, der postglazialen Periode nach der letzten großen Eiszeit, zu einem Meeresspiegelanstieg von über 100 m geführt hat.

Die Kenntnis dieser Veränderungen basiert hauptsächlich auf Daten von Korallenfossilien und Ozean-Sedimenten, die im Wesentlichen aus tropischen Regionen stammen. Weitere Quellen sind z.B. archäologische Funde. Die in *Abb. 2.7-1* dargestellte Kurve zeigt den Meeresspiegelanstieg seit dem letzten glazialen Meeresspiegelminimums und eine relativ stabile Situation während der letzten Jahrtausende.

Eine Schwierigkeit, lokale Messungen des Meeresspiegels zur Abschätzung des globalen Meeresspiegels zu verwenden, ergibt sich aus der tektonischen Aktivität der Erde, die die Ozeanbecken fortwährend verändert. Direkt im Zusammenhang mit dem Schmelzprozess stehen im Wesentlichen die in *Abb. 2.7-2* dargestellten Prozesse, die eine erhebliche regionale Auswirkung auf den Meeresspiegel haben. Das sind zum einen die vertikalen geologischen Bewegungen, die auf Grund der Veränderung der Auflastung durch die Eisschilde zu einer postglazialen kontinentalen Landhebung an den Orten und in der Nähe der Veränderungen führen. Diesem auf Zeitskalen von mehreren tausend Jahren stattfindenden Ausgleichsprozess steht die instantane Einstellung eines neuen Gleichgewichts auf Grund der Veränderung der Gravitationsanziehung zwischen Eisschilde und Meerwasser gegenüber. Diese Prozesse führen an der Küste (das schließt mehrere tausend Kilometer mit ein) zu einem relativen Absinken (in Bezug auf den Meeresgrund bzw. der Küstenlinie) des Meeresspiegels, der den Anstieg durch das zusätzliche Volumen des Schmelzwassers mehr als kompensieren kann. Die Änderungen des Rotationsverhaltens der Erde ist ein weiterer, jedoch kleinerer, zu berücksichtigender Faktor. Zur Bestimmung globaler Meeres-

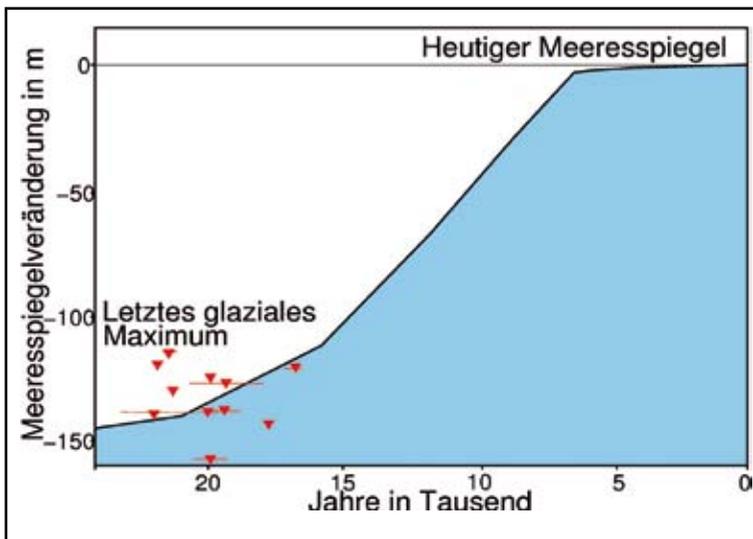
spiegeländerungen aus regionalen Daten müssen diese Effekte mitberücksichtigt und modelliert werden. Die Unsicherheit über das Ausmaß dieser Korrekturen ist die dominierende Unsicherheit bei vielen Messungen des Meeresspiegels und auch jetzt noch nicht vollständig verstanden.

### Gegenwärtige Faktoren

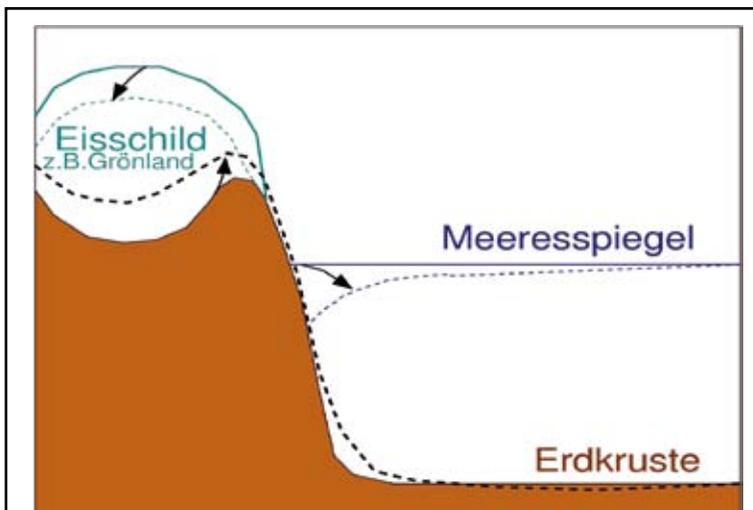
Die Definition des Meeresspiegels ist an sich schon komplex. Im vorherigen Kapitel wurde zuletzt vereinfacht die Höhe über dem Meeresgrund vorausgesetzt, was durch die Art der Beobachtungsdaten motiviert war. Moderne satellitengestützte Messverfahren beziehen sich auf ein festes Referenzellipsoid, in dessen Innerem der Erdmittelpunkt liegt. Auch wenn gegenwärtig und im Folgenden das Problem vermieden wird, indem nur

Anomalien in Bezug auf einen festen Zeitraum gezeigt werden, müssen Pegelraten wegen der weiterhin stattfindenden Landhebung mit Hilfe modellierter Vertikalbewegung der Erdkruste korrigiert werden. Auch die Genauigkeit der Kenntnis der Umlaufbahn der Satelliten und damit des als Abstand zu diesem gemessenen Meeresspiegels ist durch diesen Effekt limitiert.

Wie in *Abb. 2.7-1* angedeutet, ist das Niveau des Meeresspiegels über die letzten tausend Jahre nahezu gleichbleibend. In der Tat ergeben Rekonstruktionen auf Basis von archäologischen Daten und historischen Pegelmessungen nur sehr kleine Änderungen bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts. Diese Situation hat sich in Bezug auf die letzten hundert Jahre jedoch gewandelt. Rekonstruktionen, auf Basis von Pegelraten, deuten für das 20. Jahrhundert auf einen mittleren Anstieg des



**Abb. 2.7-1:** Anstieg des Meeresspiegels seit dem Ende der letzten Eiszeit auf Basis der Daten von LAMBECK & CHAPPELL (2001). Als Dreiecke sind die Schätzungen von FLEMING et al. (1998) für das letzte glaziale Maximum eingetragen, wobei sie als Mindestwert für die Absenkung  $125 \pm 5$  m angeben.



**Abb. 2.7-2:** Zusammenwirkung der postglazialen Landhebung und der Veränderung der Gravitationsanziehung auf die lokale Änderung des Meeresspiegels. Die durchgezogenen Linien deuten den Zustand des letzten glazialen Maximums an, während die gestrichelten Linien z.B. die heutigen Bedingungen wiedergeben.

globalen Meeresspiegels von 1.7 mm/Jahr hin (CHURCH & WHITE 2006). Jedoch verfügen wir erst seit dem Aufkommen satellitengestützter Messungen über eine nahezu vollständige globale Abdeckung von Beobachtungen des Meeresspiegels, aus denen sich ein deutlich größerer Anstieg des Meeresspiegels von ca. 3 mm/Jahr ableiten lässt (CAZENAVE & NEREM 2004), der auch von gleichzeitigen Pegelmessungen bestätigt wird (Abb. 2.7-3).

Auch wenn eine deutliche Zunahme des Anstiegs seit der Mitte des 20. Jahrhunderts zu verzeichnen ist, deuten moderne Daten nicht auf eine weitere Beschleunigung im Anstieg des Meeresspiegels in jüngster Vergangenheit hin. Insbesondere für die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts sind die beiden Hauptursachen des Meeresspiegelanstiegs zum einem in der Änderung des Volumens des Ozeans aufgrund der thermischen Ausdehnung des Meereswassers, zum anderen in der Zunahme der Masse des Weltozeans, hauptsächlich verursacht durch das Schmelzen von Landeis, zu sehen. Beide sind jedoch nicht in der Lage, den tatsächlich beobachteten Anstieg vollständig zu erklären (MUNK 2002). In Tab. 2.7-1 sind die Zahlenwerte der einzelnen Komponenten zusammengestellt. Die thermische Ausdehnung auf Grund der Erwärmung der Ozeane erklärt mit 0,42 mm/Jahr ein Viertel des Anstiegs. Auch wenn die globale Datenlage, insbesondere im Südlichen Ozean, recht lückenhaft ist und Messfehler verschiedener Sensortypen Details der zeitlichen Entwicklung der mittleren Temperatur in Frage gestellt haben (GOURETSKI & KOLTERMANN 2007), ergibt sich trotzdem für den daraus resultierenden Anstieg ein nur geringer Spielraum. Der Hauptanstieg des Meeresspiegels resultiert demzufolge aus der Massezunahme, die mit 0,5 mm/Jahr im Wesentlichen durch den Rückgang der Gletscher verursacht wird. Die Veränderung der Polkappen sind dabei bisher von untergeordneter Bedeutung. Die verbleibenden 0,7 mm/Jahr sind möglicherweise in der Änderung von Grundwasserreservoirien und der terres-

**Tab. 2.7-1:** Budgetabschätzung der Meeresspiegeländerungen in mm/Jahr in Abhängigkeit der Ursachen nach BINDOFF et al. (2007).

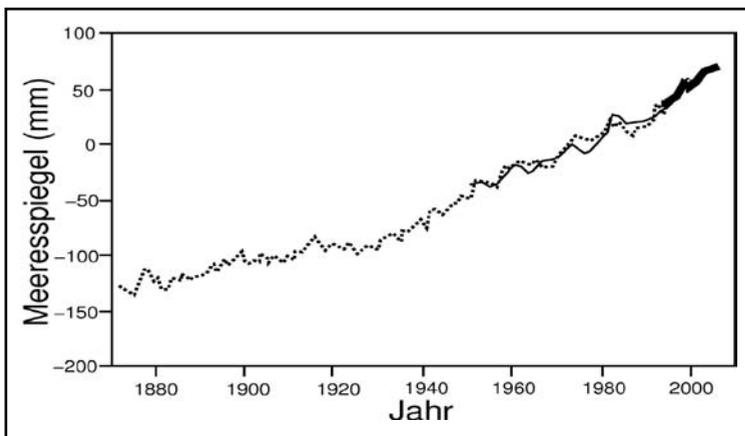
Quelle	1961–2003	1993–2003
Thermische Ausdehnung	0,42±0,12	1,6±0,5
Gletscher u. kleine Eisschilde	0,50±0,18	0,77±0,22
Grönland Eisschild	0,05±0,12	0,21±0,07
Antarktisches Eisschild	0,14±0,41	0,21±0,35
<b>Summe</b>	<b>1,1±0,5</b>	<b>2,8±0,7</b>
<b>Beobachtungen</b>	<b>1,8±0,5</b>	<b>3,1±0,7</b>

trischen Wasserspeicherung zu finden.

Die verbesserte Datengrundlage hinsichtlich Veränderungen in der Kryosphäre und der terrestrischen Hydrologie in den 1990er Jahren hat die Lücke weitestgehend geschlossen. Die Hauptzunahme ist in der Erwärmung zu sehen, die nunmehr 50% des Trends erklärt. Des Weiteren ist insbesondere eine Vervielfachung der Abschmelzrate des grönländischen Eisschildes bemerkenswert. Neuere Zahlen für den Zeitraum 2003–2009 (Anny Cazenave, pers. comm.) deuten auf eine deutliche Zunahme der Beiträge aus dem Abschmelzen insbesondere des Festlandeises auf Grönland und der Antarktis hin. Der resultierende Anstieg verbleibt jedoch leicht unterhalb des Wertes für die Periode 1993–2003, da der Beitrag aus Erwärmung deutlich kleiner ausfällt.

**Ursachen regionaler Änderungen**

Auf zwischenjährlichen bis dekadischen Zeitskalen spielt eine beträchtliche regionale Variabilität eine wichtige Rolle, die auch den global gemittelten Wert beeinflussen kann. So können einzelne El-Niño-Ereignisse, die vor allem im Pazifik regional eine starke Meeresspiegelveränderung mit sich bringen, mit den lokalen Maxima in Abb. 2.7-3 in Verbindung gebracht werden. Letzteres kann auch leicht zu einem Fehl-

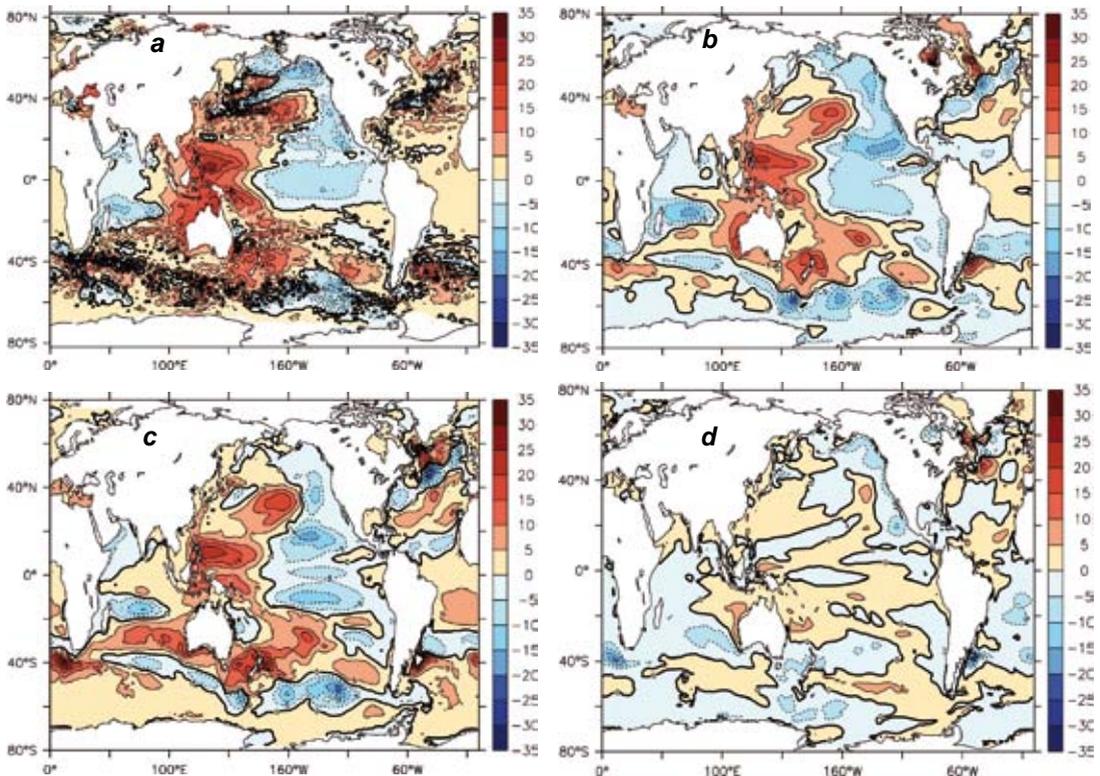


**Abb. 2.7-3:** Veränderung des globalen Meeresspiegels. Gezeigt sind Daten aus Rekonstruktionen auf Basis von Pegelmessungen (gestrichelt) sowie direkten Pegelmessungen (durchgezogen), zusammen mit Altimeterdaten (fett) nach BINDOFF et al. (2007).

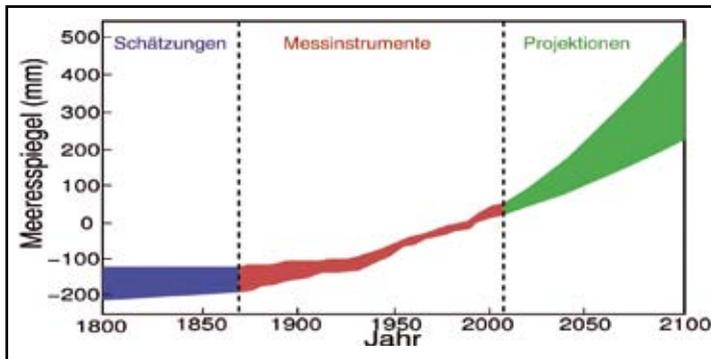
schluss führen, wenn aus dem darauf folgenden, wenige Jahre anhaltenden Abwärtstrend eine Trendwende gefolgert wird. Unterschiede in regionalen Änderungen sind aber insbesondere für die lokale Bevölkerung von Wichtigkeit, denn, wie bereits oben angedeutet, können lokale Effekte den globalen Anstieg vollständig ausgleichen oder verstärken. Neben der Zunahme in der Masse, die sich, abgesehen von den oben diskutierten Effekten, gleich verteilt, zeigen Dichteänderungen etwa auf Grund von Erwärmung, aber auch in Zusammenhang mit dem Eintrag von relativ leichterem Süßwasser durch Schmelzprozesse, regionale Muster, die dynamisch mit der Ozeanzirkulation wechselwirken oder aus der Veränderung derselben resultieren können.

Abb. 2.7-4a zeigt das Muster dieser Veränderung für den Zeitraum 1992–2001, wie es aus Satellitenbeobachtungen abgeleitet werden kann. Die Gesamtamplitude dieser Änderung beträgt regional  $\pm 35$  cm und kann in dem kurzen Zeitraum damit den globalen Trend des vergangenen Jahrhunderts übertreffen, wobei zu berücksichtigen ist, dass das Muster für die folgenden oder vorhergehenden Dekaden anders ausfällt. Die Ursachen solcher Änderungen können mit Hilfe von dynamischen Ozeanzirkulationsmodellen studiert

werden. Dazu werden Modelle mit Beobachtungsdaten in Einklang gebracht, um die tatsächlich stattfindenden Änderungen zu simulieren. Der Meeresspiegeltrend in einer dieser sogenannten Synthesen stimmt mit den Daten relativ gut überein. Eine Zerlegung nach dem relativen Einfluss der lokalen Erwärmung bzw. der Dichteänderungen auf Grund einer Verringerung des Salzgehalts zeigt, dass Veränderungen des Wärmebudgets in vielen Regionen den Trend dominieren, wobei Dichteänderungen aufgrund von Salzgehaltsänderungen dem teilweise entgegenwirken (Abb. 2.7-4). Dieser Zusammenhang deutet eher auf eine Umverteilung von Wassermassen als auf lokal veränderte Wärme- oder Frischwassereinträge durch die Oberfläche hin, da im Ozean i.A. außerhalb tropischer Regionen hohe Temperaturen auch mit hohen Salzgehalten gekoppelt sind. Ein Zusammenhang dieser Umverteilung mit einer Veränderung der windgetriebenen Zirkulation konnte gezeigt werden, wobei seit den Neunzigern der Einfluss von Oberflächenwärmeflüssen zunimmt (KÖHL & STAMMER 2007). Da es sich um ein transientes Signal handelt, werden die regionalen Signale bei längeren Mittelungszeiträumen entsprechend kleiner. So betragen die Änderungen für den Zeitraum 1993–2010 nur noch  $\pm 15$  cm.



**Abb.2.7-4:** Trend des Meeresspiegels in cm über den Zeitraum 1992–2001 bestimmt aus (a) Altimeterdaten und modelliert durch die (b) GECCO Ozeansynthese (KÖHL & STAMMER 2008). Die thermo- und halosterischen Komponenten des Trends der Synthese, d.h. die Veränderungen auf Grund von Temperatur und Salzgehaltsänderungen, sind in (c,d) gezeigt.



**Abb. 2.7-5:** Entwicklung des Meeresspiegels in der Vergangenheit wie in Abb. 2.7-3 und fortgesetzt mit einem Spektrum von Klimaprojektionen bis zum Jahr 2100 nach BINDOFF et al. (2007).

Ein weiterer regionaler Faktor ist die Veränderung von Luftdrucksystemen, auf die sich die Meeresoberfläche innerhalb weniger Tage isostatisch einstellt. Hierbei ergibt sich für eine Luftdruckzunahme von 1 mbar eine Abnahme des Meeresspiegels um 1 cm. Obwohl die meisten Luftdruckschwankungen auf Zeitskalen von wenigen Tagen stattfinden und wegen der geringen Kompressibilität des Wassers globale Luftdruckschwankungen praktisch keinen Effekt haben, können graduelle Veränderungen im Rahmen eines sich ändernden Klimas der Atmosphäre einen signifikanten Beitrag zum regionalen Meeresspiegelanstieg leisten (STAMMER & HÜTTEMANN 2008). Lokale Veränderungen haben i.A. einen transienten Anteil, auf Grund von Schwankungen auf Zeitskalen von Tagen bis zu Dekaden und darüber hinaus, können aber auch einen systematischen Trend enthalten.

### Ausblick und zukünftige Entwicklung

Klimaprojektionen sind sich, unabhängig von dem gewählten Szenario und der Wahl des Modellsystems, dahingehend einig, dass der Meeresspiegel infolge der Erderwärmung weiterhin steigen wird, wobei für das mittlere Szenario der  $\text{CO}_2$ -Entwicklung ein leichter Anstieg der Rate zu erwarten ist (Abb. 2.7-5).

Wie aus den vorherigen Betrachtungen ersichtlich ist, wird der globale Anstieg des Meeresspiegels räumlich nicht konstant sein. Jedoch beeinflussen viele Faktoren die räumlichen Muster des Anstiegs, wodurch die Vorhersagen räumlicher Muster sehr unsicher sind. Insbesondere die Entwicklung der Beiträge der einzelnen in Tab. 2.7-1 dargestellten Komponenten ist mit einer großen Unsicherheit behaftet, aber von fundamentaler Wichtigkeit für die zu erwartenden regionalen Auswirkungen. Als Beispiel kann noch einmal auf die Mechanismen im Zusammenhang mit dem postglazialen Anstieg hingewiesen werden, die dazu beitragen, dass gerade das von unserer Haustüre zusätzlich eingebrachte Volumen des schmelzenden Grönlandeises auf Grund der nachfolgenden Landhebung und der Verrin-

gerung der Anziehung der Masse des Grönlandeises für Deutschlands Küsten eine sehr viel kleinere Auswirkung haben wird als für die meisten anderen Regionen.

Im Umkehrschluss können die Effekte für Deutschland auch grösser ausfallen, wenn das Wasser eben nicht hauptsächlich von Grönland kommt. So zeigt der von WAHL et al. (2011) für die Deutsche Bucht über die Jahre 1993–2008 bestimmte Trend einen im Vergleich zu dem globalen Trend größeren Wert von  $7.3 \pm 2.7$  mm/Jahr.

### Literatur

- BINDOFF N.L., J. WILLEBRAND, V. ARTALE, A. CAZENAVE, J. GREGORY, S. GULEV, K. HANAWA, C. LE QUÉRE, S. LEVITUS, Y. NOJIRI, C.K. SHUM, L.D. TALLEY & A. UNNIKRISHNAN (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.
- CAZENAVE A. & R. S. NEREM (2004): Present day sea level observations and causes. *Rev. Geophys.* RG3001, doi:10.1029/2003RG000139.
- CHURCH J.A. & N.J. WHITE (2006): A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01602, doi:10.1029/2005GL024826.
- FLEMING K., P. JOHNSTON, D. ZWARTZ, Y. YOKOYAMA, K. LAMBECK & J. CHAPPELL (1998): Refining the eustatic sea-level curve since the Last Glacial Maximum using far- and intermediate-field sites. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 163, 327-342.
- GOURETSKI V. & KOLTERMANN K. P. (2007): How much is the ocean really warming? *Geophys. Res. Lett.* 34:L01610, doi:10.1029/2006GL027834.
- KÖHL A. & D. STAMMER (2008): Decadal Sea Level Changes in the 50-Year GECCO Ocean Synthesis. *J. Climate.*, 38, 1876-1890.
- MUNK W. (2002): Twentieth century sea level: An enigma. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 99(10), 6550-6555.
- LAMBECK K. & J. CHAPPELL (2001): Sea Level Change Through the Last Glacial Cycle. *Science*, 292, 679-686 doi: 10.1126/science.1059549.
- STAMMER D. & S. HÜTTEMANN (2008): Response of Regional Sea Level to Atmospheric Pressure Loading in a Climate Change Scenario. *J. Climate*, 21, 2093-2101. doi: 10.1175/2007JCLI1803.1.
- WAHL T., J. JENSEN, T. FRANK & I. D. HAIGH (2011): Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years, *Ocean Dynamics*, 61:701-715, DOI 10.1007/s10236-011-0383-x.

Dr. Armin Köhl & Prof. Dr. Detlef Stammer  
 Institut für Meereskunde - Universität Hamburg  
 Bundesstr. 53 - 20146 Hamburg  
 armin.koehl@zmaw.de