

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Gönnert, Gabriele; Jensen, Jürgen; Storch, Hans von; Thumm, Sigrid; Wahl, Thomas; Weisse, Ralf

Der Meeresspiegelanstieg. Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101645>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Gönnert, Gabriele; Jensen, Jürgen; Storch, Hans von; Thumm, Sigrid; Wahl, Thomas; Weisse, Ralf (2009): Der Meeresspiegelanstieg. Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung. In: Die Küste 76. Heide, Holstein: Boyens. S. 225-256.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Der Meeresspiegelanstieg Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung

Von GABRIELE GÖNNERT, JÜRGEN JENSEN, HANS VON STORCH, SIGRID THUMM,
THOMAS WAHL und RALF WEISSE

Z u s a m m e n f a s s u n g

Im Zuge der aktuellen Klimadiskussion und im Rahmen der Entwicklung von Bemessungskonzepten für Hochwasserschutzanlagen findet das Thema Meeresspiegelanstieg große Beachtung. In den letzten zehn Jahren wurden zu diesem Themengebiet verschiedenste Forschungsvorhaben auf globaler, regionaler und lokaler Ebene durchgeführt. Die vorliegende Untersuchung stellt die Bandbreite der in der Klimaforschung zum Meeresspiegelanstieg angewandten Methoden und derzeitigen Arbeiten und die sich daraus ergebenden Ansätze für die Bemessung von Hochwasserschutz- und Küstenschutzvorhaben dar.

Zunächst wird auf die Ursachen für den Meeresspiegelanstieg und seine einzelnen Komponenten eingegangen. Die Bandbreite des bisher beobachteten Meeresspiegelanstiegs, die verschiedenen Projektionsmethoden zum Ermitteln des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs sowie deren Ergebnisse werden aufgezeigt und diskutiert. Die dieser Analyse zugrundeliegende Literatur wird in einem Exkurs detailliert dargestellt. Mit Fokus auf die Deutsche Bucht und die Metropole Hamburg erfolgt eine Auswertung der herangezogenen Arbeiten. Für diesen Bereich der Nordseeküste werden durch unterschiedliche Autoren Anstiegswerte von -5 bis 115 cm projiziert. Der mittlere relative Anstieg des MSL auf der Basis von Wasserstandsbeobachtungen beträgt für den Zeitraum seit 1900 ca. 20 cm für die deutsche Nordseeküste.

S c h l a g w ö r t e r

Meeresspiegelanstieg, Hochwasserschutz, Küstenschutz, Risikobewertung, Sturmflut

S u m m a r y

In the course of the actual climate discussion and in the context of developing design level concepts for storm surge protection facility the issue of mean sea level rise is very important. During the past ten years there were many research projects on global, regional and local layer. The exploratory study presents the spectrum of methods and results of climate research to the topic of sea level rise.

First the reasons for mean sea level rise and its single components are explained. The up to today recognized mean sea level rise, the different projection methods of future mean sea level rise and their results are presented and discussed. A detailed analysis of the considered literature is described in an excursion. With focus to the German Bight and the metropolis Hamburg several authors project a sea level rise in a range of -5 to 115 cm.

K e y w o r d s

Mean sea level rise, flood protection, coastal protection, risk value, storm surge

I n h a l t

1. Einleitung	226
2. Ursachen für den Meeresspiegelanstieg	227
3. Komponenten des Meeresspiegelanstiegs	231
4. Beobachtete Änderungen des Meeresspiegels	232
5. Projektionen zum zukünftigen Meeresspiegelanstieg	238
5.1 Projektionen zum globalen Meeresspiegelanstieg	238
5.2 Projektionen zum regionalen Meeresspiegelanstieg	241
5.3 Projektionen zum lokalen Meeresspiegelanstieg	243
6. Exkurs zur grundlegenden Literatur	244
6.1 Die Komponenten des Meeresspiegelanstiegs und ihre Größenordnung	244
6.2 Ergebnisse aus Analysen der beobachteten Änderungen des Meeresspiegels	248
6.2.1 Ergebnisse zum globalen Meeresspiegelanstieg aus Analysen von Beobachtungsdaten	248
6.2.2 Ergebnisse zum regionalen Meeresspiegelanstieg aus Analysen von Beobachtungsdaten	250
6.2.3 Ergebnisse zum lokalen Meeresspiegelanstieg aus Analysen von Beobachtungsdaten	251
7. Zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse	251
8. Schriftenverzeichnis	253

1. Einleitung

Der Küstenschutz ist seit jeher geprägt durch die Frage des Meeresspiegelanstiegs. Gerade in den letzten Jahren hat hierbei die Diskussion um die zunehmende Klimaerwärmung und eine Beschleunigung des Anstiegs zugenommen. Eine Vielzahl an Informationen existiert zu diesem Thema, die häufig aufgrund der gegensätzlichen oder stark variierenden Inhalte Verwirrung stiften. Deshalb wird hier eine Zusammenfassung der neuesten Erkenntnisse vorgestellt. Zum besseren Gesamtverständnis werden zunächst die Ursachen der Meeresspiegelschwankungen und ihrer etwaigen Beschleunigung erläutert, um dann die neueste Literatur zum vergangenen Meeresspiegelanstieg und den zukünftigen Projektionen darzulegen. Sie geht mit einer kritischen Auseinandersetzung der Inhalte einher. Ein umfassender Exkurs erlaubt dem Leser die den Inhalten zu Grunde liegende Analyse von nationaler und internationaler Literatur im Detail nachzuvollziehen. Eine abschließende Auswertung der Ergebnisse dient zur Bewertung der Vielzahl an Informationen.

Eine gängige Definition des mittleren Meeresspiegels (MSL) ist das arithmetische Mittel stündlich gemessener Wasserstände an einem betrachteten Tidepegel über einen bestimmten Zeitraum (Australian Hydrographic Service). Der MSL entspricht somit nicht dem mittleren Tidehalbwasser (MT1/2w), welches sich aus der arithmetischen Mittelung von beobachteten Tidehoch- und Tideniedrigwassern über einen bestimmten Zeitraum ergibt. Abb. 1 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Regionale Änderungen des MSL werden durch *Umverteilung* von Wassermassen bei *konstantem Volumen* verursacht, d.h. das globale Mittel dieser Änderungen ist Null. Prozesse, die zu regionalen MSL-Änderungen beitragen sind regionale Unterschiede in der globalen Erwärmung und damit der thermischen Ausdehnung, Änderungen der mittleren Ozeanzirkulation, Änderungen im mittleren Luftdruckfeld, lokale Landhebungen oder -senkungen oder Effekte des Abschmelzens großer Eismassen auf das Schwerfeld der Erde. Lokal können Baumaßnahmen oder Änderungen des Seegrundes eine Rolle spielen.

In Zeiträumen von einigen hundert oder gar tausenden Jahren wird das MSL-Niveau im Wesentlichen durch Klimaschwankungen bestimmt. Ein anschauliches Beispiel ist die MSL-Entwicklung seit der letzten Eiszeit. Zu Beginn der Vereisung führte eine Abkühlung zur Bindung von Wassermassen in Form von Gletschern und Inlandeis und damit verbunden zu einer starken Absenkung des MSL. Zum Höhepunkt der Vereisung war das heutige Gebiet der Nordsee beinahe frei von Wasser, der heutige Bereich der Ostsee war von Gletschereismassen bedeckt. Einsetzende Schmelzvorgänge infolge der beginnenden Warmzeit führten anschließend zu einem Anstieg des MSL, wie am Beispiel der Nordsee in Abb. 2 illustriert. Dabei wird für die Nordsee näherungsweise das mittlere Tidehochwasser als MSL angenommen.

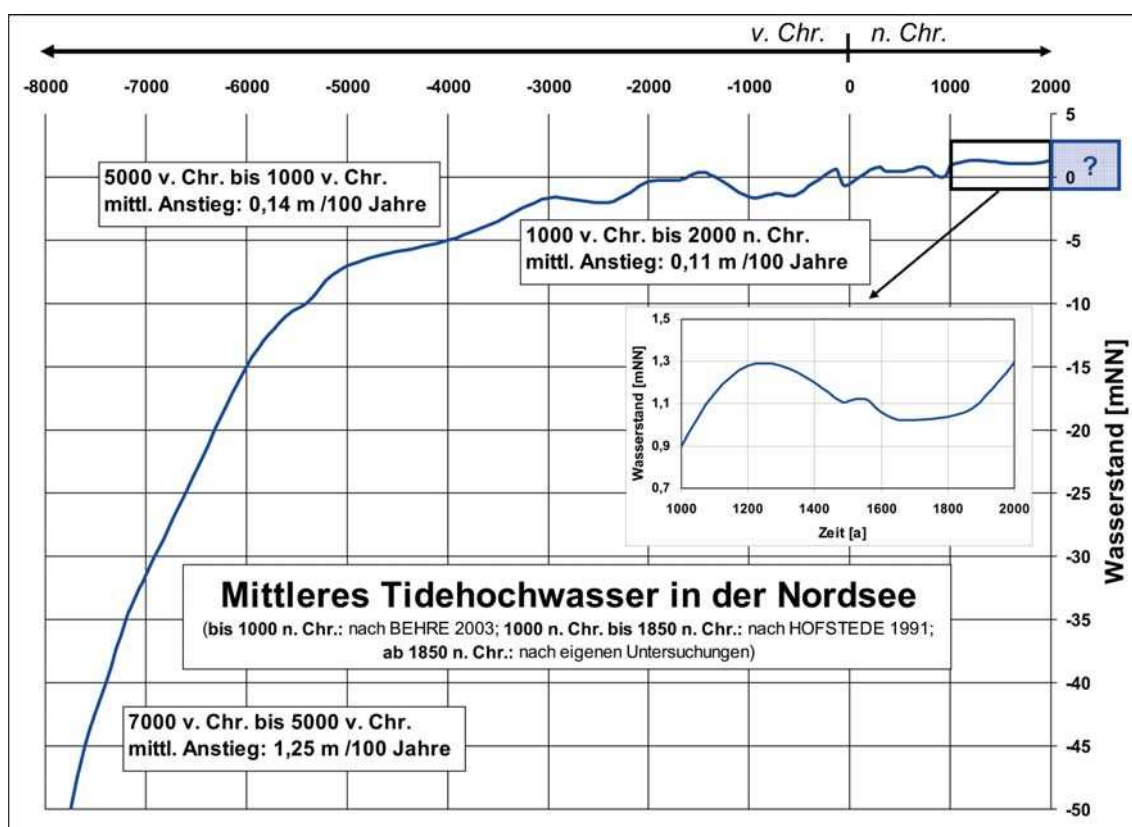


Abb. 2: Meeresspiegelschwankungen in der Nordsee über die letzten 7000 Jahre (nach JENSEN und MÜLLER-NAVARRA, 2008)

Während MSL-Änderungen sowohl die mittleren, als auch die extremen Wasserstände (Sturmflutwasserstände) beeinflussen, wirken auf letztere noch eine Reihe weiterer Faktoren, die zu zusätzlichen, langfristigen Änderungen führen können.

Änderungen im meteorologisch bedingten Anteil des Sturmflutwasserstandes werden durch Änderungen des Windklimas verursacht. Zunehmende Windgeschwindigkeiten oder Änderungen der vorherrschenden Windrichtung können dafür sorgen, dass Sturmfluten zusätzlich zu den Änderungen des mittleren Wasserstandes höher auflaufen können. Stärker ausgeprägte Tiefdruckgebiete oder Änderungen der Zuggeschwindigkeiten können über den *invers barometrischen Effekt* ebenfalls zu einer Erhöhung von Sturmflutwasserständen beitragen.

Änderungen der Höhe des Wellenaufbaus können ebenfalls durch *Veränderungen des Windklimas* oder durch *Veränderungen der lokalen Topographie* verursacht werden. Diese Veränderungen sind im unmittelbaren Küstenvorfeld relevant und entscheidend für die Belastung der Bauwerke.

Änderungen des Gezeitenregimes können unter anderem durch eine veränderte Ausbreitungsgeschwindigkeit der Gezeitenwelle in Folge von MSL-Änderungen auftreten. Aufgrund von Wechselwirkungen mit dem meteorologisch bedingten Anteil können solche Effekte Einfluss auf das Sturmflutklima haben. Diese sind hauptsächlich im flachen Wasser von Bedeutung.

Die Faktoren sind bisher unterschiedlich gut erforscht. Während es relativ fundierte Aussagen zu zukünftigen Änderungen im globalen MSL und im meteorologisch bedingten Anteil des Wasserstandes gibt, sind regionale/lokale MSL-Änderungen, Änderungen im Gezeitenregime sowie Änderungen im Wellenaufbau bisher nur unzureichend erforscht und verstanden.

Aussagen zu zukünftigen Entwicklungen des MSL hängen von der zukünftigen Klimaentwicklung ab und sind dementsprechend mit Unsicherheiten verbunden. Der von der UN einberufene zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) verwendet zur Abschätzung möglicher Änderungen eine Reihe von Emissionszenarien bis zum Jahr 2100, die sich jeweils in ihren Annahmen bezüglich zukünftiger gesellschaftlicher Entwicklungen (d.h. Treibhausgasemissionen) unterscheiden. Diese Emissionsszenarien werden anschließend für die Klimamodelle in Konzentrationen der Treibhausgase umgerechnet. Mit Hilfe der Klimamodelle werden dann entsprechende, zukünftige Temperaturänderungen projiziert (Abb. 3). Welches, und ob überhaupt eines dieser in Abb. 2 dargestellten und erläuterten Szenarien eintreten wird, ist unter anderem von der wirtschaftlichen Entwicklung, der Anwendung erneuerbarer Energien und der Umsetzung des Klimaschutzes abhängig (s. Erläuterung zu Abb. 3). Derzeit ist die zukünftige Entwicklung dieser Faktoren jedoch nicht genau abschätzbar. Die Szenarien bilden geschlossene und in sich plausible Annahmen, die jedoch nicht mit Eintrittswahrscheinlichkeiten belegt werden können. Solche Szenarien bilden die wissenschaftliche Grundlage für Untersuchungen zu Klimaveränderungen und deren Auswirkungen in der Zukunft.

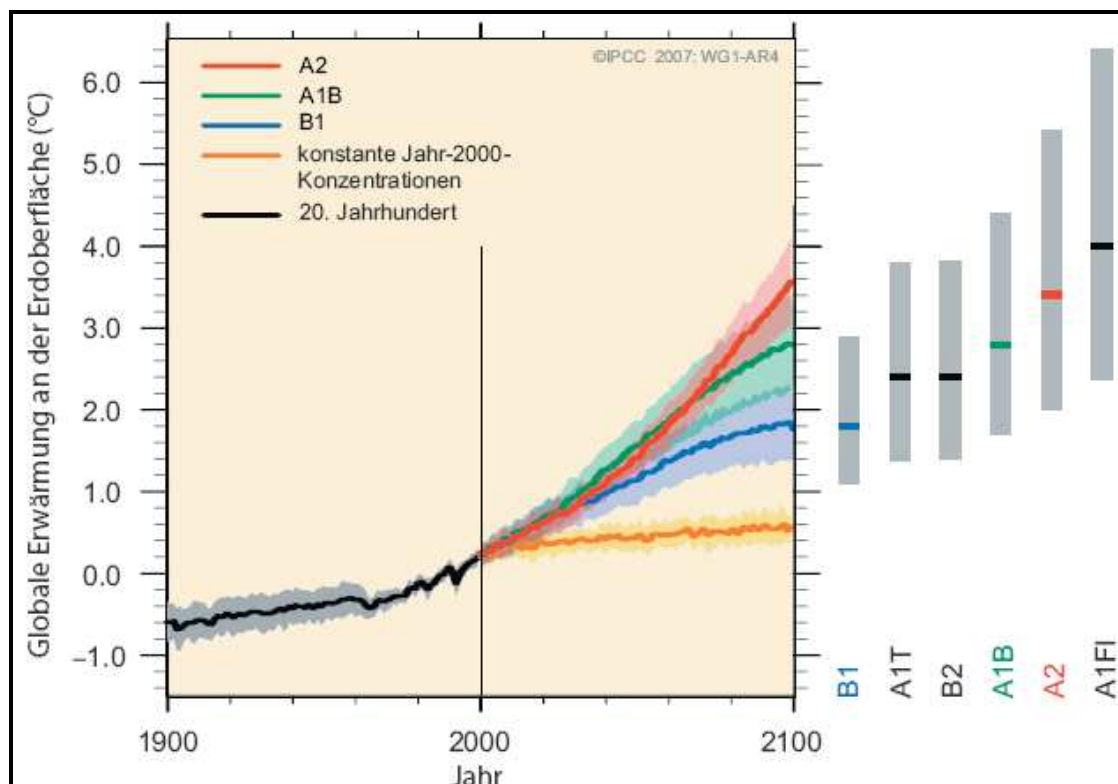


Abb. 3: Zunahme der globalen Oberflächentemperatur bei unterschiedlichen Emissionsszenarien (IPCC, 2007)

Im IPCC Special Report on Emission Szenarios (SRES) sind eine Reihe solcher Szenarien veröffentlicht. Ein grundsätzlicher Unterschied dieser Szenarien besteht darin, ob sich die gesellschaftliche Entwicklung in Zukunft stärker an ökonomischen oder ökologischen Werten orientieren wird. Die vom IPCC verwendeten mit „A“ bezeichneten Szenarien (A1FI, A1B, A1T, A2) orientieren sich eher an einer ökonomischen, die mit „B“ bezeichneten Szenarien (B1, B2) eher an einer ökologischen Entwicklung. Darüber hinaus wird zwischen eher global ausgerichteten Szenarien (Bezeichnung mit der Ziffer „1“; A1FI, A1B, B1) und eher regional ausgerichteten Szenarien (Bezeichnung mit der Ziffer „2“; A2, B2) differenziert. Zusätzlich wurde die A1 Szenarienfamilie in drei Gruppen unterteilt, die sich aufgrund ihrer technologischen Ausrichtung unterscheiden. Dabei basiert das A1FI Szenario auf einer intensiven Nutzung fossiler Energieträger, das A1T Szenario auf einer überwiegenden Nutzung nichtfossiler Energiequellen und das A1B Szenario auf einem ausgewogenen Mix aus fossilen und regenerativen Energiequellen (KAPPAS, 2009).

Auf Grundlage dieser Emissionsszenarien, entsprechenden Klimamodellrechnungen und weiteren Quellen liefert der IPCC Abschätzungen über die zukünftige Entwicklung des globalen mittleren MSL bis 2100. In der jüngsten Vergangenheit wurde in einigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen vermutet, dass aufgrund neuester Ergebnisse die Zahlen des IPCC bzgl. der zukünftigen Entwicklungen des globalen MSL nach oben korrigiert werden müssten. Aussagen zu regionalen Änderungen liegen bisher nicht in gleichem Umfang vor bzw. sind mit weiteren Unsicherheiten behaftet.

Im vorliegenden Beitrag werden Ergebnisse aus globalen und regionalen Studien, welche sowohl mit Hilfe numerischer Modelle als auch auf Basis der Analyse von Beobachtungsdaten erzielt wurden, vorgestellt und anschließend mit einer Risikobewertung dieser Ergebnisse beispielhaft auf die Metropolregion Hamburg übertragen. Zur Auswertung werden nur solche wissenschaftliche Arbeiten herangezogen, die seit dem Jahr 2000 zum Thema „MSL-

Anstieg“ erschienen sind. Die zeitliche Grenze wurde gesetzt, um die große Menge an vorhandenen Arbeiten auf ein übersichtliches Maß zu reduzieren und dabei die aktuellsten Ergebnisse einzubeziehen. Grundlage ist zunächst der IPCC-Bericht 2007, da er den in der wissenschaftlichen Gemeinschaft hergestellten Konsens verdeutlicht und eine wesentliche Basis für politische Entscheidungen liefert.

3. Komponenten des Meeresspiegelanstiegs

Zur Analyse des möglichen gesamten MSL-Anstiegs müssen verschiedene Komponenten untersucht und miteinander verknüpft werden. Es ist dabei zu unterscheiden zwischen Änderungen im *globalen Mittel* und *regionalen Änderungen*, die sich im Wesentlichen durch Umverteilung von Wassermassen ergeben. Letztere können regional zu Abweichungen vom globalen MSL-Anstieg führen, beeinflussen diesen in seiner Gesamtheit jedoch nicht. Schließlich werden lokale Entwicklungen des MSL betrachtet (siehe Kap. 5.3).

Als Ursachen für Änderungen im globalen MSL kommen folgende Faktoren in Betracht:

1. **Thermische Ausdehnung:** Durch Erwärmung des Meerwassers aufgrund steigender Temperaturen kommt es zu einer Zunahme des Volumens des Meerwassers bei konstanter Masse. Als Folge steigt der globale MSL an. Gegenwärtig liefert die thermische Ausdehnung den größten Beitrag zum beobachteten MSL-Anstieg.
2. **Gletscher:** Die Masse der Ozeane nimmt durch das Auftauen der auf dem Land liegenden Gletscher zu, folglich steigt auch der globale MSL an. Dieser Prozess trägt nach der thermischen Ausdehnung derzeit am stärksten zum globalen MSL-Anstieg bei.
3. **Das Grönländische Eisschild:** Durch Abschmelzen des grönländischen Eisschildes entsteht analog ein entsprechender Beitrag zum MSL-Anstieg.
4. **Das Antarktische Eisschild:** Der Beitrag des antarktischen Eisschildes zum MSL-Anstieg wird kontrovers diskutiert. Bisher wird davon ausgegangen, dass aufgrund einer projizierten Zunahme der Niederschläge in der Antarktis ein Anwachsen der dortigen Eismassen und damit ein negativer Beitrag zum MSL-Anstieg zu erwarten ist. Ein zunehmender Eismassenverlust aufgrund einer beschleunigten Eisschilddynamik könnte das Vorzeichen umkehren.
5. **Permafrost (Dauerfrost):** Auftauprozesse in Gebieten, in denen der Boden dauerhaft gefroren ist (Permafrostgebiete) führen neben einer zusätzlichen Zufuhr an Süßwasser vor allem zur Freisetzung von im Boden gespeichertem CO₂, was die globale Temperaturzunahme im Sinne eines positiven Rückkopplungseffektes antreibt. Sowohl diese Prozesse als auch die Änderungen im Grundwasser oder die durch die Auftauprozesse in Gang gesetzten Sedimentationsprozesse sind noch nicht hinreichend erforscht, um fundierte Aussagen treffen zu können. Es wird jedoch auch an dieser Stelle von einem positiven Beitrag zum MSL-Anstieg ausgegangen, der bislang aufgrund der großen Unsicherheiten vom IPCC nicht bilanziert wurde.

Regional können eine Reihe weiterer Faktoren zu MSL-Änderungen führen, die vom globalen Mittel abweichen:

6. **Umverteilung aufgrund von Gravitationseffekten:** Große Inlandseismassen üben auf die umliegenden Ozeane eine gravitative Anziehungskraft aus. Demzufolge ist der MSL in ihrer Nähe erhöht. Schmelzen die Eismassen, nimmt die Anziehungskraft ab und der MSL sinkt im Umfeld des Gletschers lokal trotz des eustatischen MSL-

Anstiegs ab. Dagegen kommt es in weiterer Entfernung vom Eisschild aufgrund dieser Gravitationsänderungen zu einem MSL-Anstieg, der über dem des eustatischen Anstiegs liegt (MITROVICA et al., 2001).

7. **Änderungen der Ozeanzirkulation können zu Umverteilungen von Wassermassen führen.**
8. Änderungen im **mittleren Luftdruckfeld** können ebenfalls zu regionalen Änderungen des mittleren MSL führen. Steigt der Luftdruck über einer Region, sinkt der Wasserstand infolge des zusätzlichen Gewichts der auf ihm lastenden Luftmassen und umgekehrt. Eine Erhöhung des mittleren Luftdrucks um etwa 1 hPa entspricht dabei in etwa einer Absenkung des MSL um 1 cm. Dieser Effekt wird als *invers barometrischer Effekt* bezeichnet.
9. Lokal können Änderungen im **Gezeitenregime, Landhebung/-senkung** (s. Kap. 6.2), Änderungen des **Meeresgrundes** etc. eine Rolle spielen.

4. Beobachtete Änderungen des Meeresspiegels

Es gibt im Wesentlichen zwei Datenquellen, aus denen langfristige Veränderungen des MSL ermittelt werden können: Pegelmessungen und Satellitendaten. Pegelmessungen sind im Allgemeinen über längere Zeiträume verfügbar, aber ihre räumliche Abdeckung ist nicht optimal. Satellitendaten liefern ein nahezu globales (66S–66N) Bild, sind jedoch erst seit etwa 1993 verfügbar (IPCC, 2007). Beide Datenquellen haben ihre Vor- und Nachteile. Eine Diskussion findet man z.B. im 4. Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC).

Grundsätzlich wird deutlich, dass die aus Pegel- oder Satellitendaten ermittelten Anstiegsraten und die daraus abgeleiteten Projektionen sehr stark von der Länge und der räumlichen Zugehörigkeit der verwendeten Zeitreihe(n) abhängen. Alle Untersuchungen, die den großflächigen globalen MSL mit dem an den Küsten beobachteten MSL vergleichen, führen zu dem Ergebnis, dass die beiden Größen unterschiedliche Verhaltensmuster aufweisen. Dies muss bei entsprechend stärkerem oder schwächerem Anstieg entlang der Küsten mit berücksichtigt werden.

Für das 20. Jahrhundert ergibt sich aufgrund von Pegel- oder Satellitendaten ein Anstieg für den globalen MSL mit geringen Schwankungen im Bereich von etwa 1,7 mm/Jahr (HOLGATE, 2007; IPCC, 2007), wohingegen für den Nordseebereich zuletzt eine Anstiegsrate von ca. 1,4 mm/a (WOODWORTH et al., 2009) ermittelt wurden. Detaillierte Analysen weiterer Autoren sind im Exkurs in Abschnitt 6.2 dargestellt.

Ein Großteil der Autoren neuester Veröffentlichungen ist bestrebt die erzielten Ergebnisse von Pegelauswertungen mit den seit 1993 verfügbaren Satellitendaten zu vergleichen. Dabei werden oft deutliche Unterschiede zwischen den Zeitreihen bzw. den daraus abgeleiteten Anstiegsraten festgestellt. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass der Zeitraum seit 1993 zu kurz ist, um klimabeeinflusste Größen wie z.B. den MSL mit großer Genauigkeit zu analysieren bzw. aus dem kurzen Zeitraum auf ein längerfristiges Verhalten zu schließen.

Für den Zeitraum 1993–2006 liefern Satellitendaten eine Rate von 3,1 mm/Jahr (CHURCH et al., 2008). Letztere wird von Pegel- oder Satellitendaten bis etwa 1999 bestätigt. Für den Zeitraum danach wird eine Diskrepanz zwischen den Analysen aus Pegel- und Satellitendaten beobachtet, deren Ursache bisher unklar ist (DOMINGUES et al., 2008). Abb. 4 zeigt die Entwicklung des globalen MSL über die letzten ca. 100 Jahre basierend auf Pegel- und Satellitendaten (CHURCH

et al., 2008). Die Abb. 4 zeigt ebenfalls eine Abschätzung globaler MSL-Trends über jeweils 20-Jahre lange Perioden, deren Anfangsdatum um jeweils 1 Jahr verschoben wurde. Diese Analyse illustriert, dass der MSL-Anstieg im vergangenen Jahrhundert nicht konstant war, sondern erheblichen Schwankungen unterworfen war. Vor etwa 1930 wurden zunächst Raten von weniger als 1 mm/Jahr beobachtet. Zwischen 1930–1950 stiegen die Raten auf etwa 2–2,5 mm/Jahr an. Zwischen etwa 1963–1991 wurde ein Rückgang beobachtet, der von einigen Autoren einer Reihe von Vulkanausbrüchen zugeschrieben wird (CHURCH et al., 2008). Danach stiegen die Raten wieder an, wobei die letzten Werte die größten im gesamten Datensatz darstellen und nahe an denen aus Satellitendaten ermittelten Werten liegen.

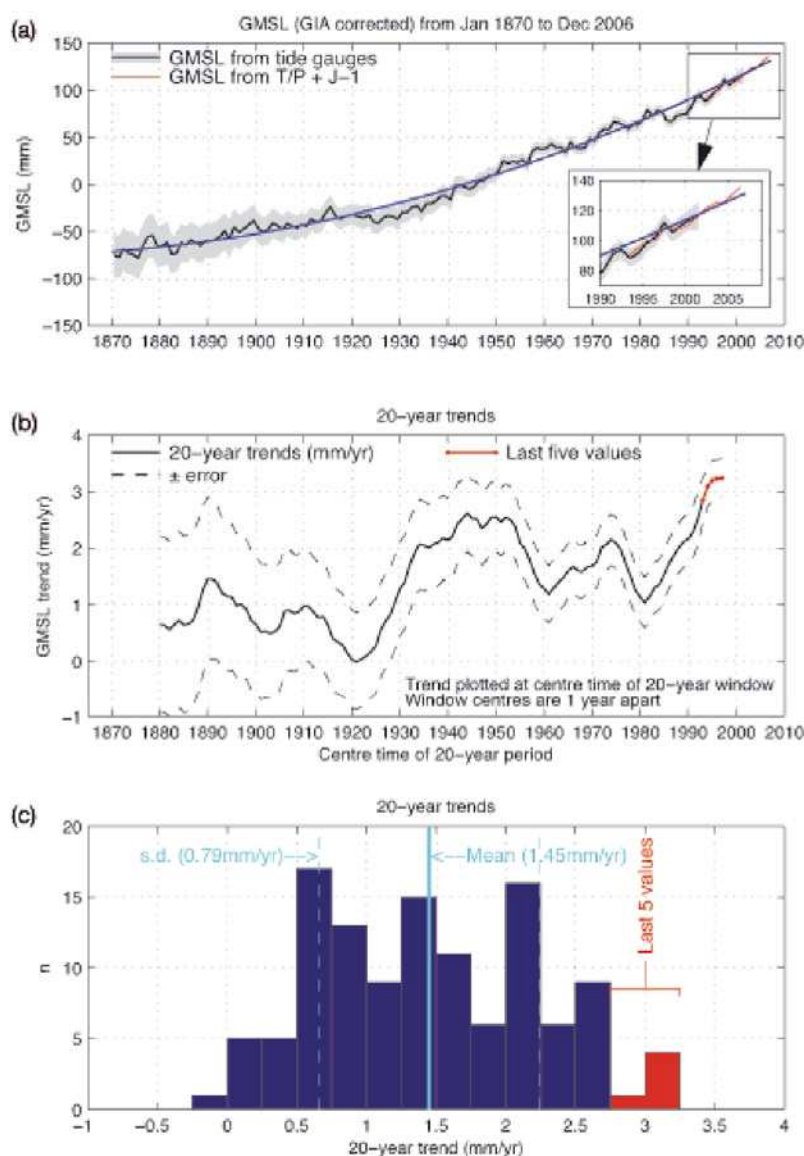


Abb. 4: (a) Global gemittelter MSL 1870–2006 mit Fehlerabschätzung von einer Standardabweichung. (b) Lineare Trends des global gemittelten MSL über jeweils 20 Jahre mit Fehlerabschätzung von einer Standardabweichung. Die Trends sind jeweils dem mittleren Jahr der jeweiligen 20-jährigen Periode zugeordnet. Die Werte der letzten fünf 20-Jahresperioden sind in rot dargestellt. (c) Histogramm der 20-jährigen Trends innerhalb des Zeitraums 1870–2006. Der Mittelwert und eine Standardabweichung sind ebenfalls dargestellt. Die Werte der letzten fünf 20-Jahresperioden sind in rot dargestellt (nach CHURCH et al., 2008)

Regional kann es zu erheblichen Abweichungen von diesen Mittelwerten kommen. Abb. 5 verdeutlicht, dass der beobachtete MSL-Anstieg nicht einheitlich über den Globus verteilt ist. Innerhalb des betrachteten Zeitraums 1993–2006 sind dabei die größten Anstiege im Bereich des Westpazifiks zu beobachten, wogegen die Anstiege in anderen Regionen deutlich geringer ausfallen. Aufgrund des kurzen betrachteten Zeitraums (1993–2006) veranschaulicht das Bild zu einem großen Teil interne Klimavariabilität verbunden mit dem El-Nino Phänomen (CHURCH et al., 2008). Auf längeren Zeitskalen zeigt das Muster nach wie vor regionale Strukturen, diese sind zum Teil jedoch geringer ausgeprägt (CHURCH et al., 2008).

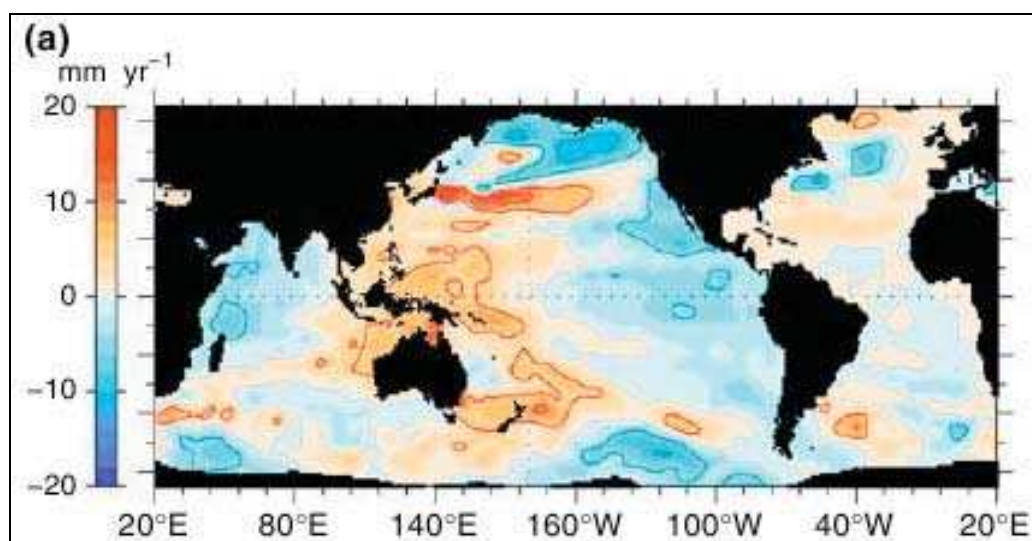


Abb. 5: Räumliche Verteilung des Meeresspiegelanstiegs 1993–2006 aus Satellitendaten. Die Daten sind dargestellt als Abweichungen vom globalen mittleren Anstieg. Rote Flächen weisen auf einen regionalen Anstieg stärker als das globale Mittel, blaue auf einen regionalen Anstieg geringer als das globale Mittel hin (nach CHURCH et al., 2008)

In Tab. 1 wird die zeitliche Entwicklung des globalen MSL dargestellt, wobei diese nach den Beiträgen einzelner Prozesse differenziert wird (IPCC, 2007). Die Tabelle zeigt, dass die Bilanz der Einzelprozesse vom beobachteten MSL-Anstieg abweicht und das Budget zumindest für den Zeitraum 1961–2003 nicht geschlossen ist.

Zudem befinden sich sowohl im IPCC-Bericht 2001 als auch im aktuellen Bericht 2007 Angaben zum aktuell beobachteten MSL-Anstieg, der in die einzelnen (Haupt-) Faktoren aufgeschlüsselt wird. Der IPCC-Bericht 2001 umfasst den Betrachtungszeitraum 1910–1990, wohingegen der aktuelle IPCC-Bericht 2007 die Zeitspanne 1961–2003 betrachtet. Diese Veränderung wird vom IPCC durch die unzureichende Datenlage in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts begründet, sodass die Ergebnisse größere Unregelmäßigkeiten aufweisen. Weiterhin wurde durch den IPCC 2001 festgestellt, dass eine signifikante Erwärmung des Weltozeans erst Ende der fünfziger Jahre des 20. Jahrhunderts auftrat, sodass im IPCC 2007 erst dieser Zeitraum als relevant angesehen wird.

Tab. 1: Entwicklung des globalen MSL nach IPCC (2007)

Quelle	Globaler MSL-Anstieg 1961–2003 [mm/Jahr]	Globaler MSL-Anstieg 1993–2002 [mm/Jahr]
Thermische Ausdehnung	0,30 – 0,54	1,1 – 2,1 ¹
Gletscher	0,32 – 0,68	0,55 – 0,99
Grönland	(–0,07) – 0,17	0,14 – 0,28
Antarktis	(–0,27) – 0,55	(–0,14) – 0,56
Gesamt	0,6 – 1,6	2,1 – 3,5
Beobachtet	1,3 – 2,3	2,4 – 3,8
Differenz	0 – 1,4	(–0,7) – 1,3

Tab. 2: IPCC-Angaben zum beobachteten globalen Meeresspiegelanstieg (im Vergleich: IPCC, 2001 und 2007)

	1910–1990 (IPCC 2001) mm/Jahr	1961–2003 (IPCC 2007) mm/Jahr
Thermische Ausdehnung	0,3 – 0,7	0,30 – 0,54
Gletscher	0,2 – 0,4	0,32 – 0,68
Grönländisches Eisschild	0,0 – 0,1	(–0,07) – 0,17
Antarktisches Eisschild	(–0,2) – 1,0	(–0,27) – 0,55
Gesamter Anstieg berechnet ¹	(–0,8) – 2,2	0,6 – 1,6
Gesamter Anstieg beobachtet²	1,0 – 2,0	1,3 – 2,3

1 = Ergebnis der numerischen Modellierung

2 = Beobachtungsauswertung der Pegel, keine Addition der Einzelkomponenten

Die in Tab. 1 und Tab. 2 dargestellten Angaben zeigen beide die bereits beschriebenen Abweichungen zwischen beobachteten und berechneten Angaben. Es ist hierbei zu erkennen, dass die Addition aller Werte nicht dem Ergebnis des beobachteten gesamten Anstieges entspricht. Das deutet darauf hin, dass das System insgesamt noch nicht vollständig verstanden worden ist und es nach wie vor erhebliche Unsicherheiten und Lücken im Wissen darüber gibt, wie sich der MSL in den letzten 100 Jahren verändert hat und welche Beiträge von den einzelnen Prozessen geleistet wurden.

² Diese Abschätzung wurde von DOMINGUES et al. (2008) nach unten korrigiert auf etwa 0,8 mm/Jahr.

Nach gegenwärtigem Verständnis folgt der MSL-Anstieg der Klimaerwärmung des 20. und des beginnenden 21. Jahrhunderts und ist gegenwärtig in erster Linie durch die thermische Expansion und den Verlust von Landeismassen (Gletscher) begründet (Tab. 1, Tab. 2).

CHURCH et al. (2008) bestätigen die Annahme der Dominanz der thermischen Ausdehnung im beobachteten Anstieg des globalen MSL des 20. Jahrhunderts. Zwischen 1993 und 2006 wird dieser Beitrag mit etwa 1,2–1,6 mm/Jahr angegeben (ANTONOV et al., 2005; ISHII et al., 2006; WILLIS et al., 2004). DOMINGUES et al. (2008) zeigten, dass in dem methodischen Vorgehen ein Fehler existiert, der zu einer Überschätzung der thermischen Ausdehnung führt und korrigierten den Beitrag auf 0,8 mm/Jahr für den Zeitraum 1993–2006. Werden etwas längere Zeiträume betrachtet, werden Werte von 0,3 mm/Jahr (1955–2003, ANTONOV et al., 2005), 0,4 mm/Jahr (1961–2003, IPCC, 2007) und 0,5 mm/Jahr (1960–2003, DOMINGUES et al., 2008) ermittelt.

Für das Abschmelzen von Landeismassen (Gebirgsgletscher unter Ausschluss der Antarktis und Grönlands) als derzeit zweitgrößter beitragender Faktor zum beobachteten globalen MSL-Anstieg liefern KASER et al. (2004) Werte von 0,4 mm/Jahr (1961–1990), IPCC (2007) von 0,5 mm/Jahr und 0,77 mm/Jahr für die Zeiträume 1961–2003 und 1993–2003.

Es wird angenommen, dass Grönland und die Antarktis bisher nur in sehr geringem Umfang zum beobachteten Anstieg des globalen MSL beigetragen haben (CHURCH et al., 2008). Sie stellen in der Zukunft jedoch potentiell die größten Quellen mit gleichzeitig den größten Unsicherheiten dar. Änderungen im Grundwasser, der Bodenfeuchte, Permafrost etc. können ebenfalls zu globalen MSL-Änderungen führen. Verlässliche Abschätzungen ihrer Beiträge sind jedoch kaum bekannt (CHURCH et al., 2008).

Angaben für lokale MSL-Anstiege können an vielen Pegeln entlang der Nordsee exemplarisch vorgestellt werden. Für die vorliegende Untersuchung wurde der Pegel Cuxhaven ausgewählt, da hier eine sehr lange Datenreihe vorliegt und die Unterschiede in der Interpretation der Ergebnisse gut illustriert werden können. Aufgrund der Auswertung dieser Datenreihe kommen verschiedene Autoren zu unterschiedlichen Aussagen.

So untersuchten WAHL et al. (2010) u.a. eine aus hochaufgelösten Pegeldaten (mind. Stundenwerte) und Scheitelwerten rekonstruierte MSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven von 1844 bis 2008. Dabei wurde für den relativen MSL ein linearer Trend von $2,37 \pm 0,08$ mm/a für den betrachteten Zeitraum ermittelt. Außerdem findet sich in der langen Cuxhaven-Zeitreihe eine leichte negative Beschleunigung im MSL-Anstieg, was nicht konsistent mit globalen Studien, aber mit den Ergebnissen von WOODWORTH et al. (2008) für verschiedene andere Pegel aus dem europäischen Raum ist. Mit Hilfe eines Analyseverfahrens zur Glättung von Zeitreihen wird zudem eine bis heute anhaltende positive Beschleunigung am Pegel Cuxhaven seit Mitte der 1970er Jahre festgestellt, (vgl. Abb. 6). Die Glättung erfolgte durch eine Singuläre Systemanalyse (SSA), die dazu dient nichtlineare Trends aus Zeitreihen zu extrahieren und somit Zeiträume mit besonders hohen oder niedrigen Anstiegsraten zu identifizieren (z.B. MOORE und GRINSTED, 2005).

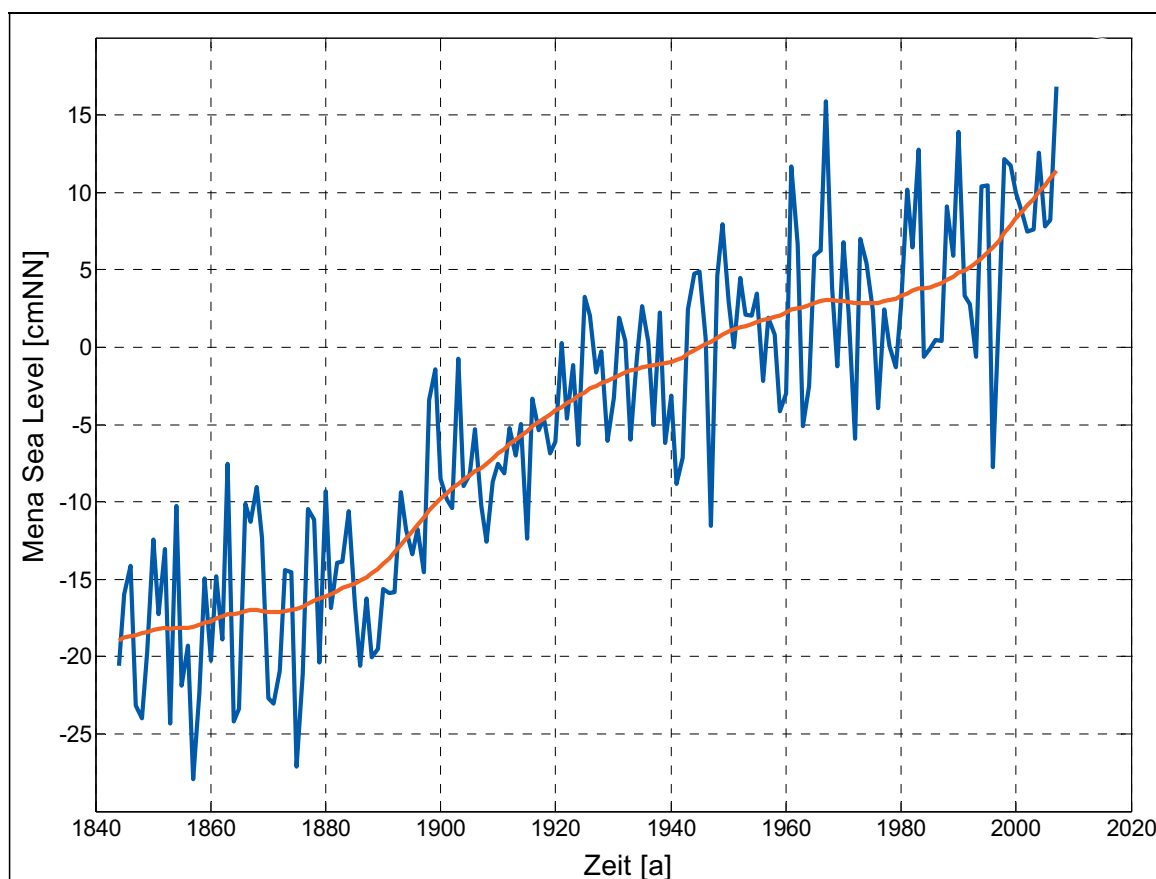


Abb. 6: Zeitreihe des lokalen mittleren MSL (Jahreswerte) am Pegel Cuxhaven mit Glättungsfunktion bzw. nicht-linearem Trend

Dagegen zeigen Untersuchungen von GÖNNERT et al. (2004 und 2007), dass das mittlere Tidehochwasser am Pegel Cuxhaven bei Auswertung der Zeitreihe seit 1842 nach Anpassung über eine lineare Funktion keine Beschleunigung in den Anstiegsraten aufweist. Für das mittlere Tidehochwasser wurde ein Anstieg von 2,45 mm/a (1842–2005, vgl. Abb. 7) festgestellt.

Diese Unsicherheiten, wie sie am Pegel Cuxhaven auftreten, wurden durch WOODWORTH et al. (2008) an Hand einer Untersuchung zum Vergleich der Entwicklung der Messreihen an verschiedenen Pegeln bestätigt. Während an einigen Pegeln Beschleunigungen in den Anstiegsraten zu erkennen sind, sind an anderen Pegeln noch keinerlei beschleunigte Tendenzen zu erkennen.

An dieser Stelle zeigt sich deutlich, dass die Notwendigkeit von weiteren vertiefenden Untersuchungen von großer Bedeutung ist. In dem BMBF geförderten KFKI (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen) Projekt AMSeL („Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste“) wird u.a. geprüft, wie sich die anderen deutschen Nordseepegel verhalten.

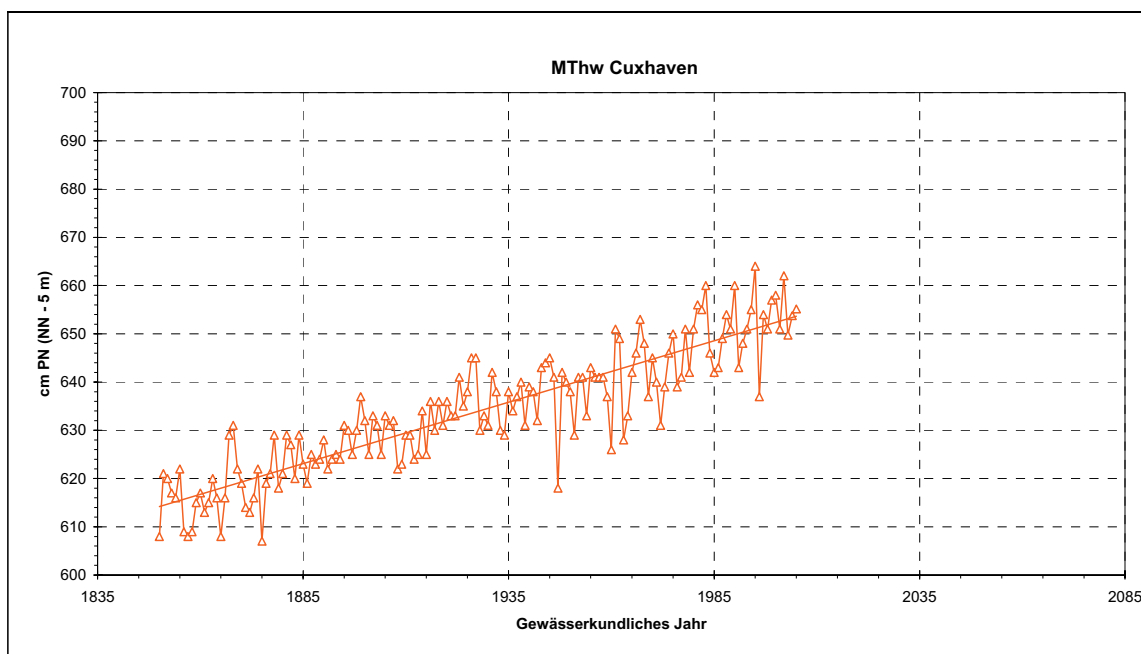


Abb. 7: Die Zeitreihe des mittleren Tidehochwassers (MThw) am Pegel Cuxhaven unter Verwendung der Jahressmittel (GÖNNERT et al., 2007)

5. Projektionen zum zukünftigen Meeresspiegelanstieg

5.1 Projektionen zum globalen Meeresspiegelanstieg

Die gegenwärtig umfassendste und belastbarste Einschätzung zu zukünftigen Änderungen des MSL liefert der IPCC in seinem 4. Sachstandsbericht (MEEHL et al., 2007). Die Einschätzung basiert auf einer detaillierten Bewertung der thermischen Ausdehnung anhand von Klimamodellexperimenten, dem Abschmelzen von Gletschern anhand der Skalierung existierender Beobachtungen auf den zu erwartenden Temperaturanstieg, Abschätzungen von Massenbilanzänderungen und Modellen der großen Eismassen Grönlands und Antarktis, und der Extrapolation vorhandener Beobachtungen.

Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts werden vom IPCC 2007 folgende Angaben für die Entwicklung des MSL angegeben (Abb. 8):

- thermische Ausdehnung von +10 bis +41 cm; Beschleunigung wird im 21. Jahrhundert erfolgen;
- Gletscherschmelze: +7 bis +17 cm;
- Einfluss Grönland: +1 bis +12 cm;
- Einfluss Antarktis: –14 bis –2 cm

Unter zusätzlicher Berücksichtigung von Sedimentablagerung und einer Fortsetzung des Abschmelzens der Gletscher als Resultat der Klimaänderung seit der letzten Eiszeit wird ein Anstieg des MSL bis 2100 im Vergleich zu heute von

18 bis 59 cm

projiziert.

In jüngster Zeit gibt es jedoch vermehrt Bedenken hinsichtlich der Stabilität der beiden großen Eisschilde. In den Abschätzungen des IPCC wird dieses durch einen temperaturabhängigen Zuschlag von 10–20 cm („scaled-up dynamical ice sheet imbalance“ in Abb. 8) berücksichtigt. Dieser Zuschlag ist jedoch nicht in den angegebenen Änderungen bis zum Ende des Jahrhunderts enthalten. Berücksichtigt man den Zuschlag, erhält man Werte von

18 bis 79 cm zum Ende des 21. Jahrhunderts.

Abb. 8 stellt die Größenordnungen der einzelnen Faktoren in einer Reihe von Szenarien sowie die Gesamtsumme des prognostizierten MSL-Anstiegs dar.

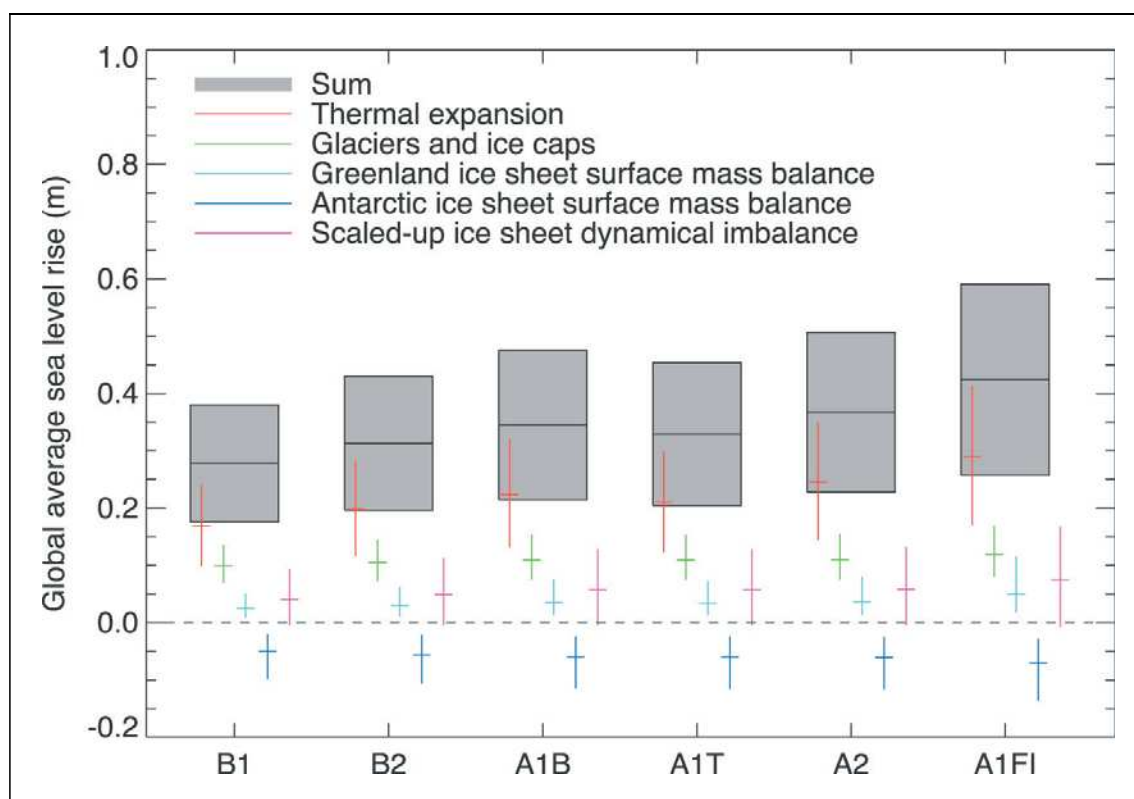


Abb. 8: Globaler Meeresspiegelanstieg bis zum Jahr 2100 (IPCC, 2007)

Für den betrachteten Zeitraum wird in allen Szenarien nach wie vor der größte Beitrag von der thermischen Ausdehnung (10–41 cm) und der zweitgrößte von den Inlandeismassen (Gletscher ohne Antarktis und Grönland) (7–17 cm) geleistet. Die Beiträge von Grönland und der Antarktis sind in der Summe nach wie vor gering, zum Teil, da eine erhöhte Akkumulation über der Antarktis Schmelzprozesse in anderen Bereichen kompensiert.

Zugleich gibt der IPCC 2007 jedoch an, dass die Unsicherheiten weiterhin sehr groß sind, da das Wissen über die sich bedingenden Effekte noch nicht ausreichend ist. Infolgedessen umfasst der Bericht **weder** eine **beste** Abschätzung noch eine **obere Grenze** für den MSL-Anstieg („... nor provide a best estimate or an upper bound for sea level rise.“ IPCC, 2007).

Auch gibt es nach wie vor Bedenken in der wissenschaftlichen Literatur, dass die Abschätzungen zu konservativ sind. Diese basieren auf der Tatsache, dass die beobachteten globalen MSL-Änderungen von 1990 bis heute größer als der zentrale Wert der IPCC-Projektionen sind (CHURCH et al., 2008).

Auch die ausgewertete Literatur dieses Beitrages zeigt, wie im Exkurs zur grundlegenden Literatur des Textes ersichtlich, die Unterschiede zwischen den Angaben des IPCC und anderen wissenschaftlichen Untersuchungen auf. RAHMSTORF (2007) entwickelte ein einfaches statistisches Modell, das den Temperaturanstieg des 20. Jahrhunderts in Beziehung zum globalen MSL setzt. Auf Grundlage dessen kommt er zu Zahlen, die deutlich höher als jene des IPCC liegen. Es ist anzumerken, dass der von RAHMSTORF verwendete Ansatz aus physikalischen und methodischen Gründen in der Kritik steht (SCHMITH et al., 2007; HOLLGATE et al., 2007; VON STORCH et al., 2008). Im Rahmen eines Vortrages auf der Klimakonferenz in Kopenhagen 2009 gibt RAHMSTORF basierend auf diesem Ansatz Schätzungen ab, wonach ein globaler MSL-Anstieg von einem Meter bis 2100 überschritten werden wird, solange die Emissionen unvermindert ansteigen.

Das MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR METEOROLOGIE (MPI-M) gibt unter Berücksichtigung eines Temperaturanstiegs von 3°C eine globale MSL-Zunahme auf Grund der thermischen Ausdehnung von 21 bis 28 cm an. Des Weiteren müssen für den globalen MSL-Anstieg durchschnittlich weitere 8 cm Erhöhung durch Schmelzen des Inlandeises einkalkuliert werden (13 cm Schmelze des Grönlandeises, [-5] cm durch erhöhten Schneefall in der Antarktis). Das MPI-M verdeutlicht mit seinen Angaben, in diesem Fall zur thermischen Ausdehnung, wie viele weitere Untersuchungen auch, das Problem einer auftretenden räumlichen Differenzierung bei der Betrachtung eines globalen MSL-Anstiegs. Lokal kann so auf Grund veränderter Ozeanzirkulation eine geringe Absenkung oder ein weiterer Anstieg von bis zu einem Meter erfolgen.

Neueste Abschätzungen von PFEFFER et al. (2008), die die dynamischen Prozesse der Eisschilde mit abbilden, ergeben einen MSL-Anstieg von 80 cm. Angaben eines Anstiegs von bis zu 200 cm im kommenden Jahrhundert werden von ihm als physikalisch unhaltbar beschrieben, da hierbei alle äußeren Randbedingungen in kürzester Zeit ihre Extremwerte erreichen müssten. Bei ihren Modellrechnungen gehen PFEFFER et al. (2008) von einer langsamen Beschleunigung des Emissions- und Temperaturanstiegs aus.

SHELLNHUBER, der bis zum letzten Jahr einen MSL-Anstieg von 200 cm in den kommenden 100 Jahren angab (PIK, 2007), schätzt diesen nach neuesten Untersuchungen nach Angaben eines „Focus“-Interviews mit 100 cm ab, wobei die Angaben zum verwendeten Klimaszenario nicht konkretisiert werden (SHELLNHUBER, 2008a). Zudem weist er darauf hin, dass trotz der derzeit beobachteten Klimaentwicklung davon ausgegangen werden kann, dass der globale Temperaturanstieg bis 2100 auf 2 °C zu begrenzen ist (SHELLNHUBER, 2008b).

Auf der Basis semi-empirischer Untersuchungen und unter Verwendung 4-parametrischer, physikalisch basierter Differentialgleichungen prognostizieren GRINSTED et al. (2009) einen globalen MSL-Anstieg zwischen 90 cm und 130 cm. Grundlage für diese Untersuchungen sind die A1B-Szenarien des IPCC. Auch hierbei handelt es sich um einen semi-empirischen Ansatz, bei dem jedoch die maximal möglichen Bedingungen in den Vordergrund gestellt werden.

Längerfristige Angaben über das Jahr 2100 hinaus gibt beispielsweise der WBGU (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN, 2006). Er gibt auf der Basis von Analysen aus dem IPCC-Bericht 2001 und den Ergebnissen weiterer Wissenschaftler eine Projektion bis 2300 unter der Annahme einer Temperaturzu-

nahme von insgesamt 3°C über einen globalen MSL-Anstieg von 2,5 bis 5,1 m an. Tab. 3 gibt die Aufteilung der Anstiegsraten eingeteilt in ihre Ursachen an.

Tab. 3: Angaben des WBGU (2006) über die Anstiegsraten der einzelnen Faktoren bis zum Jahr 2300

Thermische Ausdehnung	Eiskappen und Gletscher	Grönländisches Eisschild	Antarktisches Eisschild	Gesamtanstieg bis 2300
40–90 cm	20–40 cm	90–180 cm	100–200 cm	250–510 cm

5.2 Projektionen zum regionalen Meeresspiegelanstieg

Ausgangsbasis der Betrachtung von zukünftigen Projektionen ist die globale Entwicklung. Für eine lokale MSL-Abschätzung sind neben den globalen Projektionen die regionalen von erheblicher Bedeutung.

Der IPCC-Bericht ist für die Praxis und für die politische Entscheidungsfindung eine wichtige Grundlage. In seinen zukünftigen Projektionen bezieht er sich in erster Linie auf die globale Entwicklung. Demgegenüber stehen regionale Veränderungen, die davon abweichende Werte ergeben können. Im Zuge einer Entscheidungsfindung ist es daher wichtig, die Unterschiede zwischen der regionalen Entwicklung des zu betrachtenden Raumes und der globalen Entwicklungsbewertung durch den IPCC zu erkennen und zu berücksichtigen. Um die Breite dieser Informationen auf einen Blick darzustellen, werden in Tab. 4 zunächst die globalen Ergebnisse des IPCC-Berichtes dargestellt, um im Vergleich die regionalen Projektionen herauszuarbeiten. Dabei geht es nicht um eine Bewertung sondern um die sachliche Information wie groß die Spanne der Angaben ist. Alle Angaben beziehen sich auf den Zeithorizont 2100. Alle derzeit in der Literatur vorhandenen Angaben, die sich auf Zeithorizonte größer als 2100 beziehen, werden hier nicht berücksichtigt.

Dementsprechend werden in Tab. 4 zunächst die einzelnen Faktoren, die einen Anstieg des MSL verursachen können aufgelistet. Die regionalen Unterschiede sind jedoch durch die in Kap. 2 dargestellten Ursachen zu erklären.

In Spalte 2 sind jeweils die minimalen und maximalen Werte aus der recherchierten Literatur zur regionalen Entwicklung dargestellt. Zur Erläuterung, wie diese Minima und Maxima einzuordnen sind, werden jeweils in den Spalten 3–7 die ermittelten Minima und Maxima der Autoren der in Spalte 2 genannten Extrema dargestellt. Sie werden häufig von der DELTACOMISSIE (2008a) und dem KNMI (KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT, 2006) genannt.

Im Zuge dieser Aufstellung wird deutlich, dass die aus der DELTACOMMISSIE (2008a) hervorgebrachten Ergebnisse, die wiederum bereits aus einer Zusammenfassung der Ergebnisse unterschiedlicher Autoren entstanden sind, Ausschlag gebend für die Angabe extrem hoher Werte sind. Dieses ist insofern plausibel, als das erklärte Ziel der Deltakommission ausdrücklich die Entwicklung von „**high-end**“-Szenarien war.

Am KNMI wurden in Anlehnung an die IPCC-Szenarien A1B, A2 und B1 Projektionen mit Hilfe numerischer Klimamodelle Projektion der thermischen Ausdehnung erstellt (KNMI, 2006). In der Summe geben sie einen gesamten MSL-Anstieg von 35 cm bis 85 cm

an, ausgehend vom Jahr 2005 bis 2100 an (Tab. 4) und liegen damit in der Größenordnung der globalen Angaben des IPCC.

Tab. 4: Minimale und maximale Angaben zum regionalen MSL in der Nordsee

	Minima und Maxima aller vorliegenden Untersuchungen	KNMI (2006) ¹ Min – Max bis 2100	Deltacommissie (2008b)* ¹ Min – Max bis 2100	Kuhlbrodt (2007) Min – Max bis 2100	IPCC (2007) Min – Max bis 2100 (globale Angaben!)
Thermische Ausdehnung (global)	12 – 49 cm (beides Delta-commissie)	20,2 – 45,5 cm	12 – 49 cm		10 – 41 cm
Thermische Ausdehnung (regional)			(-5) – 20 cm		
Grönländisches Eisschild	(-55) – 33 cm (beides Delta-commissie)		(-55) – 33 cm		1 – 12 cm
Antarktisches Eisschild	(-1) – 107 cm (beides Delta-commissie)		(-1) – 107 cm		(-10) – (-3) cm
Gletscher	4,3 cm (KNMI) – 19,3 (Katsman**) cm	4,3 – 14,5 cm	6 – 14 cm		7 – 17 cm
Beide Eisschilde	(-0,3) cm (KNMI) – 32,9 cm (Delta-commissie)	(-0,3) – 32,9 cm	17 – 57 cm		
Zusätzliche Faktoren wie Permafrost, Sedimentation etc.	0 – 4 cm (Deltacommissie/ KNMI)	0 – 4 cm	0 – 4 cm (Grundwasserspeicher)		
THC	bis 80 cm (Kuhlbrodt)			bis 80 cm (europ., russ. Küste)	
Insgesamt	(-5) – 115 cm (beides Delta-commissie)	35 – 85 cm	(-5) – 115 cm		18 – 59 cm

* Berücksichtigung des Effektes der Gravitation, der durch den Verlust von Landeismassen ausgelöst wird, ausschließlich Verwendung eines high-end Szenarios.

** KATSMAN et al., 2008: Untersuchung auf Grundlage des KNMI (2006).

¹ Angaben für die Niederländische Küste.

KUHLBRODT et al. (2007) untersuchten die Auswirkungen von Veränderungen der thermohalinen Zirkulationen (THC) auf den MSL unter der Annahme des Emissionsszenario A1FI des IPCC. Nach diesen Untersuchungen führt ein Einbruch der THC zu einem Anstieg des MSL von 80 cm an den europäischen und russischen Küsten und bis zu 50 cm an den Küsten Grönlands und Ost-Kanadas.

Die beschriebenen Untersuchungen unterscheiden sich in ihrem Umfang von denen einzelner Autoren. Letztgenannte untersuchen in der Regel einen einzelnen Faktor und dessen Beitrag zum MSL-Anstieg. Die Deltacommissie und das KNMI dagegen gehen ebenso wie der IPCC, so vor, dass sie neben eigenen Untersuchungen diverse weitere Autoren berücksichtigen und diese Ergebnisse zu einem Gesamtwert zusammenfügen.

Die Ergebnisse der großen Anzahl zusätzlich analysierter einzelner Autoren konzentrieren sich stark im mittleren Bereich der hier aufgelisteten Ergebnisse. Dies ist von großer Bedeutung, da sie eine deutliche Gewichtung innerhalb der Gesamtheit der Ergebnisse herbeiführen. Eine Auflistung der wichtigen im Zuge der Literaturrecherche analysierten Angaben ist diesem Text in Form eines Exkurses zur grundlegenden Literatur des Textes beigelegt.

Eine zusammenfassende Betrachtung aller herangezogenen Ergebnisse ergibt eine maximale Spannweite des globalen MSL-Anstiegs von 18 cm (IPCC) bis 140 cm (RAHMSTORF, 2007) bis zum Jahr 2100. Diese extremen Werte umschließen die Angaben der weiteren Autoren der Ergebnissammlung. Die meisten Projektionen liegen dabei im mittleren Bereich von 20 bis 90 cm und bilden dort den Schwerpunkt der Ergebnisse.

5.3 Projektionen zum lokalen Meeresspiegelanstieg

Nord-Ost-Atlantik

KATSMAN et al. (2008) haben unter Berücksichtigung neuester Modellergebnisse des KNMI und den Ergebnissen verschiedener Wissenschaftler Angaben für den Nord-Ost-Atlantik gemacht (Bezugsjahr 2005). Hierbei berücksichtigen sie mit als erste Wissenschaftler die Gravitationsveränderungen nach MITROVICA (2001), indem die eustatischen Beiträge der Eisschmelze mit einem geeigneten Verhältnis des lokalen MSPL-Anstiegs zum eustatischen MSPL-Anstieg multipliziert werden. Daraus ergibt sich unter der Annahme der IPCC-Szenarien A1B, B1 und A2 ein zu erwartender gesamter MSL-Anstieg von 30 bis 80 cm.

Englische Küste

Das UK CLIMATE IMPACTS PROGRAMME (UKCIP, 2007) besteht aus einer wissenschaftlichen Beratergruppe, die dauerhaft vom englischen Umweltministerium (Department for Environment, Food and Rural Affairs) Anfang der 1990er Jahre eingesetzt wurde.

Auf der Basis der IPCC-Ergebnisse aus 2001 und Untersuchungen zur Landsenkung (2002) wird der MSL-Anstieg für die englischen Küsten abgeschätzt. Unter der Annahme einer globalen Temperaturerhöhung von +3 °C wird der MSL-Anstieg an der Süd- und Ostküste Englands (ohne Schottland) mit 14 bis 20 cm angegeben. Steigt die Durchschnittstemperatur um insgesamt 6 °C erwarten die Wissenschaftler an den betrachteten Küsten 70 bis 80 cm MSL-Anstieg.

Niederländische Küste

Aus aktuellen Untersuchungen und Modellanalysen der von der niederländischen Regierung eingesetzten DELTACOMMISSIE (2008b) ergibt sich in Anlehnung an das IPCC-Szenario A1FI (hohe Emissionen, $\Delta T = 6 \text{ }^\circ\text{C}$) für die niederländische Küste ein lokaler MSL-Anstieg von $(-5) - 115 \text{ cm}$. Bei diesen Untersuchungen wurde die Dynamik der Eisschilde, die Effekte durch Gravitationsveränderungen sowie die Beiträge durch Landsenkung berücksichtigt.

Deutsche Nordseeküste

Unter der Annahme einer globalen Temperaturerhöhung von $3 \text{ }^\circ\text{C}$ (IPCC-Szenario A1B) projiziert das MAX-PLANCK-INSTITUT (MPI-M, 2006) für die deutsche Nordseeküste einen MSL-Anstieg von 58 cm . Diese Angabe ist 30 cm höher als ihre Angabe zur globalen MSL-Zunahme. Zum Ende des Simulationszeitraumes (2100) wird das vollständige Abschmelzen der arktischen Meereismassen in den Sommermonaten berücksichtigt (MPI-M, 2006). Zu beachten ist, dass das MPI hier keine eigenen Nordseeberechnungen erstellt sondern nur eine Abschätzung formuliert hat.

STERR (2007) schätzt anhand der vom IPCC verwendeten Modelle den globalen MSL-Anstieg von 40 cm als realistisch ein. Unter Berücksichtigung von lokalen Effekten wie Landsenkung schätzt er für die Nordseeküste Schleswig-Holsteins einen Anstieg von 40 bis 60 cm ab. Dies ist eine persönliche Abschätzung auf Basis der Entwicklung in der Nordsee und nicht Resultat einer Untersuchung.

6. Exkurs zur grundlegenden Literatur

In diesem Exkurs wird die dem Text zugrunde liegende Analyse der verwendeten Literatur aufgearbeitet. Dies erfolgt über eine Darstellung der Ergebnisse der einzelnen Autoren bzw. es erfolgt eine Aufstellung der unterschiedlichen Arbeiten zu demselben Faktor. Mit diesem Exkurs wird die Spannweite der Projektionen sowohl zum globalen MSL als auch zu den einzelnen ausschlag gebenden Faktoren dargestellt.

6.1 Die Komponenten des Meeresspiegelanstiegs und ihre Größenordnung

Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den verschiedenen Faktoren des MSL-Anstiegs angegeben (siehe auch Tab. 4). Erfolgen keine weiteren Angaben, beziehen sich die angegebenen Werte immer auf das Jahr 2100. Es ist hierbei darauf hinzuweisen, dass die Aussagen auf unterschiedlichen Herangehensweisen basieren. So liegen bei der thermischen Ausdehnung quasi-realistische Modelle vor, dagegen sind bei den Eismodellierungen auch Expertenmeinungen dargelegt.

- **Thermische Ausdehnung:** Neben den beiden Untersuchungen von IPCC (2007) und KNMI (2006) kommt eine weitere wichtige Untersuchung von GREGORY et al. (2001), der die Auswirkung der thermischen Ausdehnung auf den jährlichen MSL-Anstieg (1990–2090) mit $2,0-3,7 \text{ mm/Jahr}$ angibt, wobei diese Angabe aus dem Vergleich

unterschiedlicher Klimamodelle entstand. Insgesamt wird die Spanne der angegebenen Werte durch den IPCC (2007) mit mindestens 10 cm und maximal 45 cm durch den KNMI (2006) begrenzt.

- **Gletscher:** Die Spannweite der Ergebnisse wird durch die Angaben des KNMI (2006) (4,3 cm) und der Untersuchung von KATSMAN et al. (2008) (19,3 cm) begrenzt. Eine ausschließlich Inlandeis und Gletscher umfassende Modellierung erstellten RAPER und BRAITHWAITE (2006). Sie modellierten das IPCC-Szenario A1B mit einem kleinskaligen Modell und berücksichtigten dabei die Unterschiede von Sommer- und Wintermonaten. MEIER et al. (2007) extrapolieren aus Beobachtungsdaten von 1996–2006 die Beschleunigungsraten des Abschmelzens der Gletscher bis zum Jahr 2100. Dabei erstellen sie zwei Szenarien, ersteres mit konstanter aktueller Beschleunigung der Massenbilanz und das zweite mit konstanter aktueller Rate der Massenabnahme. Diese Werte liegen über denen des IPCC (2007), werden jedoch von anderen Autoren bestätigt.
- **Grönländisches Eisschild:** Die Angaben reichen von minimal 1 cm (IPCC, 2007) bis maximal 22 cm (DELTACOMMISSIE, 2008). Alle Autoren sind sich über die bevorstehende Abnahme des Grönländischen Eisschildes einig. SHEPERD und WINGHAM (2007), MITROVICA et al. (2001) und die Wissenschaftler des KNMI (2006) und des MPI-M (2006) geben unterschiedliche Verlustgrößen bei unterschiedlicher Erderwärmungsrate an. Die Autoren GREGORY und HUYBRECHTS (2006) rechnen mit einem Beitrag von 7 m zum globalen MSL-Anstieg durch das gänzliche Abschmelzen des grönländischen Eisschildes. Ein solcher Prozess würde jedoch weit über das Jahr 2100 hinaus andauern. Auch OTTO-BLIESNER et al. (2006) und RIDLEY et al. (2005) halten ein komplettes Abschmelzen des Eisschildes über das Jahr 2100 hinaus für möglich. Nach RIDLEY et al. (2005) sind im Jahr 3000 nur noch 5 % der ursprünglichen Masse erhalten. Sie bestätigen die Angabe von 7 m MSL-Anstieg nach GREGORY und HUYBRECHTS (2006), wobei unregelmäßige Anstiegsraten zu erwarten sind. Nach 850 Jahren könnte bereits die Hälfte der prognostizierten 7 m Anstieg eingetreten sein. In Bezug auf die schwankende Rate zum MSL-Anstieg geben die Autoren maximale Werte von 5 mm/Jahr an, wobei diese vorwiegend in den frühen Jahren der Simulation erreicht werden. An dieser Stelle gilt es anzumerken, dass Simulationen, die so weit in die Zukunft reichen größere Unsicherheiten aufweisen als die Simulationen bis 2100 und daher eine direkte Vergleichbarkeit nicht gegeben ist.
- **Antarktisches Eisschild:** Die Spannweite wird auch hier durch die Untersuchungen des IPCC (2007) (–10 cm) und der DELTACOMMISSIE (2008) (41 cm) begrenzt. Die weiteren Autoren SHEPERD und WINGHAM (2007) beziehen anders als der IPCC auch einen schnellen Zerfall des West-Antarktischen Eisschildes ein. GREGORY und HUYBRECHTS (2006) und das MPI-M (2006) beziffern den Beitrag zum globalen MSL-Anstieg als negativ und auch das KNMI (2006) geht je nach Klimaentwicklung von einem geringfügig negativen bis leicht positiven Beitrag aus.
- **Grönländisches und Antarktisches Eisschild:** Das KNMI (2006) veröffentlichte seine Angaben zu den Beiträgen der beiden Eisschilde in totalen Zahlen ausschließlich in Form einer zusammenfassenden Angabe beider Faktoren. Daraus resultiert eine sehr große Spannweite der Werte zwischen –0,3 und 32,9 cm.
- **Permafrost und andere Beiträge:** Die höchste Angabe zum globalen MSL-Anstieg durch tauende Permafrostböden ist bei CHURCH et al. (2001) mit 2,5 cm zu finden. Der IPCC (2007) erstellt keine eigenen Angaben zu diesem Faktor, betont allerdings die großen Unsicherheiten. Das KNMI (2006) fasst in der Projektion die Beiträge des

Permafrostes, der Sedimentation, der Veränderungen der terrestrischen Wasservorräte und der Antwort der Eisschilde auf vorangegangene Erwärmungsphasen in der Erdgeschichte zu einer Aussage über 0 cm bis 4 cm zusammen, weist jedoch ebenfalls auf die hohen Unsicherheiten hin.

- **Gravitation:** MITROVICA et al. (2001) haben durch numerische Simulationen den lokalen Einfluss der Gravitationsänderungen für die drei möglichen Eismassenverluste (Antarktis, Grönland und inländische Gletschereismassen) berechnet (Abb. 9). Für die Nordsee stellen sich die Verhältnisse wie folgt dar: Der Anteil des MSL-Anstiegs, der aufgrund des Abschmelzens antarktischer Eismassen entstünde, muss mit dem Faktor 0,9 bis 1 multipliziert werden (Abb. 9a). Das bedeutet, dass sich die Effekte des Abschmelzens in der Antarktis nahezu vollständig in der Nordsee niederschlagen werden. Für das Abschmelzen des Grönlandeises ergibt sich ein Faktor von 0,1–0,2 (Abb. 9b), was bedeutet, dass z.B. ein projizierter Anstieg aufgrund des Abschmelzens des grönländischen Eisschildes von 22 cm bis 2100 (DELTACOMMISSIE, 2008) in der Nordsee eine Wirkung von 2–4 cm haben würde. Der durch das Abschmelzen der Inlandseismassen verursachte Anteil des MSL-Anstiegs muss mit dem Faktor 0,7–0,8 multipliziert werden (Abb. 9c), d.h. es kämen von den 18 cm der DELTACOMMISSIE (2008) etwa 13 cm zur Wirkung. Andererseits weisen PLAAG und JÜTTNER (2001) darauf hin, dass sich auch deutlich hiervon abweichende Zahlen ergeben könnten.
- **Thermohaline Zirkulation:** KUHLBRODT et al. (2007) untersuchen in Anlehnung an das A1FI-Szenario die Veränderungen der thermohalinen Zirkulationen (THC). Die THC ist ein Zirkulationssystem, das 4 der 5 Weltozeane über Austauschprozesse, hervorgerufen durch Temperatur- und Salzkonzentrationsunterschiede, miteinander verbindet. Der Golfstrom, als wichtiges klimasteuerndes Phänomen in Nordeuropa, ist ebenfalls Teil der THC. Nach diesen Untersuchungen führt ein Einbruch der THC zu einem Anstieg des MSL von 80 cm an den europäischen und russischen Küsten und bis zu 50 cm an den Küsten Grönlands und Ost-Kanadas. Das MPI-M betrachtet ebenfalls die Auswirkungen des Klimawandels auf die THC und kommt zu dem Urteil, dass eine Reduktion der THC im Zuge der globalen Erwärmung zu erwarten ist, ein totaler Zusammenbruch im 21. Jahrhundert wird jedoch als unwahrscheinlich angesehen.

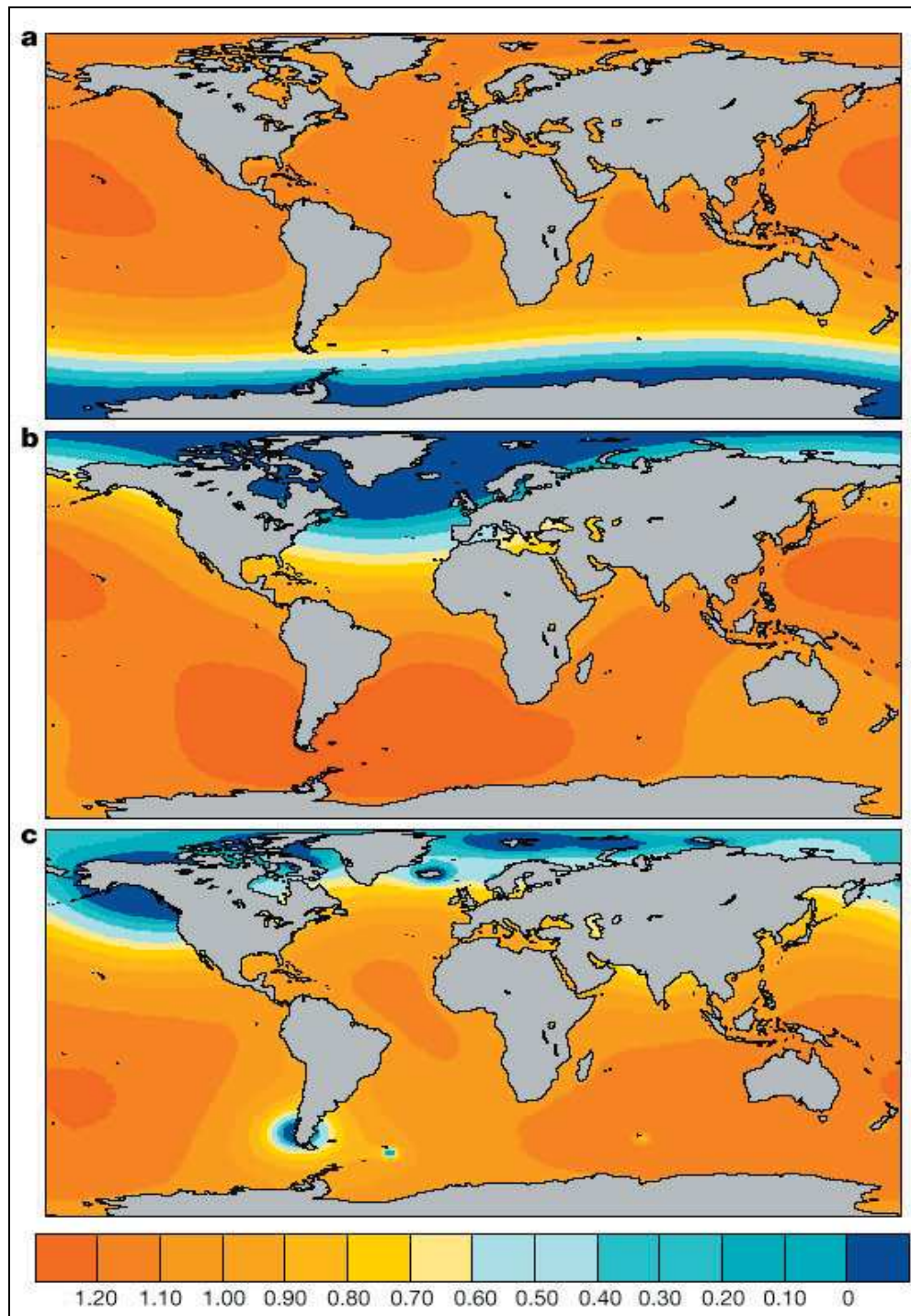


Abb. 9: Einfluss der Gravitation (MITROVICA et al., 2001)

Auswirkungen auf den eustatischen (Landhebung/-senkung) Anteil des Meeresspiegelanstiegs aufgrund der Gravitationsänderungen durch das Abschmelzen von
 a) Antarktischem Eis b) Grönländischem Eisschild c) Inländischen Eismassen und Gletschern nach MEIER (1984). Der angegebene Faktor ist mit dem Beitrag des eustatischen Meeresspiegelanstiegs zu multiplizieren.

6.2 Ergebnisse aus Analysen der beobachteten Änderungen des Meeresspiegels

In diesem Abschnitt sind einige Informationen zu Landhebungen/-senkungen und die Ergebnisse verschiedener Autoren zusammengetragen, welche den globalen, regionalen und lokalen MSL zum Untersuchungsgegenstand haben.

6.2.1 Ergebnisse zum globalen Meeresspiegelanstieg aus Analysen von Beobachtungsdaten

Ein wichtiger Aspekt, den es bei MSL-Studien jeglicher Art zu berücksichtigen gilt, sind großräumige Landsenkungen bzw. -hebungen (auch glacial isostatic adjustment, GIA), welche eine Nachwirkung der letzten Eiszeit sind. Durch das Abschmelzen der Eismassen hat sich die Auflast auf die Erdkruste signifikant verringert. Hierdurch ergeben sich Hebungs-/Senkungseffekte (Reboundeffekte), die von verschiedenen Autoren untersucht und in globalen Modellen erfasst wurden (z.B. PELTIER, 2001; DAVIS & MITROVICA, 1996; LAMBECK und JOHNSTON, 1998). Diesen großräumigen und in der Regel über mehrere Jahrhunderte linear verlaufenden Hebungs-/Senkungserscheinungen überlagern sich lokale Senkungs- oder Hebungseffekte, die auf tektonische Bewegungen, vulkanische Aktivität oder menschliche Einflüsse (z.B. Gasförderung) zurückzuführen sind.

Während Numerische Modelle ausschließlich absolute MSL-Änderungen liefern (ohne Berücksichtigung von Landsenkungen), ergeben sich aus der Auswertung von Pegeldata zunächst relative MSL-Änderungen. Durch Berücksichtigung entsprechender Landbewegungen können relative in absolute Werte überführt werden und umgekehrt.

Während die Modelle, die die glazialisostatischen Ausgleichsbewegungen erfassen, seit längerer Zeit Anwendung finden und wissenschaftlich anerkannt sind, lassen sich die lokalen Effekte nur schwer bzw. gar nicht über Modelle erfassen. Jüngste Ergebnisse hierzu wurden im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens IKÜS erzielt (WANNINGER et al., 2009). Es wurden Modelluntersuchungen zu Landhebungs-/senkungsraten entlang der Niedersächsischen Küste durchgeführt. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass nahezu der gesamte Küstenbereich absinkt, was zu den Ergebnissen der globalen Modelle passt. Die im IKÜS-Projekt (Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik) ermittelten Raten sind jedoch um ein vielfaches höher, was für MSL-Untersuchungen von signifikanter Bedeutung ist (IKÜS, 2009). Aus dem globalen glazialisostatischen Ausgleichsbewegungsmodell von PELTIER (2004), welches eines der am häufigsten verwendeten Modelle ist, ergibt sich für den Bereich Cuxhaven z.B. eine Senkungsrate von ca. 0,34 mm/a, aus dem IKÜS-Modell ergibt sich ein nahezu 5-fach erhöhter Wert von 1,6 mm/a. Letzteres würde z.B. bedeuten, dass im Falle Cuxhaven auf alle absoluten MSL-Projektionen aus numerischen Modellen bis zum Jahr 2100 fast 16 cm hinzuaddiert werden müssten. Da die IKÜS-Ergebnisse jedoch sehr aktuell und noch nicht hinreichend diskutiert sind, werden sie hier zunächst nicht berücksichtigt. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass für die Bemessung der relative Wert aus den Pegelmessungen von Bedeutung ist, um die zukünftige Belastung der Küstenschutzwerke zu erfassen. Insofern kann bislang auf die Daten der Pegelmessungen von Cuxhaven zurückgegriffen werden.

Im Folgenden sind die in den Augen der Autoren wichtigsten Ergebnisse aus Analysen des globalen MSL aus Beobachtungsdaten sortiert nach dem Zeitpunkt der Veröffentlichung

dargestellt. Wenn nicht anders angegeben, handelt es sich um absolute Anstiegsraten, die durch Berücksichtigung globaler GIA-Modelle oder Informationen aus geologischen Messkampagnen ermittelt wurden.

JEVREJEVA et al. (2008) finden in einer rekonstruierten Zeitreihe seit 1700 eine Beschleunigung im MSL-Anstieg, welche ihren Anfang gegen Ende des 18. Jahrhunderts hat und bis heute anhält. Der ermittelte MSL-Anstieg von 1700 bis 2000 wird mit 28 cm angegeben (20 cm davon im 20. Jahrhundert). Unter der Annahme, dass sich die beobachtete Beschleunigung bzw. die sie bedingenden Einflüsse konstant fortsetzen, wird ein MSL zwischen 1990 und 2100 von ca. 34 cm erwartet. Die geringste vom IPCC angenommene Temperaturzunahme für das 21. Jahrhundert beträgt 1,8 °C für das B1-Szenario. Aus diesem Wert, der 3-mal größer ist als die beobachtete Temperaturzunahme im 20. Jahrhundert, errechnet sich ein Anstieg von 18–38 cm. Der von JEVREJEVA et al. (2008) angegebene Wert, der keine beschleunigte Temperaturzunahme berücksichtigt, liegt somit bereits im oberen Bereich des vom IPCC angegebenen MSL-Anstieges unter Berücksichtigung einer beschleunigten Temperaturzunahme. Dies deutet darauf hin, dass die MSL-Projektionen des IPCC zu gering ausfallen könnten.

WOODWORTH et al. (2008) untersuchen verschiedene rekonstruierte Zeitreihen des MSL. Hierin zeigt sich in allen längeren Zeitreihen bis ca. 1960 eine positive, im Anschluss eine negative Beschleunigung des MSL-Anstieges. Die höchsten Anstiegsraten traten um 1930 auf.

CHURCH et al. (2008) verwenden die Rekonstruktion von CHURCH und WHITE (2006) und finden ebenfalls hohe Anstiegsraten um 1930, sowie um 1960. Die Untersuchung 20-jähriger gleitender, linearer Trends zeigt, dass die letzten fünf ermittelten Anstiegsraten gleichzeitig die höchsten fünf sind (siehe Abb. 3). Außerdem wird auf ein negatives „Sea Level Budget“ zwischen 1961 und 2003 hingewiesen, was bedeutet, dass das Budget nicht geschlossen ist, d.h. eine bis heute nicht abschließend erklärbare Diskrepanz zwischen der über den Zeitraum beobachteten und simulierten MSL-Entwicklung vorhanden ist.

MATHER (2008) enthält eine tabellarische Auswertung einer umfangreichen Recherche zu bereits erfolgten Untersuchungen zum MSL. Es zeigt sich, dass ältere Untersuchungen überwiegend zu Anstiegsraten von ca. 1 mm/a und neuere (seit Mitte der 1990er Jahre) eher zu Raten von 2–3 mm/a führen.

HOLGATE (2007) ermittelt für das 20. Jahrhundert einen linearen Trend von $1,75 \pm 0,16$ mm/a und entdeckt deutliche Periodizitäten bei der Untersuchung 10-jähriger gleitender linearer Trends.

RAHMSTORF et al. (2007) zeigen, dass sich der beobachtete MSL seit 1991 bereits am obersten Rand der Unsicherheitsbereiche der IPCC-Projektionen aus dem Jahr 2001 (1991 bis 2100) bewegt.

JEVREJEVA et al. (2006) ermitteln hohe Anstiegsraten für Ende des 19. Jahrhunderts, Mitte des 20. Jahrhunderts und die letzte Dekade.

CHURCH und WHITE (2006) geben einen linearen Trend für den Zeitraum 1870 bis 2001 von $1,7 \pm 0,3$ mm/a an. Erstmals wird eine Beschleunigung im MSL nach 1870 festgestellt. Sollte sich diese konstant fortsetzen, erwarten die Autoren zwischen 1990 und 2100 einen MSL-Anstieg von 31 cm. Ebenso wie bei JEVREJEVA et al. (2008) wird dabei keine beschleunigte Temperaturzunahme berücksichtigt.

WHITE et al. (2005) vergleichen den beobachteten globalen MSL mit dem MSL an den Küsten bzw. 1000 m vor der Küste. Es zeigt sich, dass die beobachteten Anstiegsraten an der Küste um 1970 und in den 1990er Jahren signifikant größer sind, als im großflächigen globalen Mittel. Es zeigt sich damit, dass grundsätzlich immer zu den Modelldaten die Pegelraten

beobachtet werden müssen, um die natürliche Entwicklung erkennen und rechtzeitig reagieren zu können.

HOLGATE und WOODWORTH (2004) ermitteln hohe Anstiegsraten für den Zeitraum 1993 bis 2002 entlang der Küsten. Der mittlere Wert liegt bei 4 mm/a, mit Schwankungsbreiten von -6,8 bis 12,4 mm/a. Insgesamt sind die Raten stark erhöht im Vergleich zum globalen MSL (2,8 mm/a).

CHURCH et al. (2004) ermitteln für den Zeitraum 1950 bis 2000 eine Anstiegsrate von 1,8 mm/a, welche nahezu identisch mit derjenigen ist, die sie in einer späteren Arbeit (CHURCH und WHITE, 2006) für den verlängerten Zeitraum 1870 bis 2001 (1,7 mm/a) ermitteln. Sie verdeutlichen den Einfluss, den das verwendete GIA-Modell auf die Ergebnisse hat. Je nach zu Grunde liegendem Modell ermitteln sich die Anstiegsraten für 1950 bis 2000 zu 1,75 mm/a, zu 1,89 mm/a oder zu 1,91 mm/a.

DOUGLAS (2001) gibt eine umfangreiche Einführung in die Thematik MSL und dessen Analyse und vergleicht Ergebnisse verschiedener Autoren zum globalen MSL, die zwischen 1989 und 1997 veröffentlicht wurden. Die dabei ermittelten Anstiegsraten schwanken zwischen 1,8 mm/a und 2,4 mm/a. Aufgrund der unterschiedlichen untersuchten Zeiträume und der unterschiedlichen Anzahl der verwendeten Pegel sind die Ergebnisse nur bedingt miteinander vergleichbar.

6.2.2 Ergebnisse zum regionalen Meeresspiegelanstieg aus Analysen von Beobachtungsdaten

Im Folgenden werden zunächst ausgewählte Ergebnisse aus Analysen des regionalen und im nachfolgenden Kapitel des lokalen MSL-Anstiegs aus Beobachtungsdaten sortiert nach dem Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung dargestellt. Im Fokus stehen in erster Linie die Ergebnisse, wobei teilweise auch auf die zu Grunde liegenden Daten eingegangen wird. Auch hier handelt es sich, wenn nicht anders angegeben, um absolute Werte, wobei gerade bei lokalen Untersuchungen häufig relative Werte angegeben werden.

WOODWORTH et al. (2009) ermitteln eine synthetische MSL-Zeitreihe aus ausgewählten Pegeln rund um Großbritannien. Dabei wird zunächst festgestellt, dass die räumliche Verteilung des relativen MSL einzelner Pegel so ist, wie es auf Basis der Auswertung geologischer Informationen zu erwarten wäre. Grundsätzlich bleiben nach Einbeziehung der geologischen Daten, ermittelt aus den Pegeln nahegelegenen Stationen, $1,4 \pm 0,2$ mm/a an MSL-Anstieg ungeklärt und sind daher als absoluter Anstieg zu bezeichnen. Eine synthetische MSL-Zeitreihe für die deutsche Nordseeküste wird im Rahmen des AMSeL-Projektes (Ermittlung des MSL und Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen an der deutschen Nordseeküste) ermittelt und im Detail analysiert (JENSEN und MUDERSBACH, 2007; JENSEN et al., 2008; WAHL et al., 2008; WAHL et al., 2009).

WOODWORTH et al. (2008) untersuchen weltweit einzelne Pegel, u.a. eine größere Anzahl aus dem europäischen Raum. Dabei fällt auf, dass ein Großteil der letzteren im Gegensatz zu den meisten außer-europäischen Pegeln keine oder gar schwach negative Beschleunigungen im MSL-Anstieg über den gesamten betrachteten Zeitraum (unterschiedlich zwischen 1870 und 2001) aufweisen.

JENSEN und MUDERSBACH (2007) untersuchen den relativen MSL in der deutschen Bucht. Aus einer synthetischen Zeitreihe für die Inselpegel ergibt sich ein Anstieg für den Zeitraum 1894 bis 2005 von 1,25 mm/a. Für die Küstenpegel ergibt sich ein linearer Trend für den Zeitraum 1857 bis 2005 von 1,51 mm/a. Aus dem AMSeL-Projekt ist ein mit wesent-

lich geringeren Unsicherheiten behaftetes Update der Ergebnisse zu erwarten, da hierbei MSL-Zeitreihen für eine größere Anzahl von Pegeln unter Verwendung möglichst langer hochaufgelöster Wasserstandsbeobachtungen ermittelt und im Detail durch Anwendung innovativer Verfahren analysiert werden. Zudem werden aktuelle Erkenntnisse zu Landhebungs-/Senkungseffekten berücksichtigt, so dass neben dem relativen auch der absolute MSL abgeschätzt werden kann.

JEVREJEVA et al. (2006) analysieren MSL-Rekonstruktionen aus 12 Regionen, u.a. dem Nord-Ost-Atlantik. Letzterer zeigt zunächst Anstiegsraten, die über einen langen Zeitraum im mittleren Bereich im Vergleich zu den anderen Regionen liegen. Nach einem leichten Negativtrend nach 1940 ergeben sich einhergehend mit einer starken positiven Beschleunigung nach 1970 jedoch seit ca. 1980 höhere Anstiegsraten als in allen anderen Regionen.

WOODWORTH und HOLGATE (2004) untersuchen die Entwicklung des MSL in 13 Regionen. Eine synthetische Zeitreihe für Nordeuropa zeigt hohe Anstiegsraten nach 1970. Seit Beginn der 1990er zeigen diese Werte nochmal eine Erhöhung an.

6.2.3 Ergebnisse zum lokalen Meeresspiegelanstieg aus Analysen von Beobachtungsdaten

HOLGATE (2007) untersucht neun weltweit verteilte Pegel. Derjenige, welcher am ehesten die Nordsee repräsentiert ist Newlyn. Dieser Pegel zeigt nach Trieste den geringsten Langzeittrend (1,25 mm/a) und nach Key West die geringste Korrelation ($r = 0,29$) mit einer globalen Rekonstruktion.

WÖPPELMANN et al. (2006) untersuchen eine bis 1700 (mit Lücken) zurückreichende MSL-Rekonstruktion des Pegels Brest. Es werden nur relative Raten angegeben, da die Landhebungen/-senkungen als linear über mehrere Jahrhunderte angenommen werden und somit für die Untersuchung der MSL-Entwicklung über die Zeit an einem einzelnen Pegel vernachlässigt werden können. Folgende Anstiegsraten werden für unterschiedliche Zeiträume angegeben: 1807 bis 1890: $-0,09 \pm 0,15$ mm/a; 1890 bis 1980: $1,3 \pm 0,15$ mm/a; 1980 bis 2004: $3,0 \pm 0,5$ mm/a.

DOUGLAS (2001) untersucht einzelne, weltweit verteilte Pegel und gibt relative Anstiegsraten an. Für die Pegel aus der Nordseeregion werden folgende Raten angegeben: Aberdeen 0,7 mm/a (1900–1997); Newlyn 1,7 mm/a (1915–1997), Brest 1,3 mm/a (1990–1991).

7. Zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse

Die vorliegende Untersuchung will die Bandbreite der in der Klimaforschung zum MSL-Anstieg angewandten Methoden und derzeitigen Arbeiten hierzu und die sich daraus ergebenden Ansätze für die Bemessung von Hochwasserschutz- und Küstenschutzbauprojekten darstellen. Die Autoren sehen den zunehmenden Bedarf einer definierten Sturmflutsicherheit, die den voraussichtlichen MSL-Anstieg berücksichtigt. Die Menschen wollen wissen, welches (zusätzliche) Risiko ein Leben z.B. im sturmflutgefährdeten Gebiet an den gefährdeten Küsten und in den natürlichen Fluträumen der Ästuare wie der Elbe zukünftig bedeuten kann.

Eine Metropole wie z.B. Hamburg benötigt als Bauherr und Betreiber der Hochwasserschutzanlagen angesichts der langen Realisierungsdauer eines Bauprogramms für die kom-

plette Hochwasserschutzlinie und der hohen Nutzungsdauer dieser Infrastrukturen ein weit in die Zukunft reichendes Schutzkonzept, das ein definiertes Sicherheitsniveau garantiert. Dieses Schutzniveau wird in Zukunft im Wettbewerb der Küstenregionen ein Standortfaktor mit zunehmender Bedeutung sein. Da die Unsicherheiten in der Klimaforschung sehr groß sind, gilt es hier, die vorhandenen Ergebnisse darzustellen und in ihrer Spannweite zu betrachten. Für eine Einschätzung und Bewertung kann von zwei Seiten argumentiert werden. Zum einen aus Sicht der definierten Sicherheit der Metropolstadt, die mit zunehmendem MSL sinkt und damit die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Sturmflut steigt. Zum anderen gilt es die Zeiträume zu erfassen, die für die Konzeptentwicklung und Umsetzung von Strategien und Küstenschutzwerken zur Erhaltung der definierten Sicherheit benötigt werden. Hierzu sind folgende Punkte und Zeiträume zu beachten:

1. Nutzungsdauer der Deiche ca. 100 Jahre
2. Nutzungsdauer von Toren und anderen Bauwerken ca. 40 Jahre
3. Umsetzung eines Küstenschutzes/Bauprogramms ca. 25–30 Jahre
4. Entwicklung und Umsetzung von zusätzlichen Strategien, d.h. die Dauer ist abhängig von der gewählten Anpassungsform.

In der vorliegenden Analyse wurden die Daten im Detail aufgelistet, die Methodik dargestellt und die Bewertung der Autoren dargelegt. Es zeigt sich, dass die Spannweite aller zurzeit maßgebenden Faktoren aus numerischen oder semi-empirischen Betrachtungen einen globalen MSL-Anstieg von (–5) bis 140 cm bis 2100 umfasst. Analysen des MSL, die längerfristige Aussagen über das Jahr 2100 hinaus machen, sind bislang zu ungenau und werden deshalb in diese Risikobewertung nicht mit einbezogen.

Zudem überschreiten die längerfristigen Betrachtungen damit den oben definierten notwendigen Betrachtungszeitraum. Somit gilt es für eine Bemessung, die Ergebnisse von der Dauer der Herstellung des definierten Sicherheitsniveaus (etwa 30 Jahre) bis hin zu einer realistisch abschätzbaren Interpretation der Ergebnisse zu betrachten.

Der IPCC-Report fasst eine sehr große Anzahl von wissenschaftlichen Untersuchungen zusammen und bildet einen Konsens unter diesen Wissenschaftlern. Er gilt als Grundlage für politische Entscheidungen. Die maximale Angabe zum MSL-Anstieg des IPCC liegt bei 79 cm. Dieser maximale Wert entspricht etwa dem Mittelwert der hier insgesamt dargestellten Ergebnisse von (–5) bis 140 cm mit einer Häufung der Einzelangaben zwischen 20 und 90 cm. Der IPCC-Bericht gibt jedoch an, dass noch große Unsicherheiten vorliegen und die Werte durchaus nach oben korrigiert werden könnten. Auf selbiges deuten aktuelle Analysen des beobachteten MSL, ebenso wie einige numerische Analysen hin.

Für den Bereich der Nordseeküste werden durch unterschiedliche Autoren Anstiegs- werte von –5 bis 115 cm projiziert. Allerdings werden in diesen Untersuchungen sowohl der Einfluss der Eisdynamik als auch der Effekte der Gravitation vernachlässigt. Aus diesem Grund müssen diese Angaben als unvollständig betrachtet werden. Zur Orientierung in Hinblick auf die vernachlässigte Höhe in den Untersuchungen zur Nordsee können die Ergebnisse der DELTACOMMISSIE (2008a, b) herangezogen werden, da dort die betreffenden Effekte berücksichtigt worden sind. Dabei stellt die DELTACOMMISSIE allerdings bewusst gewählte high-end Szenarien dar. Zudem deuten die Beobachtungen auf ein MSL-Verhalten in der Nordseeregion hin, welches in seiner Gesamtheit nicht mit den globalen Beobachtungen im Einklang steht. Grundsätzlich ist bei der Berücksichtigung eines MSL-Zuschlages immer zu beachten, dass die örtlichen Bedingungen mit in Betracht gezogen werden, da die MSL-Entwicklung eine starke regionale Differenzierung zeigt. Der mittlere relative Anstieg des MSL auf der Basis von Wasserstandsbeobachtungen beträgt für den Zeitraum seit 1900 ca. 20 cm für die Deutsche Nordseeküste (WAHL et al., 2010). Weiterhin ist für die Nordsee-

küste der Anstieg des Mitteltidehochwassers (MThw) in Verbindung mit dem Anstieg des MSL zu berücksichtigen. Versucht man die Ergebnisse dieser Arbeit zu bewerten, so liegt ein mittlerer Wert bei 40–80 cm MSL-Anstieg bis zum Jahr 2100. Dementsprechend kommt den Ergebnissen des IPCC mit 79 cm trotz der angegebenen Unsicherheiten als Höchstwert eine bedeutende Rolle zu.

8. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- ANTONOV, J. I.; LEVITUS, S. and BOYER, T. P.: Steric variability of the world ocean, 1955–2003. *Geophysik. Res. Lett.*, 32 (12), L12602, doi: 10.1029/2005GL023112, 2005.
- AUNG, T. H.: Sea Level Monitoring. <http://www.abc.net.au/ra/carvingout/issues/sealevel.htm>, 2005.
- BRAY, D. and STORCH, H. VON: “Prediction” or “Projection”? The Nomenclature of Climate Science. *Science Communication*. doi: 10.1177/1075547009333698, 2009.
- CHURCH, J. A. and WHITE, N. J.: A twentieth century acceleration in global sea-level rise. In: *Geophys. Res. Letters* 33. doi: 10.1029/2005GL02482, 2001.
- CHURCH, J. A.; WHITE, N. J.; COLEMAN, R.; LAMBECK, K. and MITROVICA, J. X.: Estimates of the Regional Distribution of Sea Level Rise over the 1950–2000 Period. In: *Journal of Climate*, Jg. 17, 2609–2625, 2004.
- CHURCH, J. A. and WHITE, N. J.: A 20th century acceleration in global sea-level rise. In: *Geophysical Research Letters*, Jg. 33. L01602. doi: 10.1029/2005GL024826, 2006.
- CHURCH, JOHN A.; WHITE, NEIL J.; AARUP, THORKILD; WILSON, STANLEY W.; WOODWORTH, PHILIP L. and DOMINGUES, CATIA M. et al.: Understanding global sea levels: past, present and future. *Sustainability Science*, Jg. 3, H. 1, 9–22, 2008.
- DAVIS, J. L. and MITROVICA, J. X.: Glacial isostatic adjustment and the anomalous tide gauge record of eastern North America. In: *Nature*, 379, 331–333, 1996.
- DELTA-COMMISSIE: Samen werken met water. En land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst. www.deltacommissie.com, 2008a.
- DELTA-COMMISSIE: Exploring high-end climate change scenarios for flood protection of the Netherlands. International Scientific Assessment, Carried out a request of the delta committee, 2008b.
- DKRZ: Deutsches Klimarechenzentrum. http://www.dkrz.de/dkrz/science/IPCC_AR4/scenarios_AR4_Sealevel, 2008.
- DOMINGUES, C. M.; CHURCH, J. A.; WHITE, N. J.; GLECKLER, P. J.; WIJFFELS, S. E.; BARKER, P. M. and DUNN, J. R.: Rapid upper-ocean warming helps explain multidecadal sea level rise. *Nature*, 453, 1090–1093, doi: 10.1038/nature07080, 2008.
- DOUGLAS, B. C.: Sea level change in the era of the recording tide gauge. In: Douglas, B. C.; Kearney, M. S. and Leatherman, S. P. (eds.), *Sea Level Rise*. *Int. Geophys. Ser.*, 75, 37–64, 2001.
- GÖNNERT, G.; ISERT, K.; GIESE, H. und PLÜSS, A.: Charakterisierung der Tidekurve. *Die Küste*, 68, 100–141, 2004.
- GÖNNERT, G.; NIEMEYER, H.; PROBST, B.; BUSS, T.; SCHALLER, D. und STROTMANN, T.: Bemesungssturmflut 2085A an der Elbe. Überprüfung nach 10 Jahren. Ergebnis der Länderarbeitsgruppe (unveröffentlicht), 2007.
- GREGORY, J. M.; CHURCH, J. A.; BOER, G. J.; DIXON, K. W.; FLATO, G. M.; JACKETT, D. R.; LOWE, J. A.; O’FARRELL, S. P.; ROECKNER, E.; RUSSELL, G. L.; STOFFER, R. J. and WINTON, M.: Comparison of results from several AOGCMs for global and regional sea-level change 1900–2100. *Climate Dynamics*, 18, 241–253, 2001.
- GREGORY, J. M. and HUYBRECHTS, P.: Ice sheet contributions to future sea-level change. *Phil. Trans. R. Soc. London A* 364, 1709–1731. doi: 10.1098/rsta.2006.1796, 2006.
- GRINSTED, A.; MOORE, J. C. and JEVREJEVA, S.: Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Clim Dyn.* doi: 10.1007/s00382-008-0507-2, 2009.
- GROSSMANN, I.; WOTH, K. and STORCH, H. VON: Localization of global climate change: Storm surge scenarios for Hamburg in 2030 and 2085. *Die Küste*, 71, 2006.

- GROSSMANN et al.: QUELLE: STORCH (2008). Vortrag im Rahmen des Symposiums „Globaler Klimawandel und regionale Auswirkungen in Norddeutschland“, 12. März 2007, Hamburg, 2007.
- HOLGATE, S. J. and WOODWORTH P. L.: Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s. *Geophysical Research Letters*, 31, L07305. doi: 10.1029/2004GL019626., 2004.
- HOLGATE S. J.: On the decadal rates of sea level change during the twentieth century, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L01602, doi: 10.1029/2006GL028492, 2007.
- IKÜS: Abschlussbericht des KFKI-Forschungsvorhabens IKÜS (Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik), zum download verfügbar unter: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_geowissenschaften/gi/gg/forschung/ikues, 2009.
- IPCC: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/vol4/english/index.htm>, 2001.
- IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor M.; Miller, H. L. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2007.
- ISHII, M.; KIMOTO, M.; SAKAMOTO, K. and IWASAKI, S. I.: Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses. *J. Oceanogr.*, 62 (2), 155–170, 2006.
- JENSEN, J. und MUDERSBACH, C.: Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. *Berichte zur deutschen Landeskunde*, Band 81, Heft 2, 2007.
- JENSEN, J. and MÜLLER-NAVARRA, S.: Storm Surges on the German Coast. *Die Küste*, 74, 92–125, 2008.
- JENSEN, J.; WAHL, T. and MUDERSBACH, CH.: Sea Level Variations at the German North Sea and Baltic Sea Coastlines, *Proceedings of the 7th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (PIANC COPEDEC VII)*, Dubai, 2008.
- JEVREJEVA, S.; GRINSTED, A.; MOORE, J. C. and HOLGATE, S. J.: Nonlinear trends and multi-year cycles in sea level records. *Journal of Geophysical Research*, Jg. 111. C09012. doi: 10.1029/2005JC003229, 2006.
- JEVREJEVA, S.; MOORE, J. C.; GRINSTED, A. and WOODWORTH, P. L.: Recent global sea level acceleration started over 200 years ago. *Geophysical Research Letters*, Jg. 35. L08715. doi: 10.1029/2008GL033611, 2008.
- KAPPA, M.: *Klimatologie. Klimaforschung im 21. Jahrhundert – Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaften*. Spektrum Akademischer Verlag, 2009.
- KATSMAN, C. A.; HAZELEGER, W.; DRIJFHOUT, S. S.; VAN OLDENBORGH, G. J. and BURGERS, G.: Climate scenarios of sea level rise for the northeast Atlantic Ocean: a study including the effects of ocean dynamics and gravity changes induced by ice melt. *Climatic Change*, 2008.
- KNMI: VAN DEN HURK, B. J. J. M.; KLEIN TANK, A. M. G.; LENDERINK, G.; VAN ULDEN, A. P.; VAN OLDENBORGH, G. J.; KATSMAN, C. A.; VAN DEN BRINK, H. W.; KELLER, F.; BESSEMBINDER, J. J. F.; BURGERS, G.; KOMEN, G. J.; HAZELEGER, W. and DRIJFHOUT, S. S.: *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*. Technical report WR-2006-01, KNMI, www.knmi.nl/climatescenarios, 2006.
- KUHLBRODT, T.; RAHMSTORF, S.; ZICKFELD, K.; VIKEBØB, F.; SUNDBY, S.; HOFFMAN, M.; LINK, P. M.; BONDEAU, A.; CRAMER, W. and JAEGER, C.: *An Integrated Assessment of Changes in the Thermohaline Circulation*. *Climatic Change*, 2007.
- LAMBECK, K. and JOHNSTON, P.: Sea-level change, glacial rebound and mantle viscosity for northern Europe. *Geophys. J. Int.*, 134, 102–144, 1998.
- LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. *Die Küste*, 50, 65–96, 1989.
- MATHER, A. A.: Sea Level Rise for the East Coast of Southern Africa, *Proceedings of the 7th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (PIANC COPEDEC VII)*, Dubai, 2008.
- MEEHL, G. A.; STOCKER, T. F.; COLLINS, W. D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAYE, A.T.; GREGORY, J. M.; KITOH, A.; KNUTTI, R.; MURPHY, J. M.; NODA, A.; RAPER, S. C. B.; WATTERSON, I. G.; WEAVER, A. J. and ZHAO, Z.-C.: Global Climate Projections. In: Solomon, S;

- Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M. and Miller, H. L. (eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, New York, 2007.
- MEIER, M. F.: Contribution of small glaciers to global sea level. *Science* 226, 1418–1421, 1984.
- MEIER, M. F.; DYURGEROV, M. B.; RICK, U. K.; O'NEEL, S.; PFEFFER, W. T.; ANDERSON, R. S.; ANDERSON, S. P. and GLAZOVSKY, A. F.: Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century. *Science* 317, 1064–1067. doi: 10.1126/science.1143906, 2007.
- MITROVICA, J. X.; TAMISIEA, M. E.; DAVIS, J. L. and MILNE, J. L.: Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea level change. *Nature*, 409, 1026–1029, 2001.
- MOORE, J. C. and GRINSTED, A.: *New Tools for Analyzing Time Series Relationships and Trends.* EOS, Vol. 86, 24, 2005.
- MPI-M: Max-Planck-Institut für Meteorologie: Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert, Hamburg, 2006.
- MPI-M: Max-Planck-Institut für Meteorologie: Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. In: Umweltbundesamt. *Climate Change, Dessau-Roßlau, 2008a.*
- MPI-M: Max-Planck-Institut für Meteorologie: Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios, Hamburg, 2008b.
- NIEMEYER, H.: Datenauswertung Norderney (mündliche Auskunft), 2009.
- OTTO-BLIESNER, B. L.; MARSHALL, S. J.; MILLER, G. H. and HU, A.: Last Interglaciation Project members, 'Simulating Arctic climate warmth and ice-field retreat in the last interglaciation'. *Science*, 311, 1751–1753, 2006.
- PELTIER, W. R.: Global glacial isostatic adjustment and modern instrumental records of relative sea level history. In: Douglas, B. C.; Kearney, M. S. and Leatherman, S. P. (eds.) *Sea Level Rise, International Geophysical Series, 75, 65–95, 2001.*
- PFEFFER, W. T.; HARPER, J. T. and O'NEEL, S.: Kinematic Constrains on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise. *Science* Vol. 321. 1340–1343, 2008.
- PIK: *Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke, Ausblicke.* Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., 2007.
- PLAG, H.-P. and JUTTNER, H.-U.: Inversion of global tide gauge data for presentday ice load changes, in *Proceed. Second Int. Symp. on Environmental research in the Arctic and Fifth Ny-Alesund Scientific Seminar, Yamanouchi, T. (ed.) Special Issue, No. 54 in Memoirs of the National Institute of Polar Research, 301–317, 2001.*
- RAHMSTORF, S.: A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. *Science* Vol. 315, 368–370, 2007.
- RAHMSTORF, S.; CAZENAVE, A.; CHURCH, J. A.; HANSEN, J. E.; KEELING, R. F.; PARKER, D. E. and SOMERVILLE, R. C. J.: Recent Climate Observations Compared to Projections. *Science* Vol. 316, 709, 2007.
- RAHMSTORF, S.: Sea level Rise. Vortrag im Rahmen des Klimakongresses in Kopenhagen, März 2009.
- RAPER, S. C. B. and BRAITHWAITE, R. J.: Low sea level rise projections from mountain glaciers and icecaps under global warming. *Nature*, 439, 311–31, 2006.
- RIDLEY, J. K.; HUYBRECHTS, P.; GREGORY, J. M. and LOWE, J. A.: Elimination of the Greenland ice sheet in a high CO₂ climate. *J. Climate*, 17, 3409–3427, 2005.
- SHELLNHUBER: http://www.focus.de/wissen/wissenschaft/klima/neue-warnungen-klimawandel-staerker-als-gedacht_aid_339322.html, 2008a.
- SHELLNHUBER: Global warming: Stop worrying, start panicking?. *PNAS* 38, 14239–14240, 2008b.
- SCHMITH, T. H.; JOHANSEN, S. and THEJLL, P.: Comment on a semi-empirical approach to projecting future sea level rise. *Science*, 317, 866c, 2007.
- SHEPHERD, A. and WINGHAM, D.: Recent sea-level contributions of the Antarctic and Greenland ice sheets. *Science*, 315, 1529–1532, 2007.
- STERR, H.: Klimawandel an der Nordsee: Was bedeutet das für die Region NF und die Inseln & Halligen? Vortrag im Rahmen der Insel- und Hallig-Konferenz vom 13.6.2007 in Dagebüll, 2007.

- STORCH, H. VON; ZORITA, E. and GONZÁLEZ-ROUCO, J. F.: Relationship between global mean sea-level and global mean temperature in a climate simulation of the past millennium. *Ocean Dynamics*, 58, 227–236, 2008.
- UKCIP: UK Climate Impacts Programme, www.ukcip.org.uk, 2007.
- VAUGHAN, D. G.: West Antarctic Ice Sheet Collapse – the fall and rise of a paradigm. *Climate Change (im Druck)*, 2008.
- WAHL, T.; JENSEN, J. and FRANK, T.: Changing Sea Level and Tidal Dynamics at the German North Sea Coastline, *Proceedings of the Coastal Cities Summit 2008 – Values and Vulnerabilities*, St. Petersburg, Florida, USA, 2008.
- WAHL, T.; JENSEN, J. and FRANK, T.: Combining high and low resolution sea level data for MSL computations in shallow seas. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, EGU General Assembly 2009, Vienna, 2009.
- WAHL, T.; JENSEN, J. and FRANK, T.: On analyzing sea level rise in the German Bight since 1844, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 171–179, 2010.
- WANNINGER, L. et al.: Bestimmung von Höhenänderungen im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken, *Die Küste*, 76, 2009.
- WBGU: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. *Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten*. Berlin, 2006.
- WHITE, N. J.; CHURCH, J. A. and GREGORY, J. M.: Coastal and global averaged sea level rise for 1950 to 2000, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L01601, doi: 10.1029/2004GL021391, 2006.
- WILLIS, J. K.; ROEMMICH, D. and CORNUELLE, B.: Interannual variability in upper ocean heat content, temperature, and thermosteric expansion on global scales. *J. Geophys. Res.*, 109, C12036, doi: 10.1029/2003JC002260c, 2004.
- WOODWORTH, P. L.; WHITE, NEIL J.; JEVREJEVA, S.; HOLGATE, S. J. and GEHRELS, W. R.: Evidence for the accelerations of sea level on multi-decade and century timescales. *International Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.1771, 2008.
- WOODWORTH, P. L.; TEFERLE, F. N.; BINGLEY, R. M.; SHENNAN, I. and WILLIAMS, S. D. P.: Trends in UK mean sea level revisited. *Geophysical Journal International*, Jg. 176, 22, 19–30, 2009.
- WÖPPELMANN, G.; POUVREAU, N. and SIMON, B.: Brest sea level record: a time series construction back to the early eighteenth century. *Ocean Dynamics*, 56, Issue 5–6, pp. 487–497. doi: 10.1007/s10236-005-0044-z, 2006.