

Erkenntnisse zum Meeresspiegelanstieg auf Basis des IPCC „Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)“, Kapitel 4

Erstellt durch die Bundesoberbehörden BSH, DWD, BAW, BfG

Hintergrund

Der Weltklimarat (IPCC) beschloss auf seiner 43. Sitzung im April 2016 in Nairobi, Kenia, die Erstellung eines Sonderberichts über den Klimawandel im Ozean und in der Permafrostzone (SROCC). Dieser Bericht liegt nun für die Regierungsbegutachtung vor und wird im Folgenden zusammengefasst. Die vorliegende Zusammenfassung bezieht sich auf das 4. Kapitel des SROCC, das den Meeresspiegelanstieg behandelt.

Änderungen des Meeresspiegels in Folge des Klimawandels gelten als eine der größten zukünftigen Herausforderungen für Küstenregionen. Zur Projektion der globalen Meeresspiegeländerungen ist es nötig, die einzelnen Komponenten, die zu einer Meeresspiegeländerung beitragen, möglichst genau zu erfassen. In diesem Kontext arbeiten Forschergruppen zurzeit daran, die Datengrundlage der Beobachtungsdatensätze durch Reprozessierung (s. <https://www.globalmass.eu/> und die ESA Climate Change Initiative CCI <http://cci.esa.int/objective>) zu konsolidieren, um die bisherigen Änderungen besser erklären zu können. Die wesentlichen Komponenten der globalen Meeresspiegelveränderung sind Dichteänderungen des Wassers im Ozean (thermische Ausdehnung), Änderungen der Eismassen an Land (Gletscher, Eisschilde) und Änderungen der Wasserspeicher an Land.

Aktuelle Entwicklungen

Während für das vorherige Jahrhundert etwa 50 % des globalen Meeresspiegelanstiegs auf die Dichteänderungen des Wassers im Ozean zurückzuführen sind, wurde etwa um das Jahr 2005 dieser Beitrag durch Änderungen der Eismassen an Land als Hauptkomponente des Anstiegs abgelöst (Slangen et al., 2017). Zur Zeit sind die Beiträge der Landgletscher zum Meeresspiegelanstieg noch größer als die der Eisschilde auf Grönland und der Antarktis, da sie zum einen sensibler auf die Erderwärmung reagieren und zum anderen auch zumeist in wärmeren Klimazonen liegen (Gregory et al., 2013). Es wird jedoch erwartet, dass in näherer Zukunft der Beitrag von Grönland und (in fernerer Zukunft) derjenige der Antarktis den Beitrag der Landgletscher übersteigen wird.

Seit dem 5. Zustandsbericht (AR5; Church et al., 2013) ist das Prozessverständnis für die verschiedenen Komponenten gestiegen, insbesondere im Hinblick auf die Beiträge der Eisschilde (SROCC, S. 4-18). Unter dem Begriff „Eisschilde“ werden hier die massiven Eismassen auf Grönland und dem Antarktischen Kontinent verstanden. Besonders letztere ragen in ausgedehnten Eiszungen auf den Südlichen Ozean hinaus, so dass das Eis in Kontakt mit dem Meerwasser steht. Mit zunehmender Erwärmung des Ozeans beschleunigt sich das Abschmelzen der Eismassen an der Grenzschicht, was zu Instabilitäten, Abbrüchen und daraus folgend dem Kollaps und Rückzug der Eiszungen führt (SROCC, Kapitel 4.2.3.1 Contribution of Ice Sheets to GMSL, Fig. 4.8). Die Eischmelze im Kontakt mit Ozeanwasser und erhöhte Kalbungsraten sind für die Beiträge der Antarktis zum globalen Meeresspiegelanstieg entscheidend, während auf Grönland das vermehrte Abschmelzen an der Eisoberfläche dominiert.

Unsicherheiten der Eisdynamik

Die Integration der oben beschriebenen Eisprozesse in die globalen Klimamodelle ist nicht trivial und der potentielle Beitrag der Eisschilde zum zukünftigen globalen Meeresspiegelanstieg in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts unterliegt *tiefer Unsicherheit*, obwohl sich der Kenntnisstand der Wissenschaft seit dem AR5 Bericht deutlich verbessert hat. Als mit *tiefer Unsicherheit behaftet* wird

im SROCC ein Prozess beschrieben, der vielen unbekanntem Einflüssen unterliegt oder für den sich die Autoren nicht auf eine konzeptionelle Darstellung oder Bestimmung der Risiken und Unsicherheiten einigen konnten (SROCC, Cross Chapter Box 5). Zurzeit liegen noch immer keine globalen Modelle vor, die die Reaktion der Eisschilde auf das Klima im 20. Jahrhundert robust simulieren, jedoch wird für die Modelle der nächsten Generation (CMIP6) eine Verbesserung erwartet. Es wird davon ausgegangen, dass der Beitrag der Antarktis im laufenden Jahrhundert zunimmt und im AR5 unterschätzt wurde. Für die projizierte Abschmelzrate der Antarktis wird ab Mitte des 21. Jahrhunderts die Unsicherheit der zukünftigen Emissionsraten bedeutend, da die Abschmelzraten in den unterschiedlichen Szenarien sehr deutlich auseinanderlaufen.

Mittlerer Globaler Meeresspiegelanstieg

Gegenwärtige Beiträge

Die mittlere Rate des globalen Meeresspiegelanstiegs für den Zeitraum der Beobachtungen wird im SROCC (Tab. 4.1) für unterschiedliche Perioden angegeben, die eine Erhöhung der Rate deutlich werden lassen: 1,38 mm/Jahr für 1901-1990 gegenüber 3,16 mm/Jahr für 1993-2015. Der Beitrag der einzelnen Komponenten für letztere Periode wird dabei wie folgt quantifiziert: thermische Ausdehnung 43%, Landgletscher 18%, Grönland 15% und Antarktis 9%. Gegenüber den im AR5 berichteten Ergebnissen werden nun der Eisverlust auf Grönland und der beschleunigte Eisverlust der Antarktis als Hauptkomponenten für die Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs im Zeitraum 1993-2015 identifiziert (SROCC, S. 4-24). Die Schlussfolgerung aus vielen im SROCC genannten Quellen lautet, dass mit hoher Sicherheit seit 1970 der anthropogene Einfluss der dominante Antrieb des globalen Meeresspiegelanstiegs ist (*sehr wahrscheinlich*, S. 4-31).

Zukunft im 21. Jahrhundert

Projektionen des globalen Meeresspiegelanstiegs relativ zum Zeitraum 1986-2005 werden im SROCC basierend auf den im AR5 präsentierten Modellläufen mit überarbeitetem Beitrag der Antarktis¹ für drei Szenarien angegeben: RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5. Es zeigt sich, dass für die ersten beiden Szenarien der globale Meeresspiegel bis zum Jahr 2100 um 43 cm (29 – 59 cm) bzw. 55 cm (39 – 72 cm) steigt, während im letzten Szenario („Weiter-wie-bisher-Szenario“) nun ein Anstieg um 84 cm (61 – 110 cm)² erwartet wird (Tab. 4.4). Für die *nahe Zukunft* (Zeitraum 2046-2065) liegen alle Szenarien bei etwa 30 cm (17 – 40 cm). Die angegebenen Werte drücken den Median aus, die Werte in Klammern geben die *wahrscheinliche Bandbreite* an, in welcher der Meeresspiegelanstieg für 2/3 aller Modellläufe liegt und repräsentieren damit den Perzentilbereich 17-83 %. Angaben zu extremeren Perzentilen (z.B. 95. Perzentil) für Risikobetrachtungen werden im SROCC (und im AR5) für das Ensemble der Modellläufe nicht geliefert. Im SROCC wird zusammenfassend darauf hingewiesen, dass sich die projizierten Änderungen des Meeresspiegels seit dem AR5 erhöht haben und auch die Unsicherheit größer geworden ist (S. 4-4, Executive Summary).

Ergänzend werden im SROCC Ergebnisse aus Einzelstudien angeführt, die zumeist auf statistischen Methoden (probabilistischen Abschätzungen) basieren und umfassende Wahrscheinlichkeitsverteilungen darstellen. Aufgrund der in den einzelnen Studien getroffenen unterschiedlichen Annahmen können deren Ergebnisse nicht zusammengefasst werden und dienen daher der Einschätzung der Sensitivität und möglichen Bandbreite³. Als obere Grenze für die wahrscheinliche Bandbreite im RCP8.5 Szenario liefert eine dieser Studien 246 cm (SROCC, Tab. 4.6), als untere Grenze sind 43 cm zu finden, was die große Bandbreite aufzeigt. Speziell beim „Weiter-wie-bisher“ Szenario RCP8.5 ist der Beitrag der Antarktis zum Meeresspiegel am Ende des 21. Jahrhundert substantiell und variiert zwischen 3 cm und 28 cm (Tab. 4-4).

¹ Für Grönland werden die Ergebnisse aus dem AR5 beibehalten.

² In dem BSH-Bericht aus dem Jahr 2017 wird im RCP8.5 ein Meeresspiegelanstieg von 174 cm für das 95. Perzentil aus der Arbeit von Grinsted et al. (2015) zitiert. In dieser Studie lag der Median bei 80 cm mit einer Bandbreite von 58 - 120 cm. Die nun im SROCC zitierten Werte für den entsprechenden Perzentilbereich liegen in einer ähnlichen Größenordnung. Ein direkter Vergleich für das 95. Perzentil kann wegen der fehlenden Angaben im SROCC nicht durchgeführt werden.

³ In dieser Auflistung ist auch die Studie von Grinsted et al. (2015) angegeben, die sich im oberen Bereich der Werte für den Meeresspiegelanstieg im Jahr 2100 unter RCP8.5 einordnet, aber nicht das Maximum darstellt.

Anstiegsraten im Jahr 2100 und ferne Zukunft

Für die Planung im Küstenbereich ist jedoch nicht nur die zu erwartende Änderung des Meeresspiegels bis 2100 wichtig, sondern auch die projizierte Anstiegsrate, die den Meeresspiegel im 22. Jahrhundert weiter erhöht. Diese beträgt für die drei genannten Szenarien 4 mm/Jahr (2 - 6 mm/Jahr), 7 mm/Jahr (4 - 9 mm/Jahr) und 15 mm/Jahr (10 – 20 mm/Jahr) (SROCC, Tab. 4.4). Da die Anpassung des Meeresspiegels an ein verändertes Klima ein langfristiger Prozess ist, werden die Änderungen des Anstiegs und der Anstiegsrate über das Jahr 2100 hinausgehen. In dieser *fernen Zukunft* sind die Unsicherheiten des Antarktischen Beitrags auch durch mangelnde Prozesskenntnis sehr groß. Es gibt nur wenige Studien, die Werte über das Jahr 2100 hinaus liefern. Simulationen mit RCP8.5 Szenarien können jedoch einen Meeresspiegelanstieg bis zu 15 m im Jahr 2500 erzeugen (S. 4-39 und Fig. 4.2).

Auswirkungen auf die deutschen Küsten

Regionaler Meeresspiegel

Der Meeresspiegelanstieg ist nicht weltweit einheitlich, da sich die oben beschriebenen Komponenten des Meeresspiegelanstiegs nicht überall gleich auswirken. Zusätzlich tragen im Küstenbereich weitere Prozesse zu lokalen Änderungen des Meeresspiegels bei, z.B. dynamische Effekte der Ozeanzirkulation, vertikale Landbewegungen und atmosphärische Einflüsse. Hier können auch menschliche Aktivitäten eine Rolle spielen; so kann beispielsweise der Abbau von Rohstoffen zu Landsenkungen führen. Als Folge steigt der lokale Meeresspiegel relativ zur Küste. Der globale Meeresspiegel (und seine Änderungen) sind daher nicht für jeden Küstenort direkt auf die lokale Ebene übertragbar; diese Übertragung muss in Zukunft durch Regionalmodelle geleistet werden. Dieses ist auch für die deutsche Küste zu beachten.

Extreme Wasserstände

Extreme Wasserstände entstehen durch das Zusammenspiel von mittlerem Meeresspiegel, Sturmflut, Gezeiten und Wellen. Auch kleine Änderungen im mittleren Meeresspiegel können die Frequenz und Stärke von Hochwasserereignissen erhöhen (S. 4-48). Die Häufigkeit von Extremereignissen, die historisch seltene Hochwasserereignisse darstellen, steigt für alle Emissionsszenarien bis 2100. Das gewählte Emissionsszenario bestimmt Wiederholungsrate und Höhe der Extremereignisse. Für 100-jährige Sturmfluten, inklusive eines Beitrags des Seegangs, verändern sich die Wasserstände an der Nordseeküste im Mittel um fast 100 cm (hauptsächlich durch den lokalen Meeresspiegelanstieg) beim „Weiter-wie-bisher-Szenario“ RCP8.5 (Vousdoukas et al., 2017). Dies bedeutet, dass nach dieser Studie für die Nordseeküste im Mittel ein heute 100-jähriges Hochwasserereignis im Jahr 2100 etwa 50-mal in 100 Jahren auftritt, wobei die Bandbreite dabei von 3 bis 300-mal in 100 Jahren reicht. Speziell für Cuxhaven gibt der SROCC an, dass im RCP8.5 Szenario heutige 100-jährige Ereignisse bis zum Ende des Jahrhunderts etwa alle 15 Jahre (7-mal in 100 Jahren) auftreten (Fig. 4-11). Die Nordseeregion sticht im RCP8.5 Szenario als Gebiet mit dem höchsten Zuwachs der Extremwasserstände in Europa heraus.

Weitere Auswirkungen⁴

Neben den Folgen für den Küstenschutz durch extreme Wasserstände hat der Meeresspiegelanstieg aufgrund der generell höheren Wasserstände weitere Auswirkungen. In Küstennähe kann eine verstärkte Versalzung des Oberflächenwassers, Grundwassers und der Böden auftreten (S. 4-72). Die erhöhten Wasserstände können zu vermehrten Herausforderungen bei der Entwässerung des Hinterlands führen. Aufgrund des Meeresspiegelanstiegs verändert sich in der Deutschen Bucht und in den Ästuaren die Tidedynamik. Daraus resultieren veränderte Sedimenttransporte und morphologische Veränderungen in den Ästuaren und Wattgebieten.

Risikobetrachtungen

Im Bereich der Forschung wird bei der Risikobewertung des Meeresspiegelanstiegs im Küstenbereich in einigen Publikationen abweichend vom IPCC statt des 83. auch das 95. Perzentil eines Modellensembles genutzt (Grinsted et al., 2015). Für die Anpassung im Küstenbereich kommen

⁴ Diese weiteren Auswirkungen sind im SROCC teilweise allgemein und nicht explizit für die deutsche Küste genannt.

weiterhin Verfahren wie beispielsweise das Überlagerungsverfahren zum Einsatz. Das Umweltbundesamt verwendet im „Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen“ das 85. Perzentil des Klimamodellensembles des DWD. Diese Wahl des Perzentils ist mit den im SROCC angegebenen Werten vergleichbar.

Unmittelbare lokale Konsequenzen für den Küstenbereich sind abhängig von der Häufigkeit der Hochwasserereignisse und den Ursachen der hohen Wasserstände (mittlerer, gradueller Anstieg gegenüber Wellen oder Windstau) und müssen detailliert im Einzelfall betrachtet werden. Ein weiterer Effekt bei der Analyse zukünftiger Extrempegelstände ist der mit dem Meeresspiegelanstieg einhergehende erhöhte Wellenauflauf an der Küste (S. 4-53; Arns et al., 2017⁵), der zusätzlichen Stress auf z.B. Küstenbauwerke oder die Vorlandvegetation ausübt. Für realistische Simulationen von Extremwasserständen müssen der mittlere Meeresspiegelanstieg, Gezeiten, Windstau und Wellenauflauf gemeinsam und überlagernd simuliert werden, was nur in wenigen Studien bisher erfolgt ist.

Fazit

Es besteht weiterhin großer Forschungsbedarf zum globalen, regionalen und lokalen Meeresspiegelanstieg. Da sich zeigte, dass im AR5 der Anteil der Antarktis in den Projektionen der Klimamodelle (58 Modelle der CMIP5 Generation) nicht adäquat abgebildet wird, wurde dieser Beitrag in den letzten Jahren verstärkt beforscht. Die Studie von Grinsted et al. (2015) mit dem Fokus auf Nordeuropa ist als Pionier auf diesem Gebiet zu sehen. Im Vergleich zum BSH Bericht von 2017 liegt nun eine größere Anzahl an Modellergebnissen vor (die CMIP5 Modelle wurden aktualisiert), die im SROCC zusammengefasst wurde.

Mit der neuen Modellgeneration (CMIP6) wurden im Jahr 2017 Rechnungen gestartet, die in den neuen Zustandsbericht des IPCC (AR6) einfließen sollen. Für die Einschätzung der Konsequenzen des Meeresspiegelanstiegs auf lokaler Ebene sind zusätzlich Regionalstudien unerlässlich, jedoch liegen bisher nur wenige für die deutsche Küste vor. Das gilt sowohl für die Extremereignisse, für die mittleren Verhältnisse, als auch für die Veränderung der Tide. Zusätzlich sind auch Betrachtungen der lokalen vertikalen Landbewegungen notwendig. Um verlässliche Aussagen zu den Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs an der Deutschen Küste zu erhalten, sind hochaufgelöste Modelle notwendig. Es ist wichtig, Veränderungen durch morphodynamische Prozesse zu berücksichtigen.

⁵ Die Studie von Arns et al. (2017) verwendet die von Grinsted et al. (2015) angegebenen Meeresspiegelerhöhungen und berechnet aus diesen Ausgangssituationen die Extrempegelstände. Arns et al. (2017) liefern keine eigenen Zahlen zur Meeresspiegelerhöhung.

Literatur:

Arns, A., S. Dangendorf, J. Jensen, S. Talke, J. Bender, C. Pattiaratchi (2017): Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. *Nature Scientific Reports*, 7, doi: 10.1038/srep40171.

Church, J.A. et al. (2013): Sea Level Change. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Chapter 13, eds. Stocker TF, et al. (Cambridge Univ. Press).

Forschungsprojekt ALADYN: Analysing long-term changes of tidal dynamics in the German Bight. Laufzeit 10/2016 – 09/2019, Koordinator: Prof. J. Jensen an der Universität Siegen, Förderung: BMBF/FONA, <https://deutsche-kuestenforschung.de/aladyn-311.html>.

Gregory, J.M. et al. (2013): Twentieth-Century Global-Mean Sea Level Rise: Is the Whole Greater than the Sum of the Parts?. *Journal of Climate*, 26, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00319.1.

Grinsted, A., S. Jevrejeva, R.E.M. Riva, & D. Drahl-Jensen (2015): Sea level rise projections for northern Europe under RCP 8.5. *Climate Research*, 64, doi:10.3354/cr01309.

KLIWAS 2.03 (2014): Klimabedingt veränderte Tidekennwerte und Seegangstatistik in den Küstengewässern. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.03. KLIWAS-33/2014. doi: 10.5675/Kliwas_33/2014_2.03. Available from: http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_43_2014_2.03.pdf.

Umweltbundesamt (2017): Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen, Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass), Umweltbundesamt Dessau, www.umweltbundesamt.de/publikationen.

Slangen, A.B.A. et al. (2017): Evaluating Model Simulations of Twentieth-Century Sea Level Rise. Part I: Global Mean Sea Level Change. *Journal of Climate*, 30, doi: 10.1175/JCLI-D-17-0110.1.

Vousdoukas, M.I. et al. (2017): Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future*, 5, doi: 10.1002/2016EF000505.

Zusammenfassung

Kenntnisstand aus Beobachtungen

- Wesentliche Komponenten des globalen Meeresspiegelanstiegs sind Dichteänderungen des Wassers im Ozean (thermische Ausdehnung), Änderungen der Eismassen (Landgletscher und Eisschilde) und Änderungen der Wasserspeicher an Land.
- Der Beitrag der einzelnen Komponenten für die Periode 1993-2015 beträgt: thermische Ausdehnung 43%, Landgletscher 18%, Grönland 15% und Antarktis 9%.
- Seit 2005 sind die Änderungen der Eismassen die Hauptkomponente des Anstiegs.
- Zurzeit sind die Beiträge der Landgletscher noch größer als die der Eisschilde auf Grönland und der Antarktis. Es wird erwartet, dass in näherer Zukunft der Beitrag von Grönland und (in fernerer Zukunft) derjenige der Antarktis den Beitrag der Landgletscher übersteigen wird.

Erwartungen für die Zukunft aus Klimamodellierungen

- Seit dem 5. Zustandsbericht (AR5) aus dem Jahr 2013 ist das Prozessverständnis für die verschiedenen Komponenten des Meeresspiegelanstiegs gestiegen.
- Es wird davon ausgegangen, dass der Beitrag der Antarktis im laufenden Jahrhundert zunimmt und im AR5 unterschätzt wurde. Daher erhöhen neuere Abschätzungen den mittleren Meeresspiegelanstieg bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum AR5.
- Für die projizierte Abschmelzrate der Antarktis wird ab Mitte des 21. Jahrhunderts die Unsicherheit der zukünftigen Emissionsraten bedeutend, da die Abschmelzraten in den unterschiedlichen Szenarien sehr deutlich auseinanderlaufen.
- Der SROCC liefert für die drei Emissionsszenarien folgende aktualisierte Werte zum Meeresspiegelanstieg bis 2100⁶:
 - RCP2.6 „Klimaschutzszenario“: 43 cm (29 – 59 cm)
 - RCP4.5 „Moderates Szenario“: 55 cm (39 – 72 cm)
 - RCP8.5 „Weiter-wie-bisher-Szenario“: 84 cm (61 - 110 cm)
- Die höheren Werte im SROCC sind hauptsächlich durch erhöhte Antarktisbeiträge verursacht.
- Für die Planung im Küstenbereich ist neben dem projizierten Anstieg auch die Anstiegsrate ein relevanter Parameter. Diese beträgt im Jahr 2100 für die drei genannten Szenarien 4 mm/Jahr (RCP2.6), 7 mm/Jahr (RCP4.5) und 15 mm/Jahr (RCP8.5). Anmerkung: im Zeitraum 1901-1990 lagen die beobachteten Raten global bei 1.38 mm/Jahr, jedoch für die Periode 1993-2015 bei 3.16 mm/Jahr.
- Die Ergebnisse für den Meeresspiegelanstieg bis 2100 wurden im SROCC für das RCP8.5 Szenario um 10 cm im Median gegenüber dem AR5 nach oben korrigiert, auch wurde die obere Grenze der wahrscheinlichen Bandbreite um 12 cm erhöht.

Auswirkungen auf die deutschen Küsten

- Die Häufigkeit von Extremereignissen (historisch seltene Hochwasserereignisse) steigt für alle Emissionsszenarien bis 2100.
- Für Cuxhaven ergibt sich im RCP8.5 Szenario, dass ein heute 100-jähriges Ereignis etwa alle 15 Jahre auftreten kann.
- Der Meeresspiegelanstieg kann zusätzlich zu erhöhtem Wellenaufwurf an der Küste führen und beeinflusst zukünftige Extrempegelstände.
- Konsequenzen für den Küstenbereich müssen immer im Einzelfall betrachtet werden, da lokale Landhebung/-senkung und morphologische Gegebenheiten eine große Rolle spielen.

⁶ Die angegebenen Werte drücken den Median aus, die Werte in Klammern geben die *wahrscheinliche Bandbreite* an, in welcher der Meeresspiegelanstieg für 2/3 aller Modellläufe liegt und repräsentieren damit den Perzentilbereich 17-83 %.