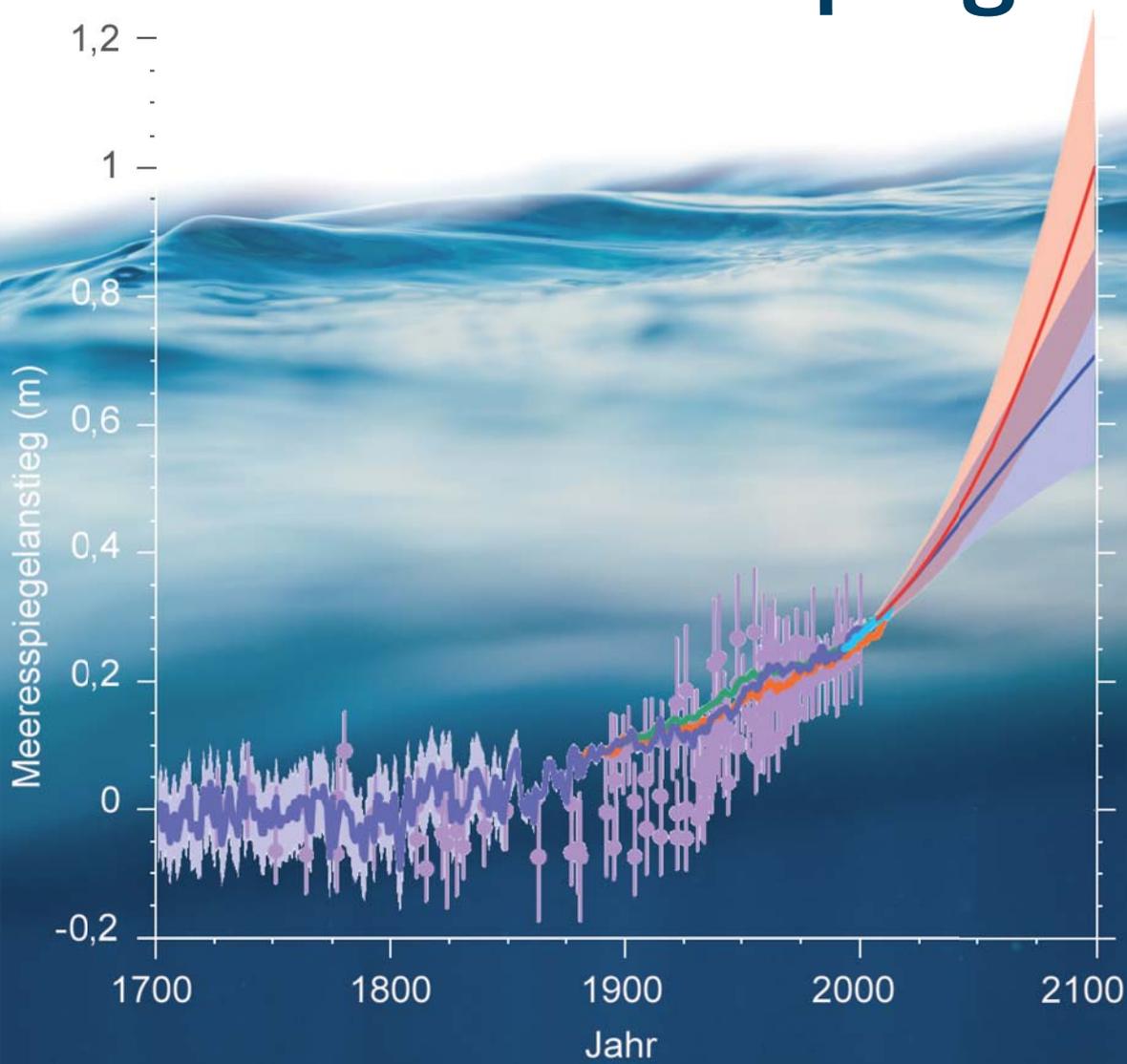


# Zukunft der **Meeresspiegel**



Fakten und Hintergründe aus der Forschung

### **Warum steht auf dem Titel Meeresspiegel im Plural?**

Der Meeresspiegel steigt über den ganzen Globus verteilt nicht gleichmäßig wie in einer Badewanne, sondern es zeigen sich regionale Unterschiede. Deshalb wird in der Wissenschaft häufig im Plural von Meeresspiegeln gesprochen.

Die beiden Wissenschaftsverbände Deutsches Klima-Konsortium (DKK) und Konsortium Deutsche Meeresforschung (KDM) geben mit dieser Broschüre einen verständlichen Überblick über den wissenschaftlichen Kenntnisstand zum Anstieg der Meeresspiegel. Forscherinnen und Forscher ordnen die manchmal verwirrenden Informationen ein, die in der Öffentlichkeit diskutiert werden. Die Broschüre bietet Orientierung in Bezug auf plausible Zukunftsszenarien, hilft, die Risiken besser einzuschätzen und beleuchtet die Situation an den deutschen Küsten.



# Inhalt

Vorwort	4
<b>1. Mensch und Meeresspiegel</b>	<b>5</b>
<b>2. Prozesse, die Meeresspiegel verändern</b>	<b>8</b>
2.1 Globaler Meeresspiegel	8
2.2 Regionaler Meeresspiegel	10
2.3 Lokaler Meeresspiegel	11
<b>3. Meeresspiegeländerungen in der jüngeren Erdgeschichte</b>	<b>13</b>
<b>4. Meeresspiegelanstieg in der Zukunft</b>	<b>15</b>
<b>5. Risiken und Handlungsmöglichkeiten</b>	<b>18</b>
5.1 Küstengesellschaften in Gefahr	18
5.2 Anpassung an die steigenden Meeresspiegel	19
<b>6. Auswirkungen auf die deutschen Küsten</b>	<b>22</b>
6.1 Nordsee	22
6.2 Ostsee	23
6.3 Küsten schützen	23
Zusammenfassung	25
<b>Glossar</b>	<b>26</b>
Verzeichnis der Abbildungen und Fotografien	27
Autorinnen und Autoren	28
Beteiligte Mitgliedseinrichtungen von DKK und KDM	29
Über uns	30
Impressum	31

## Vorwort



Temperaturrekorde, die jährlich weltweit neu aufgestellt werden, sind Anzeichen des durch den Menschen verursachten Klimawandels: Die Klimawissenschaft spricht von einer neuartigen „Heißzeit“. Im September 2019 hat der Weltklimarat einen Sonderbericht über das Ausmaß der Bedrohungen des Ozeans und der Kryosphäre verabschiedet. Von Veränderungen der Meeresspiegel sind Küstengebiete weltweit betroffen, Inselstaaten im Pazifik ebenso wie die Nord- und Ostseeküsten.

Die internationale Staatengemeinschaft hat mit dem 2015 verabschiedeten Pariser Übereinkommen vereinbart, den Anstieg der durchschnittlichen globalen Erdtemperatur möglichst unter 1,5 Grad Celsius zu halten und zwei Grad Celsius nicht zu überschreiten sowie zur Anpassung an den Klimawandel zusammenzuarbeiten. Sie hat auch das Bedürfnis eines Ausgleichs von klimawandelbedingten Schäden und Verlusten im Grundsatz anerkannt. Derzeit offenbaren sich jedoch mangelnde Ambition, unzureichende Maßnahmen und anhaltende Umsetzungsdefizite in der internationalen Klimapolitik.

Zur Beseitigung der Defizite wird immer öfter der Klageweg beschritten: Betroffene und Umweltverbände verlangen von ihren Staaten und der EU ambitioniertere Zielsetzungen und effektivere Maßnahmen. Das betrifft auch Klimawandelfolgeschäden: Ein peruanischer Landwirt etwa verklagt den Energieversorgungskonzern RWE vor deutschen Zivilgerichten, weil sein Grundstück durch Überflutung durch einen infolge der Gletscherschmelze wachsenden See bedroht ist. Eine weitere Lücke im internationalen Recht betrifft den Umgang mit Klimamigration, zum Beispiel von Einwohnerinnen und Einwohnern kleiner Inselstaaten, die aufgrund des Meeresspiegelanstiegs ihre Heimat verlieren werden. Letzteres Beispiel illustriert eindrucksvoll die Folgen des Meeresspiegelanstiegs und folglich die Relevanz der vorliegenden Publikation. Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen schlägt vor, Menschen, die durch den klimawandelbedingten Meeresspiegelanstieg ihre Heimat verloren haben, einen sogenannten Klimapass anzubieten. Damit könnten sie ein Aufenthaltsrecht in Staaten erhalten, die den Klimawandel maßgeblich mitverursachen.

Die durch die Folgen des Klimawandels erforderlichen Anpassungsmaßnahmen und individuellen Schäden und Verluste werden bislang politisch, rechtlich und gesellschaftlich – weltweit und vor allem in Europa – zu wenig diskutiert. Um die Folgen der globalen Erderwärmung für das Erdsystem, insbesondere für marine Ökosysteme zu ermitteln und zu bewerten, benötigen wir eine starke Klima- und Meeresforschung. Sie ist zugleich aufgefordert, ihre Erkenntnisse in die Diskussion darüber einzubringen, wie eine zeitnahe, wirksame und gerechte Klimapolitik zu gestalten ist. Diese Broschüre ist dazu ein wertvoller Beitrag.

Sabine Schlacke, Direktorin des Instituts für Umwelt- und Planungsrecht der Universität Münster und Ko-Vorsitzende des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU)

# 1. Mensch und Meeresspiegel

Etwa **680 Millionen Menschen** leben in der direkten Umgebung von Küsten oder auf kleinen Inseln. Ihr Leben und auch Überleben hängt unmittelbar von dem Niveau der zukünftigen Meeresspiegel ab. Diese konkrete **Bedrohung** ist eine Folge des Klimawandels und trifft vor allem niedrig liegende Küsten, Flussmündungen, Flussdeltas und kleine Inseln. Ein starker Anstieg des Meeresspiegels kann dazu führen, dass dessen Bürgerinnen und Bürger ihre Heimat verlieren. Aber auch andere Teile der weltweiten Küsten sind unmittelbar vom Meeresspiegelanstieg betroffen. Für die deutschen Nord- und Ostseeküsten sowie für die Städte in deren Einzugsgebiet wie Bremen und Hamburg besteht ein erhöhtes Risiko, da **Sturmfluten** in Zukunft öfter und höher auflaufen können.

Forscherinnen und Forscher in Deutschland beschäftigen sich intensiv mit den Veränderungen der Meeresspiegel und beobachten die Folgen genau. Dazu werden möglichst viele **Beobachtungsdaten**

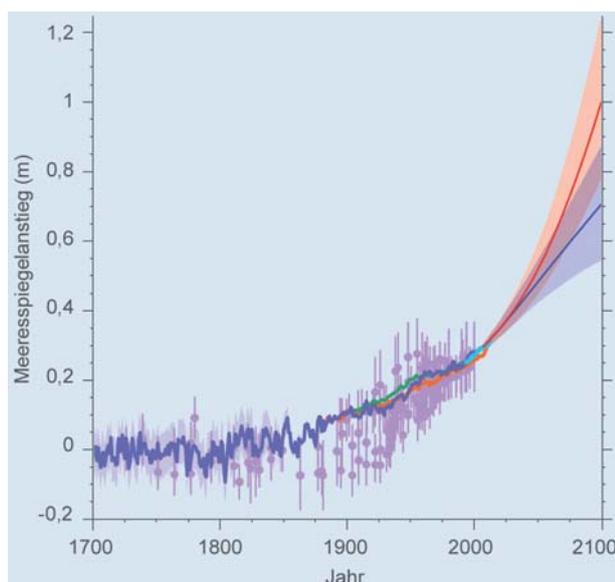


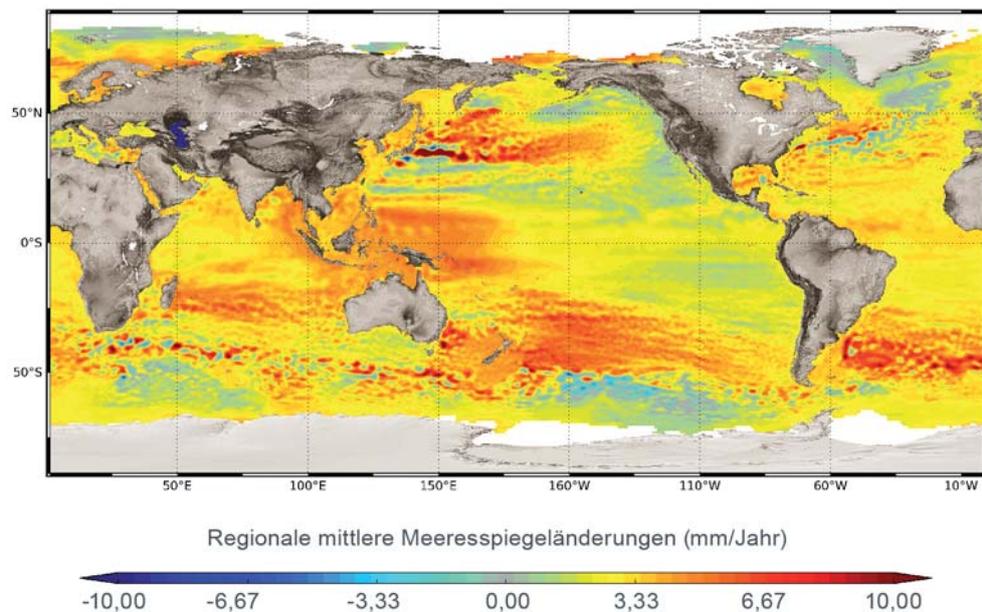
Abbildung 1: Der globale mittlere Meeresspiegel steigt. Die einzelnen Kurven zeigen Rekonstruktionen der Vergangenheit, Messdaten, Satellitendaten und Klimaprojektionen.

(SROCC) veröffentlicht. Die darin zitierten Studien belegen zwischen 1901 und 1990 einen Anstieg mit einer Rate von 1,4 Millimetern pro Jahr. Seit 1993 können die Meeresspiegel auf der ganzen Welt mithilfe von **Satelliten** noch umfassender und kontinuierlicher beobachtet werden. Demnach beträgt der **globale Trend im Zeitraum von 2006 bis 2015 rund 3,6 Millimeter Anstieg pro Jahr** und steigt damit 2,5-mal schneller. Insgesamt ist der gemittelte globale Meeresspiegel im 20. Jahrhundert bereits um etwa 15 Zentimeter angestiegen. Wollen wir mögliche Szenarien für die zukünftige Entwicklung des Meeresspiegelanstiegs erhalten, liefern Klimamodelle die Antwort. Deren Projektionen rechnen mit einem **immer schneller werdenden Anstieg** – besonders wenn der Ausstoß von Treibhausgasen nicht möglichst schnell und deutlich reduziert wird.

zu den Meeresspiegeln an **Messstationen** wie Gezeitenpegeln gesammelt. Zusätzlich werden die Meeresspiegel der jüngeren Erdgeschichte aus verschiedenen Indizien rekonstruiert. Die Beobachtungsdaten und die **Rekonstruktionen** belegen, dass der gemittelte globale Meeresspiegel seit Beginn des 20. Jahrhunderts steigt.

Der Weltklimarat, auch als Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) bekannt, trägt den aktuellen Stand der Klimaforschung zusammen und bewertet ihn anhand anerkannter Veröffentlichungen. Ende September 2019 hat er den Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima

Um solche Trends und Projektionen errechnen und beurteilen zu können, arbeitet die Wissenschaft mit einem Durchschnittswert, dem **globalen mittleren Meeresspiegelanstieg**. Jedoch steigen die Meeresspiegel nicht gleichmäßig wie in einer Badewanne. Satellitenbeobachtungen belegen, dass erhebliche **regionale Unterschiede** im Anstieg der Meeresspiegel existieren (Abbildung 2).

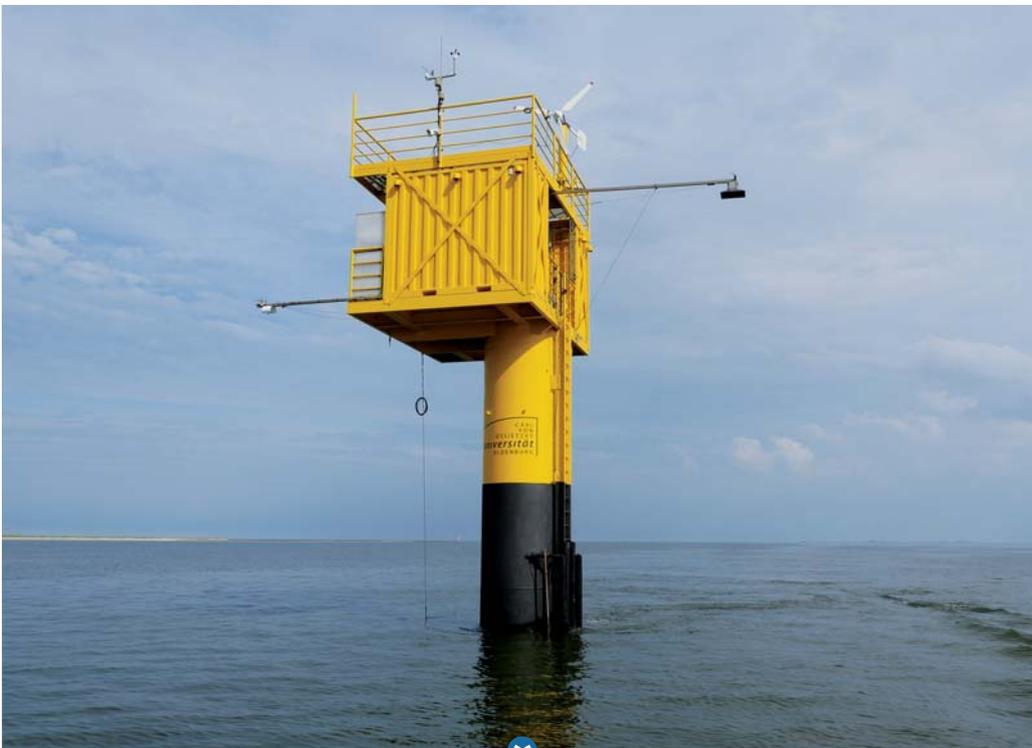


*Abbildung 2: Die Meeresspiegel steigen nicht gleichmäßig wie in einer Badewanne. Satellitenbeobachtungen von 1993 bis 2017 belegen, dass erhebliche regionale Unterschiede existieren – dies ist in der Abbildung anhand der unterschiedlichen Färbung der Ozeane erkennbar.*

Daher kommt es nicht nur auf die globale Entwicklung an, sondern auch auf die regionale Verteilung des Meeresspiegelanstiegs. Dies ist besonders relevant für die Beurteilung des Risikos vor Ort und damit ebenfalls für den Küstenschutz. Deshalb wird in der Wissenschaft häufig im Plural von Meeresspiegeln gesprochen, wie auch in dieser Broschüre. Forscherinnen und Forscher auf der ganzen Welt arbeiten in internationalen Forschungsverbänden wie dem Weltklimaforschungsprogramm (WCRP) daran, den Meeresspiegelanstieg kontinuierlich zu beobachten, die Prozesse dahinter immer genauer zu verstehen und die Klimaprojektionen zu verbessern. Die deutsche Meeres- und Klimaforschung ist daran intensiv beteiligt und wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. In Deutschland gibt es zu Klima- und Meeresspiegeländerungen eine umfassende Expertise. Die an dieser Broschüre mitwirkenden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler (S. 28) sowie deren Forschungseinrichtungen sind ein Teil davon. Sie geben auf den folgenden 18 Seiten einen verständlichen **Überblick über den wissenschaftlichen Kenntnisstand zum Meeresspiegelanstieg**. Ein Schwerpunkt liegt auf den Risiken in Deutschland.

Folgende Fragen stehen im Zentrum der einzelnen Kapitel:

- Welche Prozesse beeinflussen die Meeresspiegel auf globaler, regionaler und lokaler Ebene?
- Was lernen wir aus den Schwankungen der Meeresspiegel in der jüngeren Erdgeschichte?
- Wie wird sich der Meeresspiegelanstieg in Zukunft entwickeln?
- Welche Regionen sind besonders gefährdet? Wie können wir uns als Gesellschaft darauf vorbereiten?
- Wie stark betrifft der Anstieg der Meeresspiegel die deutschen Küsten, und welche Maßnahmen sind – etwa im Küstenschutz – zu treffen?



## In Kürze

Der Meeresspiegelanstieg wird an Messstationen und mithilfe von Satelliten beobachtet. Zusätzlich lassen sich Änderungen in der jüngeren Erdgeschichte aus verschiedenen Indizien rekonstruieren. Projektionen der zukünftigen Entwicklung werden mit Klimamodellen erstellt. Im 20. Jahrhundert ist der globale Meeresspiegel um etwa 15 Zentimeter gestiegen, die Anstiegsrate hat sich beschleunigt. Legt man den Zeitraum von 2006 bis 2015 zugrunde, steigt der Meeresspiegel aktuell rund 3,6 Millimeter pro Jahr.

## 2. Prozesse, die Meeresspiegel verändern

Um zu verstehen, was passiert, wenn sich die Meeresspiegel verändern, wirft dieses Kapitel einen Blick hinter die Kulissen des Ozeans. Es erklärt, welche Prozesse global, regional, aber auch ganz konkret an einem Küstenort den Meeresspiegel beeinflussen können (Abbildung 3).

### 2.1 Globaler Meeresspiegel

Der Anstieg des globalen Meeresspiegels ist eine der vielen gravierenden **Folgen des Klimawandels**. Aber wie kommt es überhaupt dazu, dass die Meere auf der ganzen Welt ansteigen? Eine der beiden wichtigsten Ursachen dafür ist, dass die **Ozeane** durch den menschengemachten Klimawandel **wärmer werden** und sich das Meerwasser dadurch ausdehnt. Dazu kommt, dass die weltweiten **Gletscher** und die großen **Eisschilde** in Grönland sowie in der Antarktis **schmelzen**. Beide Faktoren haben zum langfristigen Anstieg des globalen Meeresspiegels seit 1900 gleich viel beigetragen. In den vergangenen 20 Jahren nahm das Schmelzen von Gletschern und Eisflächen jedoch zu; das dokumentiert auch der IPCC-Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre deutlich. Im Vergleich zum Zeitraum von 1997 bis 2006 hat sich von 2007 bis 2016 der Massenverlust des Landeises in Grönland verdoppelt und in der Antarktis verdreifacht.

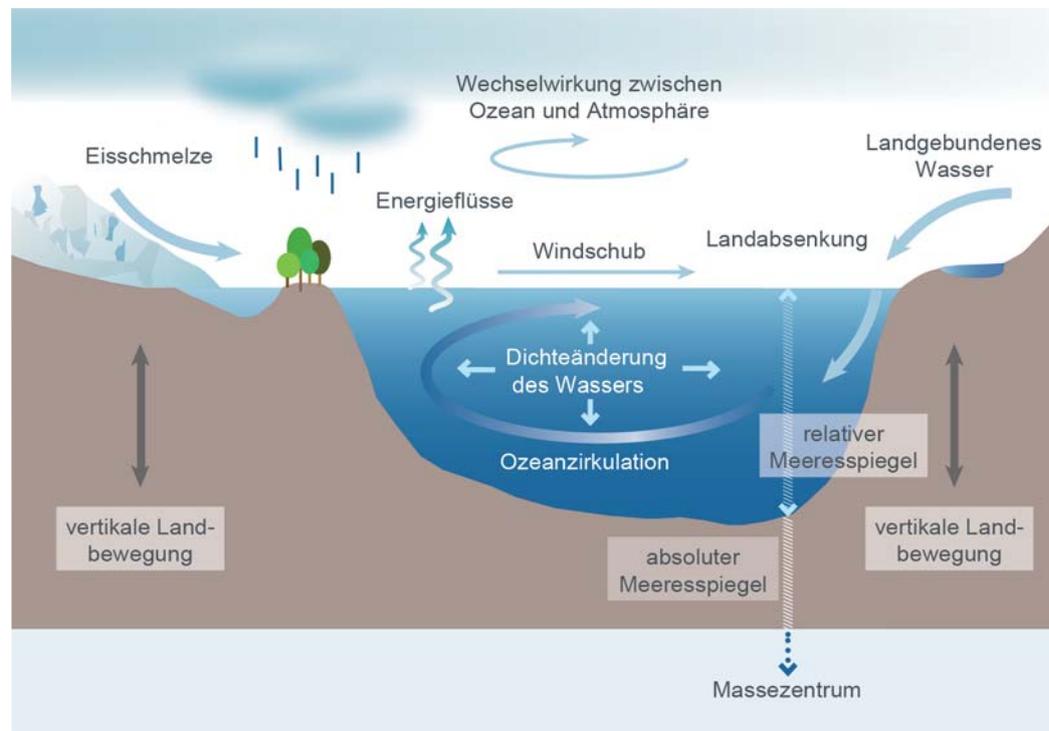


Abbildung 3: Viele unterschiedliche Prozesse führen dazu, dass sich die Meeresspiegel verändern.

Inzwischen ist der zunehmende Verlust von Landeis für rund 70 Prozent des globalen Meeresspiegelanstiegs verantwortlich und der Grund, warum sich dieser Anstieg beschleunigt hat. Die Beobachtungsdaten der Meeresspiegel von Satelliten und Vor-Ort-Messungen aus dem Zeitraum von 1993 bis 2016 (Abbildung 4) zeigen, dass der globale Meeresspiegel nicht kontinuierlich ansteigt, sondern durch **natürliche Schwankungen** auch kurzzeitig abnehmen kann. Zum Beispiel beeinflussen El-Niño- und La-Niña-Phänomene die Ozeanerwärmung, da sie im Abstand von drei bis sieben Jahren im Pazifik vor den Küsten von Peru und Ecuador zu einer anomalen Temperaturveränderung des Ozeans und damit oft zu Störungen der Wetterverhältnisse führen. Aber auch Vulkanausbrüche können eine kurzzeitige Abnahme der Luft- und Oberflächenwassertemperatur bewirken, was sich über ein paar Jahre hinweg auch auf die Meeresspiegel auswirkt.

Einen messbaren Beitrag zur globalen Meeresspiegeländerung gibt es auch, wenn sich die **Wasserspeicher an Land** ändern, etwa durch das Auffüllen von Stauseen oder als Folge massiver Grundwasserentnahme. Dabei kann dieser Beitrag über die Zeit sowohl negativ als auch positiv ausfallen.

**Der Gesamttrend ist** jedoch deutlich in Abbildung 4 erkennbar: Der globale mittlere Meeresspiegel ist in den abgebildeten 24 Jahren um rund 73 Millimeter gestiegen.

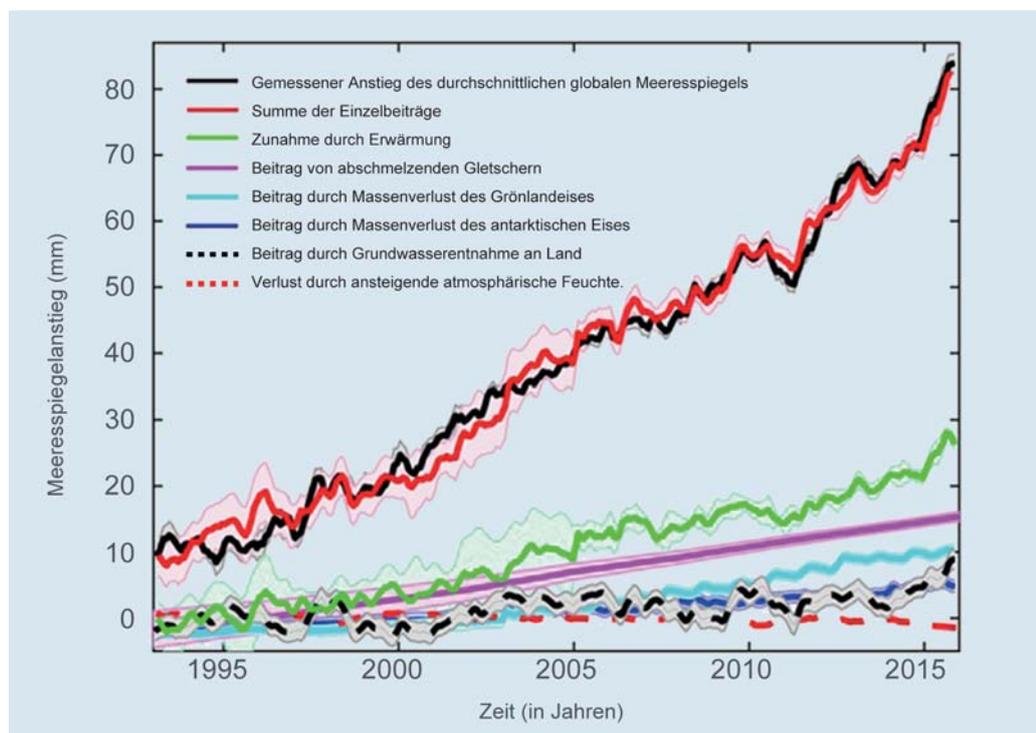


Abbildung 4: Der Anstieg des globalen Meeresspiegels ist deutlich messbar. Er setzt sich aus verschiedenen Beiträgen zusammen. Die mögliche Bandbreite des jeweiligen Beitrags ist schattiert.

## 2.2 Regionaler Meeresspiegel

Wie kommen aber regionale Unterschiede beim Meeresspiegelanstieg zustande, die sich nicht im globalen Mittel des Meeresspiegels abbilden? Wie verteilt sich der Anstieg über die Weltmeere? Bei diesen besonders für den Küstenschutz so wichtigen Fragen sind dynamische Mechanismen in den Ozeanen und in der festen Erde entscheidend.

Ein Beispiel sind die vielfältigen **Strömungen**, die unsere Ozeane durchziehen und so Wasser mit unterschiedlicher Temperatur und unterschiedlichem Salzgehalt über den ganzen Globus verteilen. Ändern sich durch den Klimawandel die Wassertemperatur, der Salzgehalt der Meere und die Strömungssysteme, **ändert sich auch die regionale Verteilung des Wassers**. Dies lässt sich gut beobachten (siehe Kapitel 1, Abbildung 2): Für einige Küstenlinien und Inselregionen steigt der Meeresspiegel derzeit circa viermal so stark wie der globale Mittelwert, das ist zum Beispiel im östlichen tropischen Pazifik der Fall. An anderen Küstenlinien sinkt er dagegen. Diese regionalen Trends könnten sich in Zukunft auch umkehren.

Aber auch der Verlust von Eismasse an Land, wie etwa in Grönland, verändert den Meeresspiegel durch das zusätzliche Wasser nicht nur global, sondern ebenfalls regional. Durch das Schrumpfen des Eisschildes **hebt sich der Meeresboden** in der Umgebung des schwindenden Eisschildes, und die **Massenanziehungskraft** des Eises auf das Wasser lässt nach, sodass der Meeresspiegel an der benachbarten Küste ohne Zeitverzögerung paradoxerweise fällt, während er mehr als 1000 Kilometer entfernt dafür umso deutlicher ansteigt (Abbildung 5).

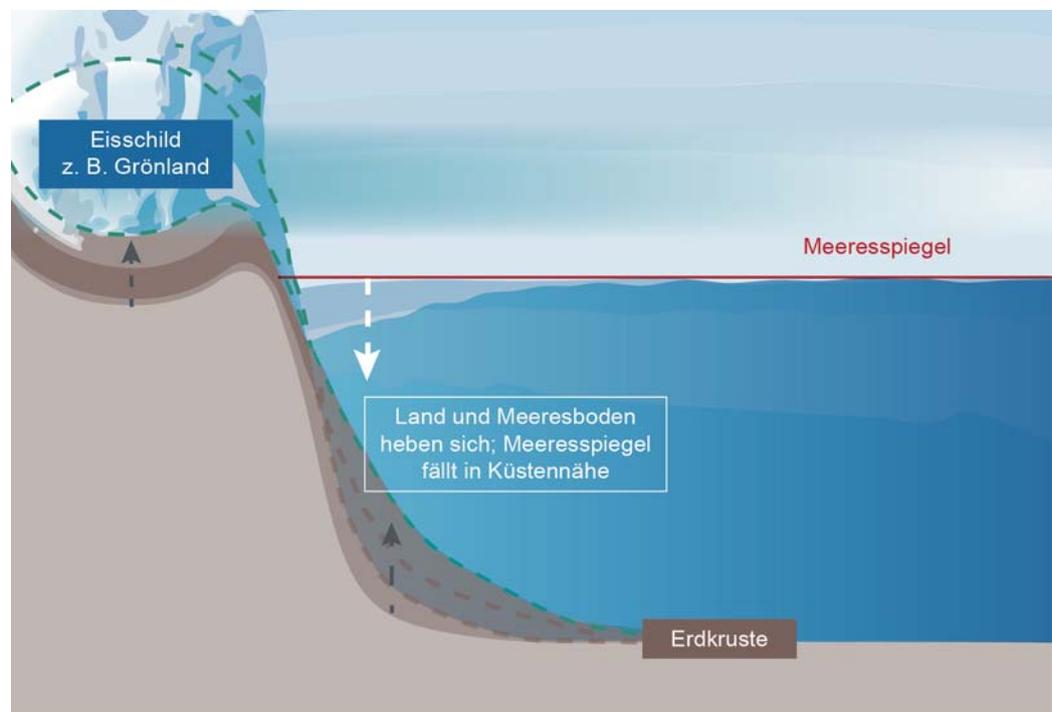


Abbildung 5: Der Verlust von Eismasse an Land verändert den Meeresspiegel durch das zusätzliche Wasser nicht nur global, sondern auch regional.

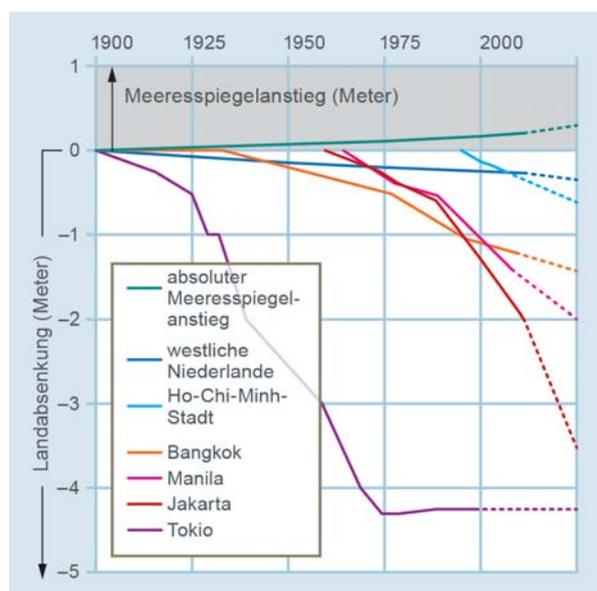
Für die **deutschen Küsten** ergibt sich, dass für den Meeresspiegelanstieg die Veränderungen der Eisschilde in der Antarktis, der Gletschersysteme des Himalajas und der Südhalbkugel der Erde eine wesentlich wichtigere Rolle spielen werden als die in Grönland.

Insgesamt weicht die absolute Meeresspiegeländerung an der deutschen Nordseeküste nicht weit vom globalen Mittel ab. Hinzu kommt aber lokal noch das Absinken des Meeresbodens und der Küstenbereiche um einen Millimeter pro Jahr. Dabei handelt es sich zum Teil um eine Nachwirkung der letzten Eiszeit: Da die Eisschilde in Skandinavien abgeschmolzen sind, hebt sich dort – von der Last befreit – das Land, Norddeutschland dagegen senkt sich wie bei einer Wippe.

Darüber hinaus können in manchen geografischen Regionen **tektonisch bedingte Effekte** und Seebeben regional zu Landhebungen oder -senkungen und damit zu relativen Veränderungen des Meeresspiegels führen.

### 2.3 Lokaler Meeresspiegel

Welcher Anstieg des Meeresspiegels sich ganz **konkret vor Ort** ergibt, hat viel mit dem politischen und gesellschaftlichen Handeln zu tun. Zum klimawandelbedingten Meeresspiegelanstieg kann zum Beispiel durch die verstärkte **Entnahme von Grundwasser**, etwa zur Trinkwasserversorgung oder Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen in Küstenregionen, ein Absinken des Küstenlandes hinzukommen, da sich die grundwasserführenden Schichten verdichten und nach unten sinken. Dies ist ein lokal sehr wichtiger und verhältnismäßig schnell ablaufender Mechanismus, der



durch Dämme und Küstenbauwerke verstärkt wird. In ähnlicher Weise kann die **Entnahme und Förderung von Öl und Erdgas** relevante Folgen haben und – abhängig von der Entfernung zur Küste – Landsenkungen der Küstenlinie bewirken.

All diese oder vergleichbare menschliche Eingriffe in die Umwelt beeinflussen den relativen Meeresspiegel direkt vor Ort.

Abbildung 6: Viele Megastädte, besonders in Asien, sind zusätzlich durch Landabsenkungen gefährdet – zum Beispiel Jakarta, Ho-Chi-Minh-Stadt und Bangkok.

Das damit verbundene **Absinken der Küste** führt zu einem Anstieg des Meeresspiegels an der Küstenlinie in der Größenordnung von einem bis zu mehreren Zentimetern pro Jahr. Für einzelne Städte können diese Eingriffe also noch relevanter und schneller als der kontinuierlich, aber langsam zunehmende Anstieg der Meeresspiegel durch den Klimawandel sein.

Viele Megastädte, besonders in Asien, sind gefährdet – zum Beispiel Jakarta, Ho-Chi-Minh-Stadt und Bangkok (Abbildung 6). Tokio ist nach Jahrzehnten der Grundwasserentnahme vier Meter abgesunken. Erst als diese beendet wurde, konnte das Absinken in den 1970er-Jahren gestoppt werden. Indonesien hingegen will die Hauptstadt von Jakarta nach Borneo verlegen, unter anderem, da die Stadt zu versinken droht.



## In Kürze

Der globale Anstieg des mittleren Meeresspiegels ist eine Folge des Klimawandels. Das Wasser dehnt sich mit zunehmender Temperatur aus, die schmelzenden Gletscher und Eisschilde fügen dem Ozean Wasser hinzu. Jedoch gibt es auch regional Unterschiede. Diese kommen etwa durch die vielfältigen Strömungen in Ozean und Atmosphäre sowie Landhebungen oder -senkungen zustande. Lokal spielt auch das Absinken des Meeresbodens durch die Entnahme von Grundwasser und die Förderung von Öl und Gas eine wichtige Rolle.

### 3. Meeresspiegeländerungen in der jüngeren Erdgeschichte

Natürliche Schwankungen des globalen mittleren Meeresspiegels im Laufe der Erdgeschichte erlauben Aussagen darüber, wie hoch und wie schnell die Meeresspiegel zukünftig steigen könnten. Dazu werden die Schwankungen des globalen Meeresspiegels in bestimmten Perioden der Erdgeschichte rekonstruiert, indem Forscherinnen und Forscher geologische, biologische oder archäologische Indikatoren wie etwa fossile Korallenriffe untersuchen, die einst im Zusammenhang mit dem Meeresspiegel abgelagert oder aufgebaut wurden – sogenannte Paläo-Indikatoren.

Während des **mittleren Pliozäns** vor circa drei Millionen Jahren war die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre ähnlich hoch wie heute und die mittlere Temperatur der Erde rund zwei bis drei Grad Celsius höher. Grönland war zu dieser Zeit weitgehend eisfrei, das Schelfeis in der Westantarktis deutlich kleiner, und sogar in der Ostantarktis war weniger Eis vorhanden. Als Folge lag der **mittlere Meeresspiegel mindestens sechs Meter höher** – und das in einem nur etwas wärmeren Klima als heute (Abbildung 7).



Abbildung 7: Der globale Meeresspiegel lag in wärmeren Perioden der Erdgeschichte höher als heute. Die globalen Änderungen werden aus lokalen geologischen Indikatoren rekonstruiert, etwa aus fossilen Korallenriffen, die heute einige Meter über dem Meeresspiegel gefunden werden.

Auch während der **letzten Zwischeneiszeit** vor ungefähr 125.000 Jahren waren die Eisschilde in Grönland und der Westantarktis kleiner als heute. Dies ist die letzte vergleichbare Periode der Erdgeschichte – die mittlere Temperatur der Erde war wie heute etwa ein Grad Celsius wärmer als in der vorindustriellen Zeit. Der globale mittlere Meeresspiegel lag zu dieser Zeit **sechs bis neun Meter höher als heute**. Die geologischen Aufzeichnungen vergangener Meeresspiegelstände belegen demnach, dass in einem wenige Grad Celsius wärmeren Klima der mittlere Meeresspiegel einige Meter höher liegen kann.

Dabei ist nicht nur die Höhe des Meeresspiegelanstiegs ausschlaggebend, sondern auch, wie schnell sich diese verändert. Vergleichen wir die heutige **Anstiegsgeschwindigkeit des Meeresspiegels** von mehr als drei Millimetern pro Jahr mit Daten aus der Vergangenheit, so belegen geologische Archive, dass es die schnellste Anstiegsrate der vergangenen 3000 Jahre ist. Zusätzlich gibt es einige Hinweise darauf, dass während des warmen Klimas der letzten Zwischeneiszeit kurzfristige Meeresspiegelschwankungen auftraten. Damit gingen Veränderungsraten des globalen Meeresspiegelanstiegs einher, die **schneller sind als heute** und möglicherweise sieben Millimeter pro Jahr erreichten. Die maximalen Raten, die beim Abschmelzen von Eisschilden auftreten, können sogar bis zu zehnmal schneller sein als heute.



## In Kürze

Während der letzten Zwischeneiszeit vor ungefähr 125.000 Jahren herrschten ähnliche klimatische Bedingungen wie heute, vor circa drei Millionen Jahren war es etwas wärmer. Der globale mittlere Meeresspiegel lag damals jedoch mehrere Meter höher.

## 4. Meeresspiegelanstieg in der Zukunft

Wie sich der Anstieg der Meeresspiegel in Zukunft entwickeln wird, ist eine Frage, die stark von den zukünftigen Treibhausgasemissionen und dem damit verbundenen Temperaturanstieg abhängt. Die internationale Wissenschaftscommunity beschäftigt sich intensiv damit und arbeitet daran, die Projektionen der Klimamodelle immer weiter zu verbessern. Der IPCC-Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre zeigt, dass sich der Anstieg der Meeresspiegel schon deutlich beschleunigt hat und sich ohne Emissionssenkungen auch noch weiter beschleunigen wird.

Der mittlere Meeresspiegel ist im 20. Jahrhundert bereits um etwa 15 Zentimeter angestiegen und würde **bis 2100 um zusätzliche 30 bis 60 Zentimeter ansteigen**, wenn die Erwärmung dem Paris-Szenario entsprechend auf deutlich unter zwei Grad Celsius begrenzt werden könnte. Wenn die Emissionen jedoch weiter wie bisher zunehmen, muss mit **60 bis 110 Zentimetern** Anstieg gerechnet werden. Ermittelt man für beide Szenarien den Mittelwert müssen wir mit einem globalen Anstieg von rund 43 bis 84 Zentimetern rechnen.

Die Projektion für das „Weiter so“-Szenario liegt zehn Zentimeter höher als noch im Fünften Sachstandsbericht des Weltklimarats von 2014. Das liegt daran, dass sich das Tempo, mit dem das Eis von Grönland abschmilzt, in den vergangenen zehn Jahren verdreifacht und sich die Schmelzrate der Antarktis verdoppelt hat. Wichtig zu wissen ist außerdem, dass die Meeresspiegel noch lange weiter steigen werden, auch über das Ende des Jahrhunderts hinaus. Der IPCC-Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre nennt einen möglichen maximalen Anstieg um bis zu **5,40 Meter bis zum Jahr 2300** für ein „Weiter so“-Szenario.

Drei wesentliche Fakten zur zukünftigen Entwicklung:

1. Das Klima der Zukunft wird entscheidend davon abhängen, wie viele **Treibhausgase** die Menschheit noch ausstoßen wird. Weil dies nicht vorhersehbar ist, spricht man in der Wissenschaft nicht von Vorhersagen, sondern von Projektionen, wenn es um die Berechnung der zukünftigen Entwicklung über längere Zeiträume geht. Es handelt sich um „Wenn-dann-Rechnungen“.
2. Es wird weiterhin **regionale Unterschiede im Anstieg der Meeresspiegel** geben, die sich mit der Zeit ändern können – wie es auch in den vergangenen Jahrzehnten der Fall war. Diese regionalen Unterschiede können genauso viel Einfluss auf den Meeresspiegel vor Ort haben wie der durchschnittliche globale Anstieg.
3. Unser **heutiges Handeln beeinflusst die Meeresspiegel bis in die nächsten Jahrhunderte**. Sie werden selbst nach Stopp der Treibhausgasemissionen für mehrere Jahrhunderte weiter steigen. Das liegt an der Trägheit des Klimasystems. Die Meeresspiegel pendeln sich nur langsam über lange Zeiträume ein.

Wie stark und wie schnell die Meeresspiegel steigen werden, hängt vor allem von den Änderungen der **kontinentalen Eisschilde in Grönland und der Antarktis ab** – sie sind ein noch nicht sehr gut in Klimamodellen repräsentierter, aber sehr einflussreicher Faktor. So wird daran gearbeitet, die komplizierten dynamischen Prozesse innerhalb der Eisschilde wie auch ihre Wechselwirkung mit den Ozeanen besser zu verstehen und in den Klimamodellen zu berücksichtigen – was sowohl für globale als auch für regionale Projektionen von großer Bedeutung ist. Sollte eine bestimmte globale Erwärmung überschritten werden, deren Wert heute allerdings noch nicht genau bestimmt werden kann, besteht das Risiko, dass die Eisschilde über die Jahrtausende komplett abschmelzen, selbst wenn die Menschen keine Treibhausgase mehr ausstoßen. Dann wäre ein sogenannter irreversibler Kipp-Punkt des Klimas überschritten. Dabei würde die Eismasse von Grönland die Meeresspiegel im globalen Mittel um etwa **sieben Meter** steigen lassen. Das Abschmelzen der Eismasse der **Antarktis** hat sogar das Potenzial, den globalen Meeresspiegel um etwa **60 Meter** zu erhöhen.

Dies zu verhindern war für die Weltgemeinschaft einer der Gründe, sich im **Pariser Klimaabkommen** darauf zu verständigen, die Erderwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Wert zu begrenzen und alle Anstrengungen zu unternehmen, die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu limitieren. Die Dringlichkeit für konsequentes Handeln wird deutlich, wenn wir uns vor Augen führen, dass die globale Erwärmung bereits ein Grad Celsius beträgt.

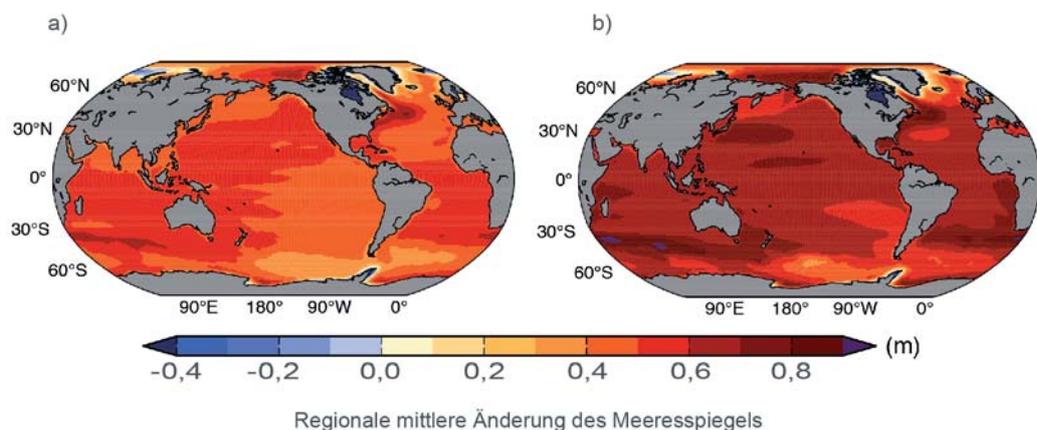


Abbildung 8: Die Meeresspiegel steigen, das zeigen Projektionen bis Ende des Jahrhunderts. Das tatsächliche Ausmaß hängt davon ab, wie viele Treibhausgase die Menschheit noch ausstoßen wird. Die beiden Weltkarten zeigen zwei Möglichkeiten: a) das Paris-Szenario und das b) „Weiter so“-Szenario – sowie die regionalen Abweichungen.

Wenn wir uns an die Folgen des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs anpassen wollen, spielen **regionale Abweichungen vom globalen Mittel** (Abbildung 8) eine wichtige Rolle. Die Forschung zu dieser Frage zeigt, dass die größten Anstiege von mehr als zwei Metern in den niedrigen Breiten und in Teilen der mittleren Breiten zu erwarten sind. Davon betroffen wären zum Beispiel der Inselstaat Mikronesien im westlichen Pazifik, aber auch US-amerikanische Metropolen wie Miami oder New York. Weiterhin ist in den globalen Projektionen die Absenkung der Landflächen durch exzessive Grundwasserentnahme nicht berücksichtigt, wie es in vielen asiatischen Megastädten der Fall ist. Diese ist – wie in Kapitel 2.3 erläutert – ein wichtiger zusätzlicher Aspekt für die Gefährdung der Küstengesellschaften und die Entwicklung von Anpassungsoptionen.

Das größte Risiko für die Menschen an der Küste stellt jedoch nicht der Meeresspiegelanstieg allein dar, sondern seine verstärkende Wirkung bei Extremwettern. Einzelne Sturmfluten können in Wechselwirkung mit dem Meeresspiegelanstieg katastrophale Folgen haben. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass unabhängig von meteorologischen Einflüssen die Sturmflutwasserstände stärker ansteigen werden als der mittlere Meeresspiegel selbst. Der IPCC-Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre weist außerdem darauf hin, dass Extremwasserstände bis 2050 an vielen Orten häufiger auftreten werden. Zusätzlich wird aufgrund des Meeresspiegelanstiegs bei Sturmfluten auch die Belastung der Küsten und Küstenschutzbauwerke erhöht. Seegang und Wellen nagen an den Küsten, die Erosion nimmt zu. Die Risiken und Bedrohungen für die Menschen an der Küste erhöhen sich also auf ganz unterschiedlichen Ebenen, der Druck auf die Küsten steigt.



## In Kürze

Das Klima der Zukunft und damit auch der Anstieg der Meeresspiegel hängt entscheidend davon ab, wie viele Treibhausgase die Menschheit noch ausstoßen wird – und wie sich dadurch die Eisschilde in Grönland und der Antarktis entwickeln. Laut aktuellen Projektionen müssen wir mit einem globalen mittleren Anstieg von 43 bis 84 Zentimetern bis zum Ende dieses Jahrhunderts rechnen. Wichtig zu wissen ist, dass die Meeresspiegel selbst nach dem Stopp der Emissionen für mehrere Jahrhunderte weiter steigen werden, was an der Trägheit des Klimasystems liegt. Unser heutiges Handeln hat also noch weit in der Zukunft Folgen.

## 5. Risiken und Handlungsmöglichkeiten

Die Hälfte aller Menschen lebt in Städten, die weniger als 100 Kilometer von der Küste entfernt sind. Die Großstädte am Meer wachsen, der Küstenraum wird intensiv genutzt – deshalb ist der Meeresspiegelanstieg für uns als Gesellschaft eine bedrohliche Folge des Klimawandels. Wie können wir uns verhalten und angemessen vorsorgen? Inwieweit können wir die Risiken erfassen und uns daran anpassen? Und welche Regionen sind besonders gefährdet? Diesen Fragen widmet sich das folgende Kapitel.

### 5.1 Küstengesellschaften in Gefahr

Küstenzonen sind im Vergleich zum angrenzenden Hinterland oft durch eine hohe **Besiedlungsdichte**, ein starkes **Bevölkerungswachstum** und eine fortschreitende Verstädterung geprägt. Die Anzahl der Weltbevölkerung in Städten, die weniger als 100 Kilometer von der Küste entfernt sind, hat sich in den vergangenen 70 Jahren nahezu verfünffacht, und Regionen im globalen Süden weisen in den vergangenen zehn Jahren die größten Verstädterungsraten im Küstenraum auf. Das belegen Studien, die die geografische Lage von Städten mit mehr als 100.000 Einwohnerinnen und Einwohnern im Zeitraum von 1945 bis 2012 analysiert haben. Diese Zahlen zeigen, für wie viele Menschen die steigenden Meeresspiegel und ihre Folgen ein großes Risiko darstellen. Auf der nachstehenden Weltkarte (Abbildung 9) sind besonders gefährdete Küstengebiete, kleine Inselstaaten, Flussdeltas und Megastädte an der Küste eingezeichnet:

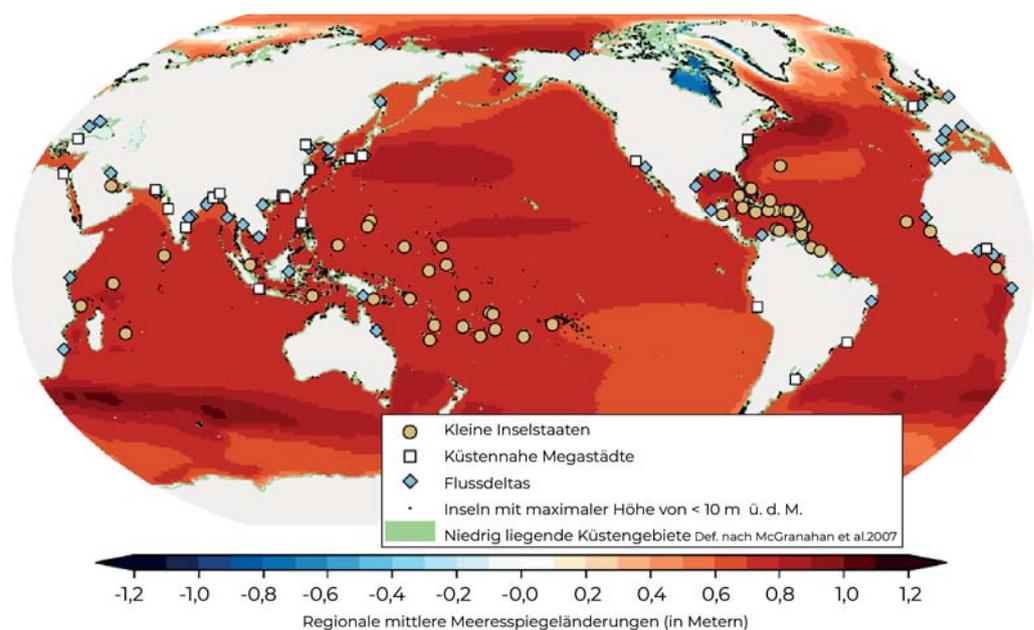


Abbildung 9: Niedrig liegende Küstengebiete, kleine Inselstaaten, aber auch küstennahe Megastädte sind vom Anstieg des Meeresspiegels besonders bedroht. Die Hälfte aller Menschen lebt in Städten, die weniger als 100 Kilometer von der Küste entfernt sind. Die Großstädte am Meer wachsen, der Küstenraum wird intensiv genutzt – deshalb ist der Meeresspiegelanstieg für die Weltgemeinschaft eine so bedrohliche Folge des Klimawandels.

Besonders bedroht sind Städte und Siedlungen in Küstenniederungen, die von einer **sehr schweren Sturmflut** potenziell überflutet werden können und auf diese Gefährdung nicht vorbereitet sind. Ein steigender Meeresspiegel verschärft noch einmal dieses Risiko und führt unweigerlich zu zunehmenden Verlusten und Schäden infolge zukünftiger Überflutungen. Um einschätzen zu können, in welchen Regionen diese verschärften Risiken zu erwarten sind, werden in aktuellen Studien Szenarien des Meeresspiegelanstiegs in Kombinationen mit den Szenarien für Sturmfluten betrachtet. Diese zeigen, dass bis 2030 die Zahl der Menschen in **Asien**, die davon betroffen sein könnten, am höchsten ist. Ab 2060 ist aufgrund des Bevölkerungswachstums und der Verstädterung des Küstenraums in Afrika, insbesondere in Ägypten und in den Ländern südlich der Sahara, in West- und Ostafrika, die stärkste Gefährdungslage zu erwarten.

Jedoch erhöht sich mit dem Meeresspiegelanstieg nicht nur die Gefahr zunehmender Überflutungen, sondern es entstehen weitere Risiken für Küstengesellschaften. Ein Problem ist die zunehmende Küstenerosion, die durch eine stärkere Welleneinwirkung und höhere Wasserstände im Flachwasserbereich der Küsten entsteht. Zusätzlich dringt das Salzwasser in das Grundwasser ein, Süßwasserressourcen und Böden versalzen – dadurch wird das Trinkwasser ungenießbar und eine landwirtschaftliche Bewässerung unter Umständen unmöglich.

## 5.2 Anpassung an die steigenden Meeresspiegel

Um sich auf die zunehmende Belastung der Küsten vorzubereiten, braucht es in Zukunft Anpassungsmaßnahmen – immer in Ergänzung zu einer ambitionierten Klimaschutzpolitik, die den Ausstoß von Treibhausgasen verringert. Ein Anstieg der Meeresspiegel an den Küsten verstärkt Extremwasserstände infolge von Stürmen, und dies kann zu größeren Überschwemmungen und Zerstörungen führen. Dem sollte mit neuen Formen übergreifender Analyse und Planung in einem integrierten Risikomanagement begegnet werden. Das heißt, Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft müssen intensiv und ortsspezifisch zusammenarbeiten.

Aber welche Möglichkeiten gibt es überhaupt? Grundsätzlich werden als Anpassung Initiativen und Maßnahmen bezeichnet, die die Folgen des Klimawandels für die Gesellschaft verringern. Dies wird notwendig, weil der Mensch einerseits von der Nutzung dieses Kultur- und Wirtschaftsraums als Lebensgrundlage abhängig ist und andererseits, um sich vor dem Eindringen des Meeres in seinen Lebensraum zu schützen.

Vier generelle Strategien der Küstenanpassung lassen sich voneinander unterscheiden:

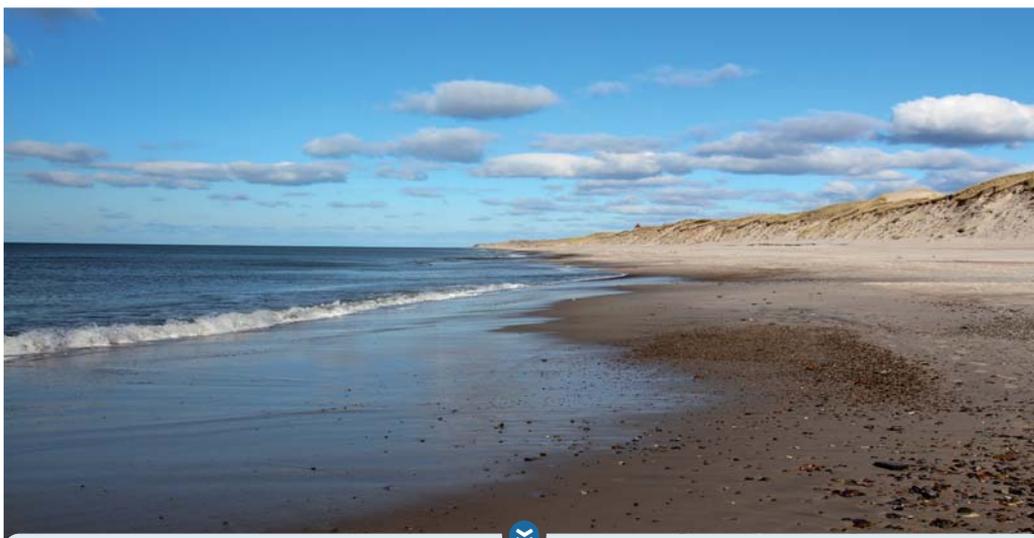
- **Verteidigung**  
Schutz mit Deichen, Sperrwerken, Deckwerken oder Dünen
- **Anpassung**  
Nutzungsformen und Bauwerke, die auf Risiken vorbereitet sind
- **Vordringen**  
Landgewinnung, Neueindeichungen und Sandaufspülungen
- **Rückzug**  
Aufgeben und Verlassen gefährdeter Küstenniederungen

Werden heute etwa neue Infrastrukturen gebaut und nach modernem ingenieurtechnischen Stand mit robusten **Schutzsystemen** ausgestattet, sind diese an die Folgen des Meeresspiegelanstiegs angepasst. Klassische Schutzmaßnahmen beziehen zunehmend die **Leistungen der Natur** mit ein: Sandaufspülungen, künstliche Riffe und natürliche Salz- oder Seegraswiesen sind eine wichtige Ergänzung zu Deichen, Sperrwerken und Deckwerken. Neben den Küstenschutzinfrastrukturen kommt auch der Erhaltung des natürlichen Küstenraums eine wichtige Bedeutung zu. Daher sollte der **Schutz von Habitaten** berücksichtigt werden. Denn nur so kann die Natur ihre vielen wichtigen Funktionen für uns Menschen erfüllen – wie etwa Salzwiesen im Vorland, die den einlaufenden Wellen Energie entziehen oder Korallenriffe vor der Küste, die als natürliche Wellenbrecher dienen. Jedoch können nicht alle Küstenregionen vor den steigenden Meeresspiegeln geschützt werden oder sich ausreichend anpassen. Manche Regionen werden künftig unbewohnbar sein, und daher müssen auch **Umsiedlungen** in Betracht gezogen werden. In Alaska beispielsweise stimmte das komplette Dorf Shishmaref für eine Umsiedlung auf das Festland, und auch im Staat Fidschi und auf den Malediven sind Umsiedlungen eine mögliche Option der nationalen Anpassungsstrategie.



Anpassung ist allerdings kein rein technisches Problem, sondern auch eine **gesellschaftliche Herausforderung**. Sie erfordert Wahrnehmungs- und Verhaltensänderungen. Außerdem sind weitreichende betriebswirtschaftliche, politische und planerische Entscheidungen notwendig, die sich dynamisch weiterentwickeln. Daher stellt sich immer auch die Frage, was die Anpassung konkret für die Menschen vor Ort bedeutet und ob sie überhaupt bereit sind, diese Veränderungen mitzutragen. Denn nur wenn in einer Gesellschaft Erfahrungen mit Katastrophen gemacht wurden oder ein Risikobewusstsein für Gefahren des Meeresspiegelanstiegs besteht, können die notwendigen Maßnahmen umgesetzt werden.

Nicht zuletzt besteht auch die Gefahr einer **Fehlanpassung**. Dies ist der Fall, wenn die gewählten Schutzstrategien zwar gut gemeint, der eigentlichen Problemstellung aber nur bedingt entsprechen oder unzureichend umgesetzt sind. Umstände und Interessen unterscheiden sich von Ort zu Ort und können nicht zwangsläufig übertragen werden. Es sind insbesondere die räumlichen und zeitlichen Besonderheiten, die eine Anpassungsmaßnahme lokal passend und an einem anderen Ort eher unangemessen wirken lassen. So schädigt der Bau von Strandmauern und Wellenbrechern nicht nur wertvolle Ökosysteme, sondern kann zusätzlich Erosionsprozesse in der Umgebung vorantreiben und die Bedrohungslage verstärken.



## In Kürze

Sturmfluten, die den dicht besiedelten und intensiv genutzten Küstenraum bedrohen, werden in Zukunft in Wechselwirkung mit dem Meeresspiegelanstieg stärker. Um sich auf die zunehmende Belastung vorzubereiten, braucht es Anpassungsmaßnahmen in technischer wie auch in gesellschaftlicher Dimension. Für eine zukünftige integrierte Küstenschutzstrategie im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung sind die Wechselwirkungen von Gesellschaft, Ökosystemen, Ingenieurwesen und Politik gleichzeitig und gleichberechtigt zu berücksichtigen, um Fehlanpassungen an den Meeresspiegelanstieg zu vermeiden.

## 6. Auswirkungen auf die deutschen Küsten

Wie stark betrifft der Anstieg der Meeresspiegel die Menschen an den deutschen Küsten? Um diese Frage zu beantworten, wirft dieses Kapitel einen Blick auf die Nord- und Ostsee, erklärt, warum das Wattenmeer vom Meeresspiegelanstieg bedroht ist und wie die Küsten geschützt werden können.

### 6.1 Nordsee

Als flaches Randmeer des Nordatlantiks ist auch die Nordsee mit ihren Watten vom Meeresspiegelanstieg betroffen. Der globale Trend überlagert sich dabei mit regionalen Besonderheiten, wie dies in Kapitel 2.2 erläutert wurde: Auswertungen des Meeresspiegels an Pegelstationen in der Nordsee über weit mehr als hundert Jahre weisen jährliche bis dekadische Schwankungen auf, die aus langjährigen Trends der Wetter- und Windsysteme entstehen. Die Nordseeküsten sind nacheiszeitlichen Landhebungen in den nördlichen Breiten und Absenkungen von circa einem Millimeter pro Jahr in den südlichen Breiten ausgesetzt. Werden alle vertikalen Landbewegungen berücksichtigt, zeigen sich höhere Raten des relativen Meeresspiegelanstiegs entlang der **Küste Schleswig-Holsteins** und niedrigere entlang der **Küste Niedersachsens**.

Wird die langfristige Entwicklung des absoluten Meeresspiegels betrachtet, liegt diese für die gesamte Nordsee in einer Größenordnung des globalen **Langzeittrends von rund 1,7 Millimetern pro Jahr im Zeitraum von 1900 und 2015**. Mit Beginn der Satellitenbeobachtungen wird für den Zeitraum zwischen 1992 und 2015 wiederum ein deutlich größerer Anstieg von bis zu vier Millimetern pro Jahr nachgewiesen, der damit etwas höher als der globale Mittelwert liegt.

Auch die unterschiedlichen Projektionen des absoluten Meeresspiegelanstiegs in der Nordsee weichen am **Ende des 21. Jahrhunderts** nur unwesentlich vom globalen Mittel ab. Laut IPCC-Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre müssen sich die Bewohnerinnen und Bewohner von Küstenregionen genauso wie Politik und Behörden also auf einen Anstieg im Bereich von 30 bis 60 Zentimetern für das Paris-Szenario und von 60 bis 110 Zentimetern für das „Weiter so“-Szenario einstellen.

Es verändert sich jedoch ebenfalls die **Höhe der Gezeiten**. Dies wird durch unterschiedliche Faktoren ausgelöst, zum Beispiel durch den Ausbau der Tideästuare, also der Elbe bis Hamburg, der Weser bis Bremen oder der Unterems bis Papenburg. Aber auch der Meeresspiegelanstieg ist ein verstärkender Faktor. Während das relative Tidehochwasser zugenommen hat, zeigt das relative Tideniedrigwasser nur geringe Veränderungen. Insgesamt hat sich **der mittlere Tidenhub an der deutschen Nordseeküste damit von 1950 bis 2015 um bis zu zehn Prozent erhöht**. Auch hier zeigt sich eine unterschiedliche Entwicklung an den deutschen Nordseeküsten. Der Tidehub hat sich in dieser Zeit an den Küsten Schleswig-Holsteins um etwa zehn Prozent erhöht und an der Küste Niedersachsens lediglich um vier Prozent.

Der Anstieg des mittleren Tidenhubs ist für die Entwicklung der Morphologie und damit die Transportkapazität von Sedimenten im Wattenmeer von größter Bedeutung. Eine Folge des Meeresspiegelanstiegs an der Nordsee ist daher, dass er **das Wattenmeer in der Deutschen Bucht zunehmend bedroht**. Grundsätzlich können die Wattflächen bei einem Meeresspiegelanstieg aufwachsen: Mit dem Anstieg des Meeresspiegels nehmen auch die Gezeitenströme zu, die Sediment zwischen Wattenmeer und offener Nordsee transportieren und umlagern. Da besonders die Strömungsgeschwindigkeit der Flut zunimmt, wird der Sedimenttransport in Richtung Wattflächen verstärkt, was den Aufwuchs begünstigt.

Die natürliche Anpassungsfähigkeit des Wattenmeers ist allerdings begrenzt. **Je schneller der Meeresspiegel steigt, desto weniger können die Watten mitwachsen:** Im Zuge dessen würde trotz Wattwachstum die mittlere Wassertiefe zunehmen und sich die Gesamtfläche der Watten verkleinern. Ziel von Maßnahmen zum Schutz des Wattenmeers muss deshalb vor allem die Förderung des Wattwachstums sein. Gezielte Strandvorspülungen schützen dabei nicht nur die Küsten vor Erosion, sondern auch das Wattenmeer als einzigartiges Ökosystem.

## 6.2 Ostsee

Auch die Pegeldata an den Ostseeküsten sind von Schwankungen geprägt. Zum einen zeigen sich wesentlich kleinere Gezeitenamplituden als in der Nordsee, da sie durch die dänische Meerenge gedämpft werden. Zum anderen erzeugen die überwiegenden Westwindlagen erhöhte Wasserstände im nordöstlichen gegenüber dem südwestlichen Teil der Ostsee. Wird der mittlere Meeresspiegel des Jahres gebildet und werden Landhebungen und -senkungen herausgerechnet, zeigt sich für die Ostsee ein deutlicher Trend: Über den Zeitraum von 1900 bis 2015 ist der Meeresspiegel in der **südwestlichen Ostsee etwa 1 bis 1,7 Millimeter pro Jahr gestiegen**; wie in der Nordsee zeigt sich auch hier eine Beschleunigung des Anstiegs über die vergangenen drei Dekaden. Der Meeresspiegelanstieg der Ostsee liegt damit im Bereich der globalen Werte.

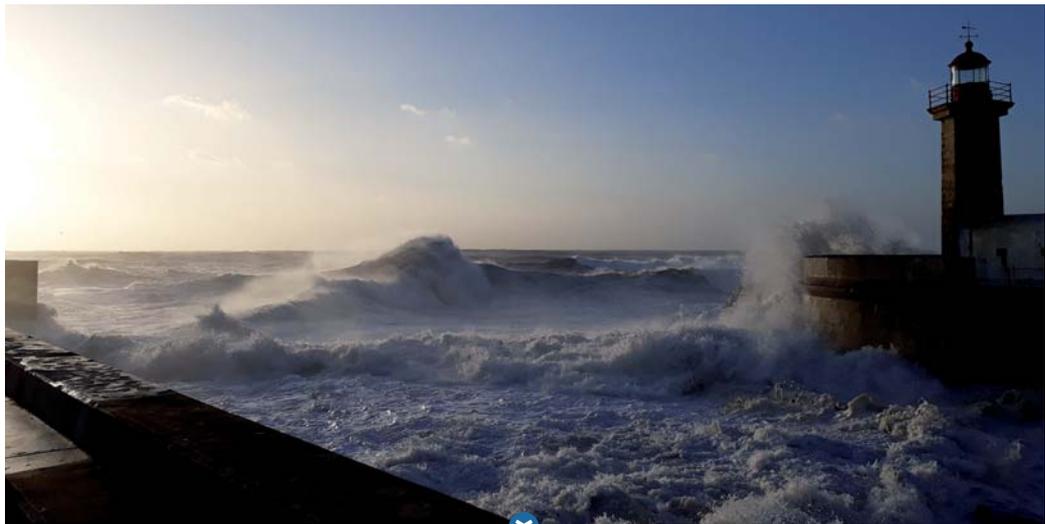
## 6.3 Küsten schützen

An den deutschen Küsten entsteht das größte Risiko durch die verstärkende Wirkung des Meeresspiegelanstiegs bei Extremwettern. Einzelne **Sturmfluten** können katastrophale Folgen haben, wie die Vergangenheit gezeigt hat: Die Sturmflut im Jahr 1362 an der Nordseeküste riss zum Beispiel rund 100.000 Menschen in den Tod und führte zum Untergang der sagenumwobenen Siedlung Rungholt an der nordfriesischen Küste. Weitere folgenschwere Sturmfluten traten an der Nordsee in den Jahren 1634, 1717, 1825, 1953, 1962 und 1976 auf. An der Ostsee war es die Sturmflut im November 1872, die mit fast 300 Todesopfern und weitreichenden Überflutungen bis heute die verheerendsten Folgen mit sich brachte.

Aktuell ist die deutsche Nordseeküste weitestgehend mit **Deichen** und **Vorländern** vor Wellenauflauf und Sturmfluten gesichert; auf den Inseln und Halligen schützen neben den Deichen auch **Dünen** und **Deckwerke** die Küsten und Strände. Diese Art des Schutzes ist für ein Industrieland wie Deutschland technologisch sowie wirtschaftlich effizient umsetzbar.

Aber wie sind wir in Deutschland auf die kommenden Risiken vorbereitet? Grundsätzlich sind in Deutschland die Maßnahmen in den **Generalplänen Küstenschutz** der Küstenländer Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein verankert, die auf bereits über die Jahrhunderte gemachten Erfahrungen in diesem Bereich aufbauen. Wie hoch jedoch die zukünftigen Risiken konkret sein werden, hängt auch damit zusammen, wie viele Menschen in den Küstengebieten wohnen und sich die Regionen wirtschaftlich entwickeln.

In einigen Fällen – zum Beispiel in dicht besiedelten Stadtgebieten wie etwa in Hamburg und Bremen – müssen möglicherweise erhebliche **Vorabinvestitionen** mobilisiert werden, um das aktuell vorliegende Schutzniveau auch in Zukunft zu gewährleisten. Unter extremen Szenarien zum Anstieg der Meeresspiegel sollten auch alternative Optionen in Betracht gezogen werden, da eine weitere **Deichverstärkung oder -erhöhung** nicht zwangsläufig wirtschaftlich effizient ist. Dies gilt besonders für die Ostseeregion, in der der natürliche Küstenschutz lokal begrenzt ist und weiche Schutzoptionen wie die Stabilisierung von Dünen und Sedimentmanagement an ihre Grenzen kommen. Für höhere Meeresspiegelanstiege kann sogar der **Rückzug** aus den gefährdeten Gebieten zunehmend in Betracht kommen.



## In Kürze

Der Anstieg der Meeresspiegel von Nord- und Ostsee entspricht in etwa dem globalen Mittelwert und erfordert Anpassungen des Küstenschutzes an die aktuellen Projektionen. Diese Anpassungen sind für ein Industrieland wie Deutschland technologisch sowie wirtschaftlich effizient umsetzbar, jedoch müssen möglicherweise in dicht besiedelten Stadtgebieten erhebliche Vorabinvestitionen mobilisiert werden. Zusätzlich ist durch den schnellen Anstieg der Meeresspiegel das Wattenmeer bedroht.

## Zusammenfassung

Der **Meeresspiegelanstieg** wird an Messstationen und mithilfe von Satelliten beobachtet. Zusätzlich lassen sich Änderungen in der jüngeren Erdgeschichte aus verschiedenen Indizien rekonstruieren. Projektionen der zukünftigen Entwicklung werden mit Klimamodellen erstellt. Im 20. Jahrhundert ist der globale Meeresspiegel um etwa 15 Zentimeter gestiegen, die Anstiegsrate hat sich beschleunigt. Legt man den Zeitraum von 2006 bis 2015 zugrunde, steigt der Meeresspiegel aktuell rund 3,6 Millimeter pro Jahr.

Der globale Anstieg des mittleren Meeresspiegels ist eine **Folge des Klimawandels**. Das Wasser dehnt sich mit zunehmender Temperatur aus, die schmelzenden Gletscher und Eisschilde fügen dem Ozean Wasser hinzu. Jedoch gibt es auch regional Unterschiede. Diese kommen etwa durch die vielfältigen Strömungen in Ozean und Atmosphäre sowie Landhebungen oder -senkungen zustande. Lokal spielt auch das Absinken des Meeresbodens durch die Entnahme von Grundwasser und die Förderung von Öl und Gas eine wichtige Rolle.

Während der letzten Zwischeneiszeit vor ungefähr 125.000 Jahren herrschten ähnliche klimatische Bedingungen wie heute, **vor circa drei Millionen Jahren** war es etwas wärmer. Der globale mittlere Meeresspiegel lag damals jedoch mehrere Meter höher.

Das **Klima der Zukunft** und damit auch der Anstieg der Meeresspiegel hängt entscheidend davon ab, wie viele Treibhausgase die Menschheit noch ausstoßen wird – und wie sich dadurch die Eisschilde in Grönland und der Antarktis entwickeln. Laut aktuellen Projektionen müssen wir mit einem globalen mittleren Anstieg von 43 bis 84 Zentimetern bis zum Ende dieses Jahrhunderts rechnen. Wichtig zu wissen ist, dass die Meeresspiegel selbst nach dem Stopp der Emissionen für mehrere Jahrhunderte weiter steigen werden, was an der Trägheit des Klimasystems liegt. Unser heutiges Handeln hat also noch weit in der Zukunft Folgen.

**Sturmfluten**, die den dicht besiedelten und intensiv genutzten Küstenraum bedrohen, werden in Zukunft in Wechselwirkung mit dem Meeresspiegelanstieg stärker. Um sich auf die zunehmende Belastung vorzubereiten, braucht es **Anpassungsmaßnahmen** in technischer wie auch in gesellschaftlicher Dimension. Für eine zukünftige integrierte Küstenschutzstrategie im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung sind die Wechselwirkungen von Gesellschaft, Ökosystemen, Ingenieurwesen und Politik gleichzeitig und gleichberechtigt zu berücksichtigen, um Fehlanpassungen an den Meeresspiegelanstieg zu vermeiden.

Der Anstieg der Meeresspiegel von **Nord- und Ostsee** entspricht in etwa dem globalen Mittelwert und erfordert Anpassungen des Küstenschutzes an die aktuellen Projektionen. Diese Anpassungen sind für ein Industrieland wie Deutschland technologisch sowie wirtschaftlich effizient umsetzbar, jedoch müssen möglicherweise in dicht besiedelten Stadtgebieten erhebliche Vorabinvestitionen mobilisiert werden. Zusätzlich ist durch den schnellen Anstieg der Meeresspiegel das Wattenmeer bedroht.

## Glossar

**Ästuar:** Trichterförmiger Bereich eines in das Meer mündenden Tideflusses. Ein Ästuar ist somit ein Gewässer, in welchem sich der Übergang von einem Binnen- zu einem marinen Gewässer vollzieht. Dementsprechend kann von einem Ästuar gesprochen werden, wo sich Süß- und Salzwasser mischen.

**Kryosphäre:** Mit diesem vom griechischen Wort Kryos für kalt oder Eis stammenden Begriff werden in der Wissenschaft die gefrorenen Komponenten des Systems Erde bezeichnet. Das schließt Schneedecken, Gletscher, Eisschilde, Eisschelfe, Eisberge, Meereis, See-Eis, Flusseis, Permafrost und saisonal gefrorenen Boden mit ein.

**Absoluter Meeresspiegel:** Die Definition der Meereshöhe ist komplex. Satellitengestützte Messverfahren beziehen sich auf den Erdmittelpunkt und verwenden diesen als Referenz. Beim absoluten Meeresspiegel geht es also um geozentrische Veränderungen der Meeresspiegelhöhe unabhängig von Landhebungen oder Landsenkungen.

**Relativer Meeresspiegel:** Damit ist vereinfacht die Höhe über dem Meeresgrund gemeint. Der relative Meeresspiegel wird an Messstationen ermittelt. Er wird nicht nur durch den Anstieg der Meeresoberfläche beeinflusst, sondern etwa auch, wenn der Meeresboden oder die Küste sich hebt oder senkt.

**Mittlerer Meeresspiegel:** Der über einen bestimmten Zeitraum wie einen Monat oder ein Jahr gemittelte Pegel der Ozeanoberfläche an einem bestimmten Punkt. Der mittlere Meeresspiegel wird häufig als nationale Bezugsgröße für Höhenangaben an Land verwendet.

**Globaler Meeresspiegel:** Zur Bestimmung des globalen Meeresspiegels wird das Meeresspiegelniveau über die Fläche des Weltozeans gemittelt. Dieser Wert ist ein bedeutender Indikator für den menschengemachten Klimawandel.

**Projektionen:** Das Klima der Zukunft wird entscheidend davon abhängen, wie viele Treibhausgase die Menschheit noch ausstoßen wird. Weil dies nicht vorhersehbar ist, spricht man in der Wissenschaft nicht von Vorhersagen, sondern von Projektionen, wenn es um die Berechnung der zukünftigen Entwicklung über längere Zeiträume geht. Es handelt sich um „Wenn-dann-Rechnungen“.

**Szenario:** Als Grundlage zur Berechnung möglicher zukünftiger Entwicklungen des Klimas dienen Emissionsszenarien. In den IPCC-Berichten wird von Representative Concentration Pathways (RCPs) gesprochen. Sie sind mögliche zukünftige Entwicklungspfade des menschlichen Ausstoßes von Treibhausgasen und Aerosolen. Auf dieser Basis werden mithilfe von Klimamodellen Projektionen des möglichen zukünftigen Klimas erstellt.

**Paris-Szenario:** Szenario mit konsequentem Klimaschutz (RCP 2.6). Die Treibhausgas-Emissionen werden so deutlich gesenkt, dass die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Niveau auf deutlich unter zwei Grad Celsius, idealerweise auf 1,5 Grad Celsius begrenzt werden kann – wie als Ziel im Pariser Klimaabkommen vereinbart.

**„Weiter so“-Szenario:** Es werden keine Klimaschutzmaßnahmen ergriffen (RCP 8.5), der Ausstoß von Emissionen geht ungebremst weiter.

## Verzeichnis der Abbildungen und Fotografien

<b>Umschlag</b>	<b>Meeresoberfläche.</b> © <i>borchee</i> . Graph: IPCC 5th Assessment Report. Compilation of paleo sealevel data (purple), tide gauge data (blue, red and green), altimeter data (light blue) and central estimates and likely ranges for projections of global mean sea level rise from the combination of CMIP5 and process-based models for RCP2.6 (blue) and RCP8.5 (red) scenarios, all relative to preindustrial values, 2013. Gestaltung: VISUV	
<b>Foto</b>	<b>Eisberge.</b> © MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen; D. Hebbeln.	
<b>Foto</b>	<b>Prof. Dr. Sabine Schlacke.</b> © Westfälische Wilhelms-Universität Münster; Peter Grewer.	4
<b>Abbildung 1</b>	<b>Rekonstruktion und Projektion der Meeresspiegel.</b> IPCC 5th Assessment Report, Compilation of paleo sealevel data (purple), tide gauge data (blue, red and green), altimeter data (light blue) and central estimates and likely ranges for projections of global mean sea level rise from the combination of CMIP5 and process-based models for RCP2.6 (blue) and RCP8.5 (red) scenarios, all relative to pre-industrial values, 2013.	5
<b>Abbildung 2</b>	<b>Regionale Unterschiede des Meeresspiegels.</b> Copernicus/CLS/CNES/LEGOS	6
<b>Foto</b>	<b>Messturm.</b> © Institut für Chemie und Biologie des Meeres, Universität Oldenburg; Sibet Riexinger.	7
<b>Abbildung 3</b>	<b>Prozesse, die die Meeresspiegel beeinflussen.</b> CEN/Universität Hamburg, nach Milne et al, 2009. Gestaltung: VISUV.	8
<b>Abbildung 4</b>	<b>Beiträge zum Meeresspiegelanstieg.</b> Dieng et al., New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach, Geophysical Research Letter, Vol. 44, 2017.	9
<b>Abbildung 5</b>	<b>Verlust von Eismasse.</b> CEN/Universität Hamburg. Gestaltung: VISUV.	10
<b>Abbildung 6</b>	<b>Landabsenkung und Gefährdung von Megastädten.</b> World Ocean Review 5, maribus gGmbH, 2017.	11
<b>Foto</b>	<b>Überflutung.</b> © Institut für Chemie und Biologie des Meeres, Universität Oldenburg; Sibet Riexinger.	12
<b>Abbildung 7</b>	<b>Rekonstruktion vergangener Meeresspiegel.</b> Zeichnung nach: Dutton, A., Carlson, A.E., Long, A., Milne, G.A., Clark, P.U., DeConto, R., Horton, B.P., Rahmstorf, S. and Raymo, M.E., 2015. Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. Science, 349 (6244). Foto: © A. Rovere, Universität Bremen. Gestaltung: VISUV.	13
<b>Foto</b>	<b>Korallen der letzten Zwischeneiszeit.</b> © MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen; Alessio Rovere.	14
<b>Abbildung 8</b>	<b>Projektionen der Meeresspiegel.</b> IPCC Fifth Assessment Report, Regional sea-level change (metres) evaluated from climate models for the RCP scenarios between 1986-2005 and 2081-2100 (a) 4.5, (b) 8.5., Source: Church et al. 2013, (Working Group 1, Chapter 13, Figure 13.20)	16
<b>Foto</b>	<b>Überflutung Markt.</b> © Thomas Wasilewski.	17
<b>Abbildung 9</b>	<b>Gefährdete Regionen, Inseln und Städte.</b> IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)]. In press, 2019.	18
<b>Foto</b>	<b>Sandaufschüttung.</b> © Christian Winter.	20
<b>Foto</b>	<b>Strand.</b> © Thomas Wasilewski.	21
<b>Foto</b>	<b>Leuchtturm.</b> © Christian Winter.	24

## Autorinnen und Autoren

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler arbeiten in einer interdisziplinären Strategieguppe von DKK und KDM zu Ozeanzirkulation und Klima zusammen und forschen an den Mitgliedsinstitutionen der beiden Wissenschaftsverbände. Zusätzlich brachten Kolleginnen und Kollegen aus externen Einrichtungen ihre Expertise ein.

**Prof. Dr. Jürgen Jensen**, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Universität Siegen

**Dr. Birgit Klein**, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

**Prof. Dr. Jürgen Kusche**, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn

**Prof. Dr. Mojib Latif**, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU)

**Prof. Dr. Beate Ratter**, CEN – Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit, Universität Hamburg und Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Materialforschung und Küstenforschung (HZG)

**Prof. Dr. Monika Rhein**, Institut für Umweltphysik (IUP) und MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen

**Dr. Alessio Rovere**, MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen

**Prof. Dr. Torsten Schlurmann**, Forschungszentrum Küste (FZK) und Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen, Leibniz Universität Hannover

**Prof. Dr. Michael Schulz**, MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen

**Prof. Dr. Detlef Stammer**, CEN – Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit, Universität Hamburg

**Dr. Birger Tinz**, Deutscher Wetterdienst (DWD)

**Prof. Dr. Athanasios Vafeidis**, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU)

**Prof. Dr. Martin Visbeck**, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU)

**Benno Wachler**, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

## **Beteiligte Mitgliedseinrichtungen von DKK und KDM**

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

CEN – Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit, Universität Hamburg

Deutscher Wetterdienst (DWD)

Forschungszentrum Küste (FZK), Gemeinsame Zentrale Einrichtung der Leibniz Universität Hannover und der Technischen Universität Braunschweig

Future Ocean Netzwerk, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU)

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Materialforschung und Küstenforschung (HZG)

Institut für Umweltphysik (IUP), Universität Bremen

MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen

## Über uns

### **Strategiegruppe „Ozeanzirkulation und Klima“ von DKK und KDM**

Der Ozean ist eine der zentralen Komponenten des Klimasystems. Veränderungen in den Meeren wirken sich vielfach auf das Klima aus. Deshalb ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der Klima- und Meeresforschung ausschlaggebend. Die gemeinsame Strategiegruppe „Ozeanzirkulation und Klima“ des Deutschen Klima-Konsortiums (DKK) und des Konsortiums Deutsche Meeresforschung (KDM) bringt die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der wichtigsten deutschen Forschungseinrichtungen zusammen, die sich mit diesem Themenfeld befassen. Sie identifiziert die drängenden Fragen im Zusammenhang mit der Rolle der Ozeane beim Klimawandel und entwickelt aus der Forschung heraus die Wissensbasis für politische Entscheidungen.

### **Deutsches Klima-Konsortium (DKK)**

Das Deutsche Klima-Konsortium ist ein Wissenschaftsverband und vertritt führende Akteure der deutschen Klimaforschung und Klimafolgenforschung. Dazu gehören Universitäten, außeruniversitäre Forschungseinrichtungen und Bundesbehörden. Das DKK steht für wissenschaftsbasierte Politikberatung, greift aktuelle Themen auf und liefert Hintergründe aus der Sicht von Expertinnen und Experten.

### **Konsortium Deutsche Meeresforschung (KDM)**

Das Konsortium Deutsche Meeresforschung bündelt als Verband die Expertise der deutschen Meeresforschung. Seine Mitglieder setzen sich aus allen Forschungseinrichtungen zusammen, die in Meeres-, Polar- und Küstenforschung aktiv sind. Ein Hauptanliegen des KDM ist, die Interessen der Meeresforschung gegenüber nationalen Entscheidungsträgern und der EU sowie gegenüber der Öffentlichkeit gemeinsam zu vertreten.

## Impressum

### Herausgeber

Deutsches Klima-Konsortium e. V. (DKK)  
im Wissenschaftsforum Berlin  
Markgrafenstraße 37  
10117 Berlin

Telefon: +49 (0)30 76 77 18 69-0  
E-Mail: [info@klima-konsortium.de](mailto:info@klima-konsortium.de)  
[www.deutsches-klima-konsortium.de](http://www.deutsches-klima-konsortium.de)

Konsortium Deutsche Meeresforschung e. V. (KDM)  
im Wissenschaftsforum Berlin  
Markgrafenstraße 37  
10117 Berlin

Telefon: +49 (0)30 200 747 90  
E-Mail: [info@deutsche-meeresforschung.de](mailto:info@deutsche-meeresforschung.de)  
[www.deutsche-meeresforschung.de](http://www.deutsche-meeresforschung.de)

### Redaktion

Elisabeth Weidinger

Sebastian Konitzer

Gestaltung: VISUV, Greifswald  
gedruckt auf 100 Prozent Recyclingpapier



Berlin, Dezember 2019

