

NORDSEESTURMFLUTEN IM KLIMAWANDEL

Perspektiven der Küstenentwicklung



Dr. Insa Meinke und Dr. Ralf Weisse
Institut für Küstensysteme
Helmholtz-Zentrum Hereon



Die Küstenbewohner schützen sich vor hohen Wasserständen seit mehr als tausend Jahren. Nachdem der Küstenschutz vor allem an unserer Nordseeküste in den letzten Jahrzehnten stark ertüchtigt wurde, wännen sich viele Bewohner in sturmflutgefährdeten Gebieten in Sicherheit. Angesichts des Klimawandels treten jedoch vermehrt Fragen auf, wie sich die Sturmfluten an unseren Küsten entwickeln, ob der aktuelle Küstenschutz ausreicht und worauf man sich künftig einstellen sollte. Bereits vor gut 15 Jahren haben wir anlässlich einer Anhörung des Schleswig-Holsteinischen Landtages zur Zukunft des Küstenschutzes den aktuellen Forschungsstand zu Nordseesturmfluten im Klimawandel zusammengefasst. In der Zwischenzeit sind zwei weitere Sachstandsberichte des UN-Weltklimarates IPCC veröffentlicht, neue Forschungsprojekte durchgeführt und wissenschaftliche Fachartikel veröffentlicht worden. Nach wie vor erreichen uns im Norddeutschen Küsten- und Klimabüro am Helmholtz-Zentrum Hereon viele Anfragen aus der Bevölkerung zu den Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs an der Nordseeküste, und unsere Wissenschaftler werden bei politischen Entscheidungsprozessen fortlaufend konsultiert. Aufgrund der fortbestehenden gesellschaftlichen Relevanz aktualisieren wir unsere Zusammenfassung unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse.

Um auf die Herausforderungen des Klimawandels reagieren zu können, müssen wir deren regionale Besonderheiten kennen. Dazu gehört, sowohl die natürlichen Prozesse an der Nordseeküste als auch die Folgen menschlicher Eingriffe zu verstehen. Oft verstärkt sich dieses Wirkungsgeflecht durch den Klimawandel. Deshalb stellt sich die Frage, wo künftige Klimaanpassungsmaßnahmen ansetzen sollten. Für den dafür nötigen Diskurs bieten wir mit der vorliegenden Broschüre eine Grundlage.

Inhalt

7	EIN BLICK ZURÜCK – VON DER ENTSTEHUNG DER NORDSEEKÜSTE BIS HEUTE
9	Natürliche Dynamik der Nordseeküste
11	Verteidigung gegen das Meer
15	Herausforderungen durch menschliche Einflüsse: Entwässerung, Erosion und Versalzung
19	NORDSEESTURMFLUTEN IM KLIMAWANDEL
21	Entstehung von Sturmfluten
25	Bisher fallen Sturmfluten hauptsächlich durch den Meeresspiegelanstieg höher aus
31	In Zukunft werden sich Nordseesturmfluten weiter intensivieren
35	PERSPEKTIVEN IM KLIMAWANDEL
37	Klimadeiche als Anpassung des Küstenschutzes an den Klimawandel
41	Stärkere Belastung von Küstenschutzbauwerken und Erosion
45	Grundwasserversalzung
49	Entwässerung
53	KÜSTENENTWICKLUNG UNTER DEM ASPEKT DER NACHHALTIGKEIT
58	LITERATUR


**EIN BLICK ZURÜCK –
VON DER ENTSTEHUNG DER
NORDSEEKÜSTE BIS HEUTE**



Natürliche Dynamik der Nordseeküste

Die nacheiszeitliche Erwärmung führte zunächst zu einem starken Meeresspiegelanstieg, durch den sich die damals nördlich der Doggerbank verlaufende Küstenlinie in die heutige Küstenregion verschob. Dabei entstand vor etwa 6000 Jahren das Wattenmeer, als die Nordsee in die flachen Küstengebiete eindrang. Später verlangsamte sich der nacheiszeitliche Meeresspiegelanstieg, stagnierte zeitweilig, und es kam unterdessen auch wieder zu Absenkungen des mittleren Wasserstandes (*Behre 2008*). Durchsetzt von Gletscherablagerungen bildeten sich dabei flache Moor- und Sumpflandschaften, in denen sich Süß- und Salzwasser mischten. Weiter seewärts entwickelte sich eine gezeitengeprägte Wattlandschaft mit einer Kette von Düneninseln aus Sandbänken. Die Watten und Inseln wurden durch Sande und andere lockere Sedimente versorgt, die von der Nordsee transportiert und hier bei schwächerer Strömung abgelagert wurden. Seit ihrer Entstehung vor ca. 6000 Jahren wuchsen die Watten mit dem nacheiszeitlichen Meeresspiegelanstieg rund 10 Meter nach oben (*Köster 1998, Fischer und Reise 2011*). Auch Moore und Sümpfe wuchsen durch sich anhäufende Pflanzenreste immer höher auf und wurden bei höheren Wasserständen von marinen Sedimenten überzogen (*Behre 2008*). Das Land erhöhte sich insbesondere nach jeder Sturmflut durch die von den Wassermassen mitgeführten Sedimente und folgte so den steigenden Hochwasserständen.


Die Nordseeinseln unterlagen der natürlichen Dynamik. Dabei wurden sie an ihren Westküsten abgetragen und verlagerten sich teils mit Wind und Strömung nach Ost bzw. Südost.



Seit ihrer Entstehung vor ca. 6000 Jahren wuchsen die Watten mit dem nacheiszeitlichen Meeresspiegelanstieg rund 10 Meter nach oben. Das Land erhöhte sich insbesondere nach jeder Sturmflut durch die von den Wassermassen mitgeführten Sedimente und folgte so den steigenden Hochwasserständen.

Verteidigung gegen das Meer

Sturmfluten waren nicht nur wesentliche Faktoren der Küstenentwicklung, sondern bestimmten auch die Reichweite der Siedlungsmöglichkeiten in den Marschen. Als erste aktive Reaktion gegen Überflutungen ist der Wurtenbau in der römischen Kaiserzeit erkennbar (*Behre 2008*). Während sturmflutgefährdete Siedlungen bis dahin aufgegeben worden waren, bauten die Marschbewohner nun ihre Siedlungen auf Wohnhügeln, den sogenannten Wurten (regional auch Warften). Diese mussten regelmäßig erhöht werden. Vor rund tausend Jahren begannen die Siedler die zunächst kleinen Wirtschaftsflächen einzelner Wurten mit einem Ringdeich zu schützen. So wurde das Land nicht oder nur noch selten überflutet und die Bodeneigenschaften der salzigen Marsch konnten für den Ackerbau verbessert werden (*Behre 2008*). Mit den ersten Deichbauten wurde die Nordseeküste signifikant umgestaltet. Immer mehr Salzwiesen und Moore wurden in Kulturland umgewandelt und die bestehenden Deiche nach und nach zusammengeschlossen, so dass daraus im Laufe der folgenden Jahrhunderte eine fast vollständige Deichlinie entstand, die seither eine feste Grenze zwischen Watt- und Kulturlandschaft bildet (*Ahlhorn und Meyerdirks 2017, Fischer und Reise 2011*). Mit der nahezu geschlossenen Deichlinie trat ein wichtiger anthropogener Faktor in das Wirkungsgefüge der Nordseeküste ein. Seitdem ist die Küstenentwicklung nur noch teilweise auf Meeresspiegelschwankungen und Sturmfluten zurückzuführen, während sich die menschlichen Einflüsse stärker bemerkbar machen.



Mit dem Bau einer nahezu geschlossenen Deichlinie trat ein wichtiger anthropogener Faktor in das Wirkungsgefüge der Nordseeküste ein. Seitdem ist die Küstenentwicklung nur noch teilweise auf Meeresspiegelschwankungen und Sturmfluten zurückzuführen, während sich die menschlichen Einflüsse stärker bemerkbar machen.

Bis heute basiert der Küstenschutz an unserer Nordseeküste größtenteils auf dem Ausbau dieser Deiche zur Abwehr von Sturmfluten auf einer festgelegten Linie. Diese Deichlinie wird an die sich ändernden Randbedingungen, insbesondere Wasserstände und Seegang, kontinuierlich angepasst. Das Deichvorland, die Watten und die Inseln werden dabei mit in den Küstenschutz einbezogen (Ahlhorn und Meyerdirks 2017, MEKUN 2022), denn im Flachwasserbereich des Wattenmeers wird ein Großteil der mit einer Sturmflut einhergehenden Seegangenergie in Reibungsenergie umgewandelt und die Belastung von Küsten- und Hochwasserschutzanlagen während der Sturmfluten somit deutlich reduziert. Salzwiesen mindern zudem die Fließgeschwindigkeit des auflaufenden Wassers und verringern dadurch ebenfalls die Belastung bei Sturmfluten.


Auf den Nordseeinseln nahm die Bevölkerung erst seit dem 18. Jahrhundert verstärkt zu. Die natürliche Erosion der Westküsten und die (Süd-)Ost-Wanderung der Inseln führten dazu, dass sich die ursprünglich in der Mitte gelegenen Dörfer mit der Zeit an der gefährdeten Westküste befanden. Als Ende des 18. Jahrhunderts die touristische Entwicklung auf den Nordseeinseln einsetzte, wurden zur Bewahrung der aufblühenden Inseldörfer und Strände die gefährdeten Westküsten der Inseln geschützt und natürliche Verlagerungen weitgehend unterbunden (Behre 2008).



Herausforderungen durch menschliche Einflüsse: Entwässerung, Erosion und Versalzung

Mit dem Deichbau wurden Sturmfluten zwar abgewehrt, das Wasser staute sich nun aber vor den Deichen stärker auf, da sich die Flächen verkleinert hatten, auf denen die Wassermassen bei Sturmflut auslaufen und Energie abbauen konnten. Vor allem in der trichterförmigen Deutschen Bucht erforderten die nun höher auflaufenden Sturmfluten (*Behre 2008*) neben dem kontinuierlichen Unterhalt gleichzeitig einen fortlaufenden Ausbau und eine Weiterentwicklung der Küstenschutzbauten.

Die Eindeichung hatte zudem weitreichende Folgen für die Entwässerung, denn große Marschgebiete sind seither zwar sturmflutgeschützt, gleichzeitig wird ihre natürliche Entwässerung aber durch die Deiche unterbunden. Seit Beginn der flächenhaften Eindeichung der deutschen Nordseeküste musste das so geschützte Marschland deshalb zusätzlich durch umfangreiche Grabensysteme und Sieltore in den Deichen fortlaufend entwässert werden, um es bewirtschaften zu können. Zudem wurden die eingedeichten Marschen nicht mehr mit marinen Sedimenten überzogen und konnten fortan auch nicht mehr mit dem nacheiszeitlichen Meeresspiegelanstieg mitwachsen (*Behre 2008*). Außerdem wurde der Moorboden weitgehend abgetragen, um den gewonnenen Torf zum Heizen und zur Salzgewinnung zu verwenden. Entwässerung und Torfabbau senkten das hinter den Deichen gelegene Land zusätzlich. Gleichzeitig stieg der Meeresspiegel weiter an, die Watten und



Seit Beginn der flächenhaften Eindeichung der deutschen Nordseeküste musste das so geschützte Marschland zusätzlich durch umfangreiche Grabensysteme und Sieltore in den Deichen fortlaufend entwässert werden, um es bewirtschaften zu können. Zudem wurden die eingedeichten Marschen nicht mehr mit marinen Sedimenten überzogen und konnten fortan auch nicht mehr mit dem nacheiszeitlichen Meeresspiegelanstieg mitwachsen.

Salzwiesen vor den Deichen wuchsen mit dem Meer in die Höhe. Auf diese Weise hat sich das Gefälle zwischen Meer und eingedeichtem Land immer weiter vergrößert, so dass heute weite Teile der eingedeichten Marsch unter dem Niveau des mittleren Tidehochwassers liegen (*Reise 2015, kustenschutzbedarf.de*). Bei Deichbrüchen wären daher aktuell deutlich größere Gebiete von Überflutungen betroffen als damals kurz nach Beginn des Deichbaus. Zudem ist die Entwässerung immer aufwändiger geworden, denn viele Flächen liegen heute in Relation zum Meer so tief, dass sie ohne zusätzlichen Einsatz von Pumpen nicht mehr zu entwässern sind (*Ahlhorn und Meyerdirks 2017*). Mit dem Höhenunterschied zwischen Meer und Land hat auch der Druck des Salzwassers auf die grundwasserführenden Schichten zugenommen. Verstärkt durch das Abpumpen des oberflächennahen Süßwassers im Zuge der notwendigen Entwässerung sickert mehr Salzwasser in die grundwasserführenden Schichten ein und salzhaltigeres Grundwasser steigt nach oben auf. Vor den Deichen konnten Salzwiesen und Watten bisher zwar mit dem Meeresspiegel mitwachsen, durch die feste Deichlinie wird jedoch ihre Ausdehnung landeinwärts unterbunden, so dass feines Sediment und Salzwiesen an ihrer Kante verstärkt erodiert werden. Dadurch hat sich die Belastung an den Deichen verstärkt. Insgesamt müssen Deiche daher inzwischen größere, wesentlich dichter besiedelte Gebiete vor höheren Sturmfluten schützen, und dies unter zunehmender Belastung.

Auf den Inseln schützen Uferbefestigungen und systematische Dünenbepflanzungen jetzt Siedlungen, fest installierte Infrastrukturen und Strände, gleichzeitig werden die Inseln damit aber der natürlichen Dynamik entzogen. Die Fixierung der Inseln durch Küstenschutzmaßnahmen ist zur Daueraufgabe geworden und geht mit hohen Folgekosten einher, unter anderem für die nun regelmäßig notwendigen Sandaufspülungen an den Stränden (*Behre 2008, NLWKN 2010*).




NORDSEESTURMFLUTEN IM KLIMAWANDEL



Entstehung von Sturmfluten

Sturmfluten sind ungewöhnlich hohe Wasserstände, die in der Vergangenheit oft große Schäden verursachten. Heute werden sie durch fest definierte Höhen klassifiziert.

Sturmfluten entstehen durch starke auflandige Winde, die große Wassermassen an der Küste aufstauen. Dabei entstehen hohe Wellen, die an der Küste zu starker Brandung führen. Dieser Sturmflutseeegang belastet die Küstenschutzbauwerke und erhöht durch Brandungsstau (Hansen 1979) zusätzlich die Sturmflutwasserstände an der Küste. Besonders hohe Wasserstände entstehen, wenn Sturmfluten mit hohen astronomischen Gezeiten (Springflut) zusammenfallen. Zusätzlich können sich sogenannte Fernwellen auf die Höhe der Sturmflutwasserstände auswirken. Fernwellen entstehen bei bestimmten Wetterlagen im Atlantik und wandern gegen den Uhrzeigersinn entlang der Nordseeküste. Treffen Fernwellen mit einer Sturmflut zusammen, können sie den Wasserstand an der Küste zusätzlich signifikant erhöhen (Böhme et al. 2023). Grundsätzlich bestimmt jedoch der mittlere Meeresspiegel das Ausgangsniveau für die Entstehung von Sturmfluten. Je höher der mittlere Meeresspiegel, desto weniger Wind ist notwendig, um Wasserstände auf Sturmflutniveau anzuheben. Wie stark sich die Sturmflutaktivität (Höhe, Häufigkeit und Dauer) an der deutschen Nordseeküste ändert, hängt deshalb in erster Linie vom Meeresspiegelanstieg und von Veränderungen des Windklimas in der Deutschen Bucht ab.



Sturmfluten sind charakteristische Erscheinungen an der Nordseeküste. Für Küstenbewohner waren sie schon immer gefährlich, auch ohne Klimawandel.



Nordseesturmflut 16./17. Februar 1962

An der gesamten deutschen Nordseeküste ereignete sich in der Nacht vom 16. auf den 17. Februar 1962 die bisher folgenreichste Nordseesturmflut seit Beginn der regelmäßigen Wasserstandsaufzeichnungen. Mehr als 300 Menschen starben und Tausende wurden obdachlos. Die immensen Schäden offenbarten die damaligen Defizite der Küstenschutzbauwerke, woraufhin der Küstenschutz an der gesamten deutschen Nordseeküste ertüchtigt wurde. Seit jenem Ereignis gab es einige weitere sehr schwere Sturmfluten, die noch höher aufliefen, darunter die an vielen Pegeln bisher höchste Sturmflut im Januar 1976 – jedoch ohne vergleichbare Schäden. Dies beweist die Wirksamkeit des derzeitigen Küstenschutzes.



WWW.KUESTENSCHUTZBEDARF.DE




Das Webtool kuestenschutzbedarf.de zeigt auf Basis der folgenreichen Sturmflut vom 16./17. Februar 1962, welche Gebiete heute wirksam vor hohen Wasserständen geschützt werden und in wie weit sich diese zu schützenden Flächen künftig durch den Klimawandel vergrößern können.

Bisher fallen Sturmfluten hauptsächlich durch den Meeresspiegelanstieg höher aus

Die Windverhältnisse über der Nordsee haben sich mit dem Klimawandel bisher nicht systematisch verändert. Sowohl Wind- als auch Luftdruckmessungen zeigen zwar, dass Stärke und Häufigkeit der Nordseestürme im letzten Jahrhundert starken Schwankungen unterlagen, diese aber im bisher beobachteten Bereich blieben (Feser et al. 2015, Krueger et al. 2019, Krieger et al. 2020). Eine Einordnung der aktuellen Sturmaktivität im Kontext der langfristigen Entwicklung des Sturmklimas in der Deutschen Bucht ermöglicht der Sturmmonitor des Helmholtz-Zentrums Hereon. Bisher bestätigt sich der Befund, dass eine Sturmsaison heute weder heftigere noch häufigere Stürme in der Deutschen Bucht hervorbringt als zu Beginn des letzten Jahrhunderts (sturm-monitor.de). Ähnliche Schlussfolgerungen gelten auch für die langfristige Entwicklung des Seegangs in der Deutschen Bucht (Groll und Weisse 2017). Dementsprechend laufen auch Sturmfluten heute windbedingt nicht höher auf als noch vor hundert Jahren (Weisse et al. 2012).

Der mittlere Meeresspiegel ist jedoch in den letzten hundert Jahren weltweit durchschnittlich um etwa 20 cm angestiegen. Auch die Nordsee hat mit dieser Entwicklung ungefähr Schritt gehalten (Weisse und Meinke 2016, Liu et al. 2022). Zwischen 1923 und 2022 ist der mittlere jährliche Wasserstand in Cuxhaven und Husum um 20 cm und in Norderney



Eine Sturmsaison bringt heute weder heftigere noch häufigere Stürme in der Deutschen Bucht hervor als zu Beginn des letzten Jahrhunderts. Aber durch den Meeresspiegelanstieg sind Sturmfluten häufiger und höher geworden.

WWW.STURM-MONITOR.DE



Der Sturmmonitor des Helmholtz-Zentrums Hereon informiert tagesaktuell über die Veränderung der Sturmaktivität in Norddeutschland. Er zeigt, wie sich die Sturmaktivität in den letzten Jahrzehnten entwickelt hat und ob aktuelle Ereignisse oder der Verlauf der jetzigen Sturmsaison im Vergleich zu früher ungewöhnlich sind.

um 15 cm angestiegen. Die Werte sind demnach vergleichbar mit dem globalen mittleren Meeresspiegelanstieg. Das gilt auch für Helgoland, wo die verfügbaren regelmäßigen Wasserstands-aufzeichnungen nicht so weit in die Vergangenheit zurückreichen. Hier ist der mittlere jährliche Wasserstand in den letzten 50 Jahren um 14 cm angestiegen. Die mittleren jährlichen Wasserstände dieser vier Pegel werden fortlaufend im Meeresspiegelmonitor des Helmholtz-Zentrums Hereon ausgewertet und in den Langfristkontext gesetzt (*meeresspiegel-monitor.de*). Die Auswertungen zeigen, dass an den deutschen

WWW.MEERESSPIEGEL-MONITOR.DE



Der Meeresspiegelmonitor des Helmholtz-Zentrums Hereon wertet die mittleren Wasserstände an deutschen Nord- und Ostseepegeln fortlaufend aus und setzt sie in den Langfristkontext.

Küstenpegeln die aktuellen mittleren jährlichen Wasserstände zu den höchsten seit Beginn der regelmäßigen Wasserstands-aufzeichnungen gehören. Anders als beim globalen mittleren Meeresspiegelanstieg lässt sich an der deutschen Nordsee-küste bisher keine ungewöhnliche Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs zweifelsfrei nachweisen. Neuere Arbeiten liefern zwar erste Indizien (*Steffelbauer et al. 2022, Keizer et al. 2023*) und die aktuellen Anstiegsraten an den deutschen Pegeln liegen zum Teil auch über dem langjährigen Durchschnittswert, die Anstiegsraten an allen Pegeln bewegen

WWW.STURMFLUT-MONITOR.DE



Der Sturmflutmonitor des Helmholtz-Zentrums Hereon zeigt tagesaktuell, ob sich die Sturmflutaktivität bereits verstärkt hat, und vergleicht die aktuelle Sturmflutsaison mit vergangenen Jahrzehnten.

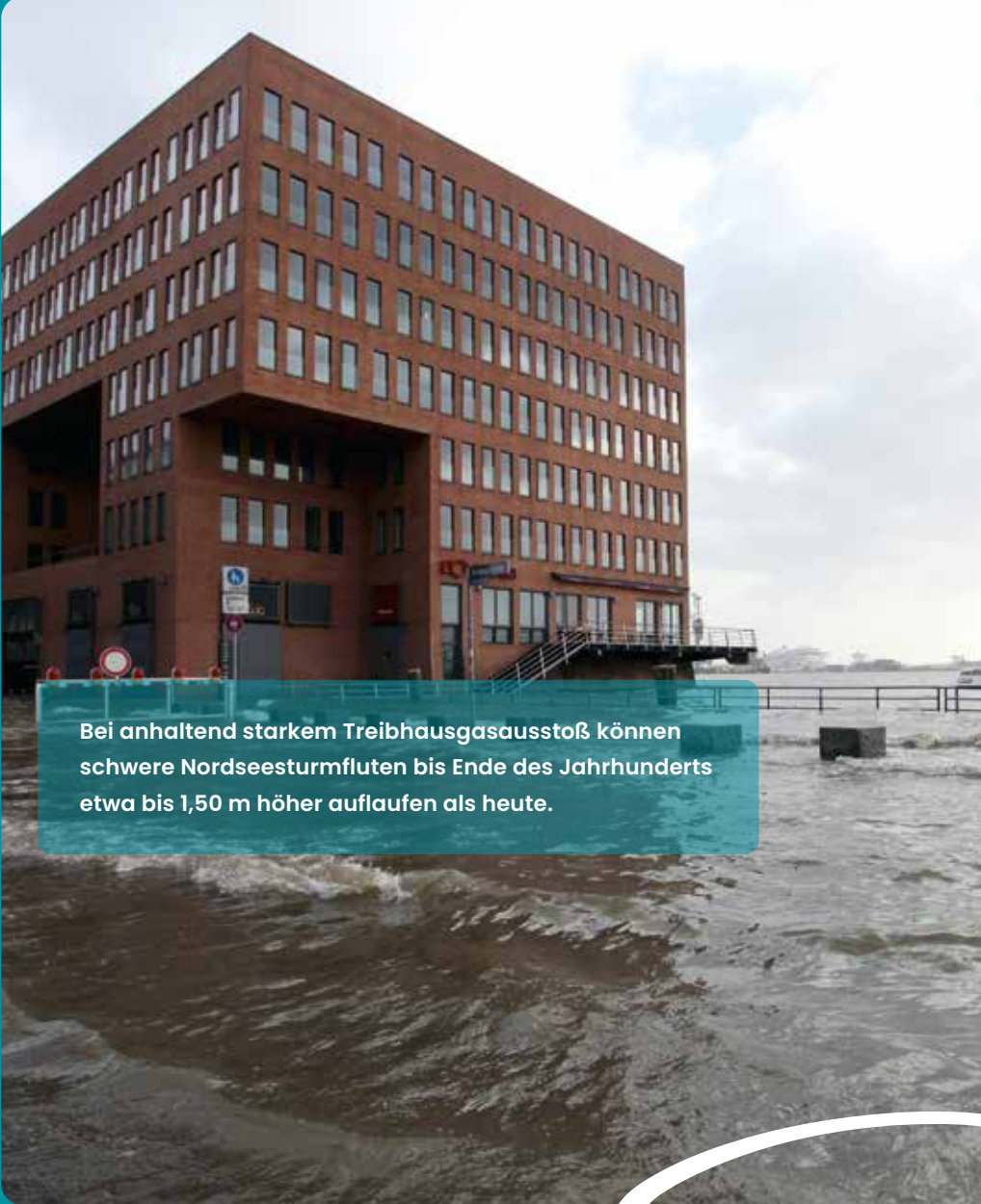
sich aber innerhalb bisheriger Schwankungsbereiche. So gab es an allen untersuchten Pegeln in der Vergangenheit Phasen, in denen der mittlere Meeresspiegel noch schneller angestiegen ist (*meeresspiegel-monitor.de*). Vor dem Hintergrund der bereits eingetretenen Beschleunigung des globalen mittleren Meeresspiegelanstiegs ist jedoch ein fortlaufendes Monitoring der mittleren jährlichen Wasserstände sowie der Sturmflutaktivität an unseren Küsten notwendig, um auf Veränderungen rechtzeitig reagieren zu können. Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels hat das Ausgangsniveau

angehoben, von dem aus Sturmfluten die Küste angreifen können. Dadurch ist heute im Vergleich zu früher weniger Wind notwendig, um die Wasserstände an der Nordseeküste auf Sturmflutniveau anzuheben. Sturmfluten treten dort somit inzwischen auch ohne systematische Änderungen des Windklimas häufiger ein und laufen entsprechend höher auf als vor hundert Jahren (z. B. *Weisse 2018* und *Liu et al. 2022*). Der Sturmflutmonitor des Helmholtz-Zentrums Hereon zeigt bei allen untersuchten Pegeln mit Ausnahme von Helgoland statistisch signifikante Häufigkeitszunahmen und Wasserstandserhöhungen. Besonders starke Zunahmen zeigen sich bei der Sturmflutaktivität in Hamburg und Bremen. Diese Entwicklung kann jedoch nur zum Teil mit dem Meeresspiegelanstieg erklärt werden. So ist in Elbe und Weser die Zunahme der Sturmflutaktivität auch auf wasserbauliche Maßnahmen wie die Erhöhung von Deichen und den Bau von Sperrwerken zum Sturmflutschutz der Nebenflüsse zurückzuführen, die zwar verhindern, dass sich die Wassermassen in der Fläche verteilen, gleichzeitig aber häufigere Wasserstandserhöhungen und höhere Sturmfluten begünstigen (*vgl. auch Kap. Herausforderungen durch menschliche Einflüsse*).



In Zukunft werden sich Nordseesturmfluten weiter intensivieren

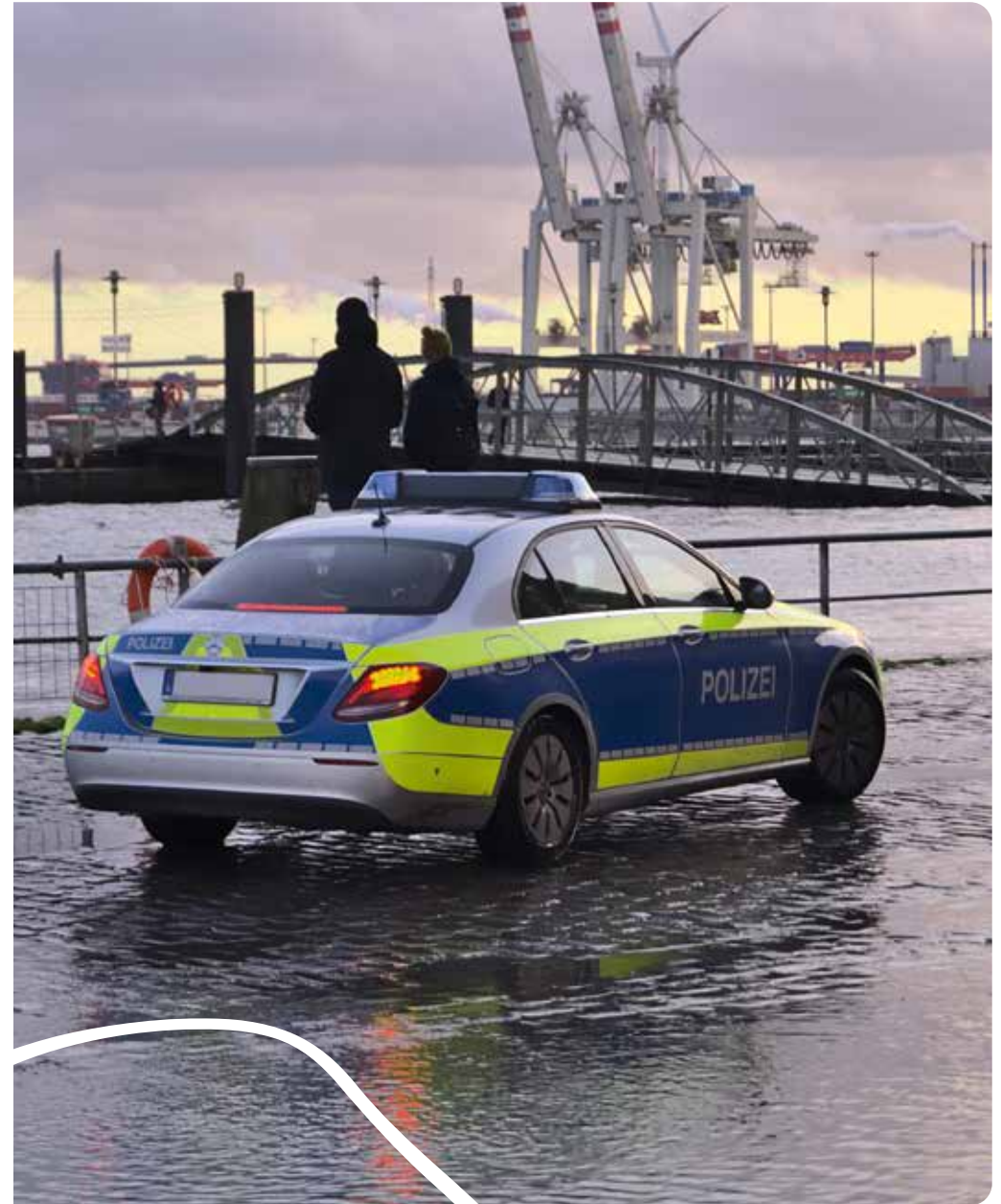
Das Ausmaß des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs durch das Abschmelzen der Gletscher und Eisschilde sowie die thermische Ausdehnung des Meerwassers wird maßgeblich von den zukünftigen Treibhausgasemissionen bestimmt. Dass der globale mittlere Meeresspiegel im 21. Jahrhundert weiter ansteigen wird, ist jedoch so gut wie sicher, denn selbst bei niedrigen künftigen Treibhausgasemissionen ist bis Ende des Jahrhunderts im Vergleich zur heutigen Referenzperiode (1995 - 2014) ein globaler mittlerer Meeresspiegelanstieg von 30 bis 60 cm zu erwarten (*Garner et al. (IPCC) 2021*). Eine ähnliche Entwicklung ist an der deutschen Nordseeküste plausibel. So weisen dieselben niedrigen Treibhausgasszenarien beispielsweise für Cuxhaven auf einen Meeresspiegelanstieg von 30 bis 75 cm bis Ende des Jahrhunderts im Vergleich zu heute (1995-2014) hin (*Garner et al. 2021*). Ähnliche Werte zeigen sich für die anderen Pegel an der deutschen Nordseeküste. Selbst bei diesen vergleichsweise niedrigen Treibhausgasemissionen in den nächsten Jahrzehnten können Nordseesturmfluten deshalb deutlich häufiger vorkommen und entsprechend höher ausfallen. Eine vergleichbare Sturmflut wie die am 16./17. Februar 1962 könnte Ende des 21. Jahrhunderts an der deutschen Nordseeküste dann statistisch alle 10 bis 20 Jahre auftreten (*meerespiegel-monitor.de*). Erfolgt der Treibhausgasausstoß in den nächsten Jahrzehnten jedoch weiter ungebremst, ist bis 2100 mit einem deutlich stärkeren Meeresspiegelanstieg zu rechnen,



Bei anhaltend starkem Treibhausgasausstoß können schwere Nordseesturmfluten bis Ende des Jahrhunderts etwa bis 1,50 m höher auflaufen als heute.

in der Deutschen Bucht etwa mit bis zu 1,20 m. Eine schwere Sturmflut wie die am 16./17. Februar 1962 könnte dann statistisch sogar alle 5 bis 10 Jahre auftreten (*meeresspiegel-monitor.de*). Abgesehen von diesen Meeresspiegelszenarien ist laut dem UN Weltklimarat IPCC aufgrund der weiterhin großen Unsicherheiten hinsichtlich der Geschwindigkeit des Abschmelzens der großen Eisschilde auch ein höherer Anstieg bis etwa 1,40 m in der Deutschen Bucht bis 2100 nicht auszuschließen. Zudem wird der globale mittlere Meeresspiegel auch nach 2100 weiter ansteigen. Für Cuxhaven ist in der Folge selbst bei sehr geringen zukünftigen Treibhausgasemissionen ein Meeresspiegelanstieg von etwa 1 m bis 2150 plausibel.

Anders als beim Anstieg des Meeresspiegels lassen die meisten vorhandenen Szenarien derzeit keine eindeutige Veränderung des Wind- und damit des Windstau- und See-gangsklimas erkennen. Die Mehrzahl der Studien zeigt keine oder nur geringe Erhöhungen des Windstaus bis 30 cm bis zum Ende des 21. Jahrhunderts an. Zusammen mit einem weiter steigenden Meeresspiegel können Nordseesturmfluten bei einem anhaltend starken Treibhausgasausstoß bis zum Ende des Jahrhunderts deshalb insgesamt etwa bis 1,50 m (1,20 m Meeresspiegelanstieg + 30 cm Windstauänderung) höher auflaufen als heute. Sollte sich das Abschmelzen der großen Eisschilde schneller vollziehen als erwartet und sich das Windstauklima noch ungünstiger entwickeln, sind auch höhere Sturmflutwasserstände bis Ende des Jahrhunderts nicht auszuschließen. Bis dahin kann durch die erhöhten Sturmflutwasserstände ein deutlicher Handlungsbedarf entstehen, die bisherigen Küstenschutzmaßnahmen anzupassen.




PERSPEKTIVEN IM KLIMAWANDEL



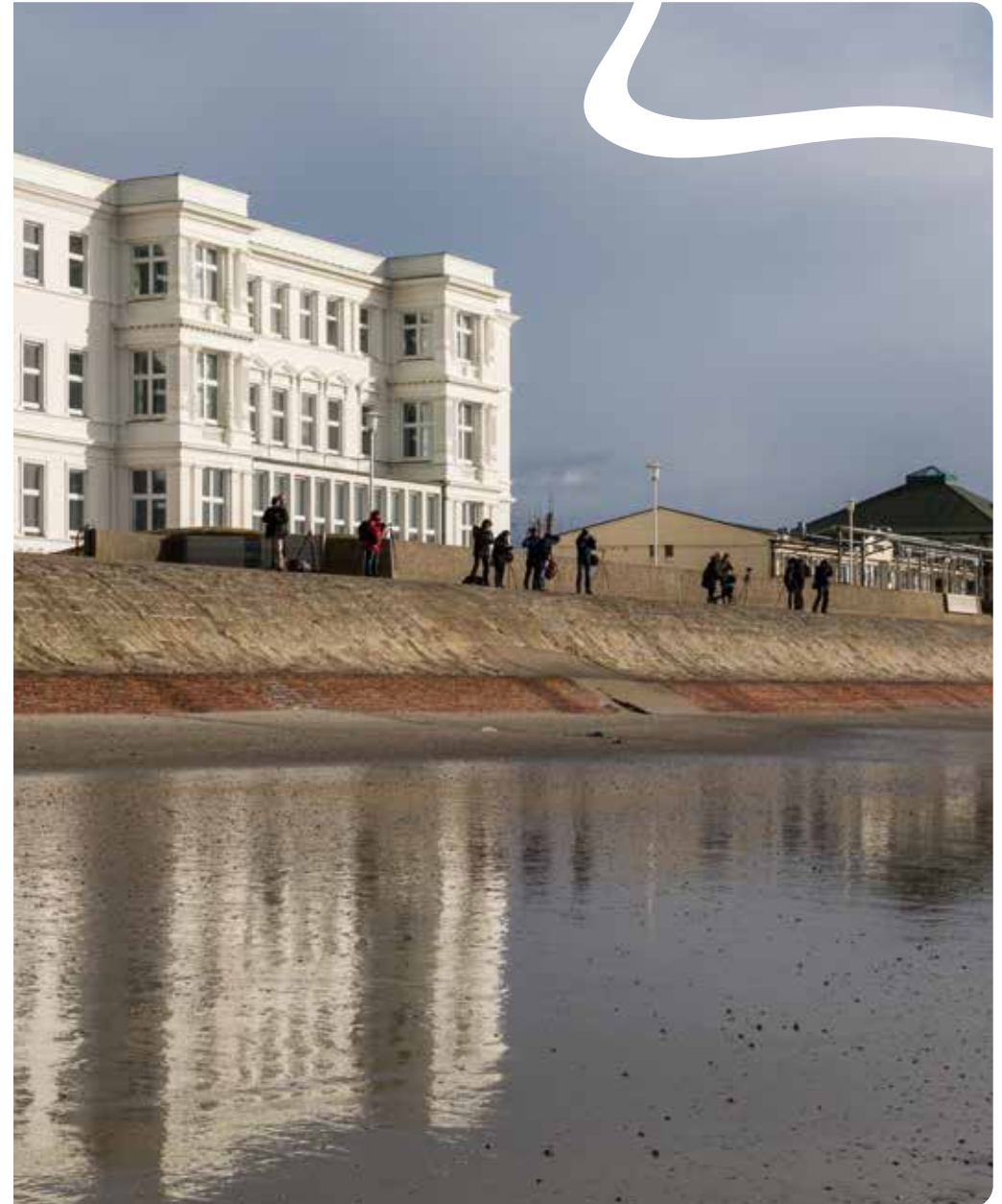
Klimadeiche als Anpassung des Küstenschutzes an den Klimawandel

Seit Beginn des 21. Jahrhunderts wird bei der Planung von Landesschutzdeichhöhen an der Nordseeküste ein beschleunigter Meeresspiegelanstieg berücksichtigt. Dieser sogenannte Klimazuschlag betrug zunächst 50 cm (MEKUN 2022, NLWKN 2021). Im Kontext der Veröffentlichung des IPCC-Sonderberichtes über den Ozean und die Kryosphäre (SROCC) haben sich die norddeutschen Küstenländer auf der Ebene der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA 2020) darauf verständigt, das Szenario eines weiterhin ungebremsen Treibhausgasausstoßes mit beschleunigtem Meeresspiegelanstieg für vorsorgliche Planungen zu Grunde zu legen. Daraufhin wurde der Klimazuschlag auf 1 m erhöht (NLWKN 2021). Da der Meeresspiegelanstieg – je nach künftigem Treibhausgasausstoß – früher oder später 1 m überschreiten wird, soll durch Abflachung der Außenböschung und Verbreiterung der Deichkrone eine zusätzliche Reserve für spätere Verstärkungen von bis zu einem weiteren Meter geschaffen werden (MEKUN 2022, NLWKN 2021). Eine Herausforderung für diese geplante Verbreiterung des Deichprofils stellt die zum Teil sehr geringe Tragfähigkeit des Untergrundes dar, die bereits heute durch den Einsatz von Geowaben ausgeglichen werden muss, damit der Deich nicht absackt. Geotextilmantelte Säulen stabilisieren den Untergrund zusätzlich (MEKUN 2022). Die hinzukommende Last durch eine später notwendige Deicherhöhung muss bereits heute in der Planung berücksichtigt werden, da




Eine Herausforderung für die geplante Verbreiterung des Deichprofils stellt die zum Teil sehr geringe Tragfähigkeit des Untergrundes dar, zudem stößt der zusätzliche Flächenbedarf vielerorts an Grenzen.

sich der Deich bei weiterem Ausbau andernfalls absenken könnte. Abgesehen von dem auch in Deutschland zunehmenden Sandmangel, steht die Kleientnahme für den Deichbau in Konkurrenz zum Naturschutz und zur Landwirtschaft, da Kleiböden sehr nährstoff- und ertragreich sind. Zudem stößt der zusätzliche Flächenbedarf für die notwendige Profilverstärkung dieser sogenannten Klimadeiche gegenwärtig dort an Grenzen, wo unmittelbar hinter dem Deich Bebauung vorhanden ist. Seewärts grenzt der Deich oft direkt an natur- und küstenschutzrelevantes Deichvorland (MEKUN 2022, Ahlhorn 2017), das durch einen Ausbau in diesen Bereichen geschmälert werden und potentiell verstärkt erodieren kann.



Stärkere Belastung von Küstenschutzbauwerken und Erosion

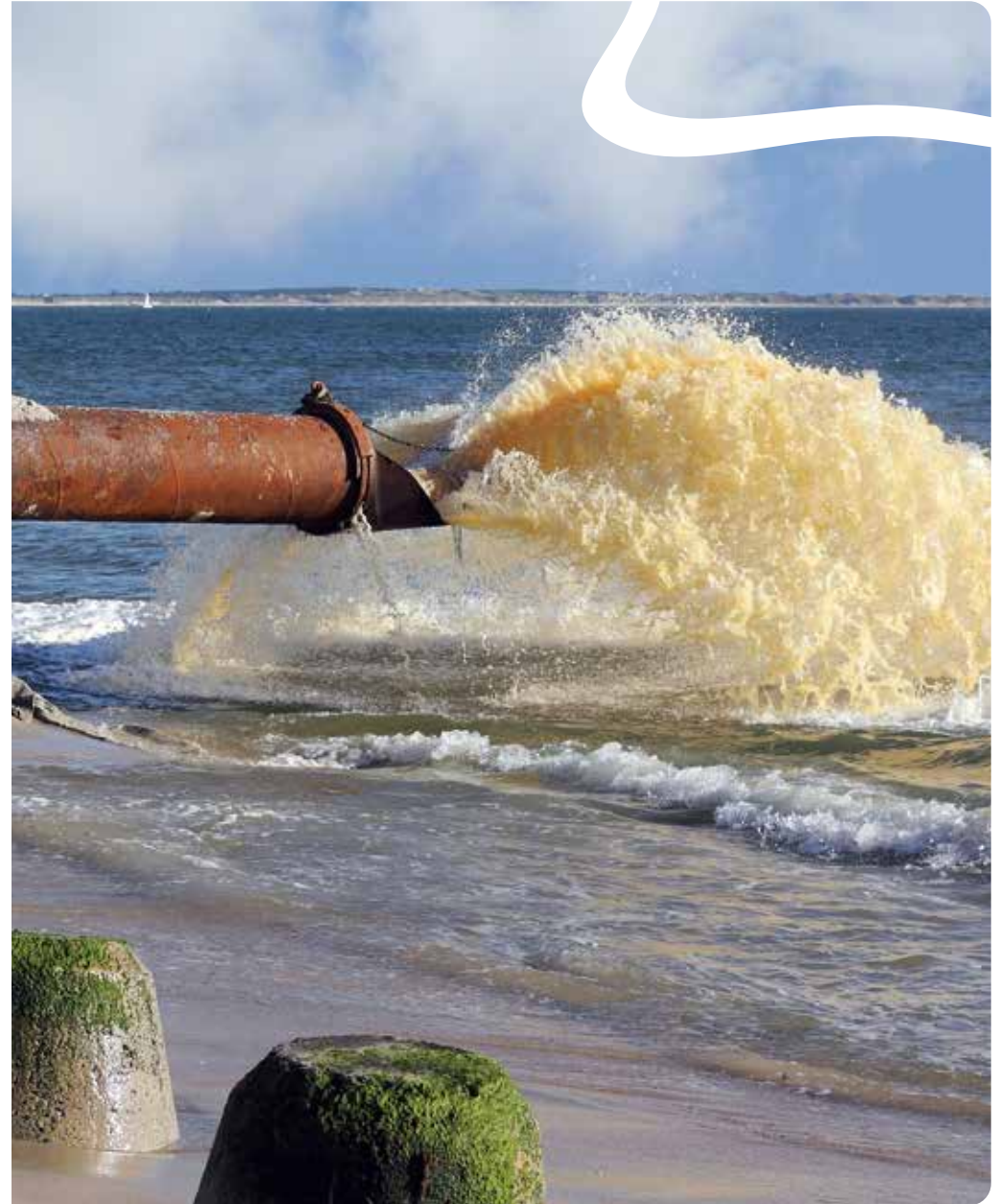
Wie hoch Sturmfluten und damit auch die Wellen künftig am Deich auflaufen, wird auch stark von der Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs abhängen und davon, inwieweit Sedimentationsprozesse im Wattenmeer weiterhin in der Lage sind, mit den künftigen Anstiegsraten Schritt zu halten. Durch steigende Sturmflutwasserstände nimmt auch die Wellenhöhe im unmittelbaren Küstenvorfeld zu, die hier durch die Wassertiefe begrenzt wird. Höhere Wellen führen zu stärkeren Umlagerungen von Sedimenten und erhöhen die Belastungen an Küsten- und Hochwasserschutzanlagen. Bei weiter ungebremstem Treibhausgasausstoß und beschleunigtem Meeresspiegelanstieg können die Küstenschutzfunktionen der Wattflächen infolge des Sedimentdefizits bereits Mitte des Jahrhunderts deutlich beeinträchtigt werden. Dies verstärkt die hydrologischen Belastungen von Küstenschutzanlagen, der Aufwand für die Unterhaltung der Küstenschutzbauwerke erhöht sich und deren Schutzwirkung lässt nach (MEKUN 2019). Zusätzlich kann auch Infrastruktur von morphologischen Änderungen betroffen sein, wenn z. B. Gaspipelines oder Kabeltrassen für Datenanbindungen oder Offshore-Windenergie freigelegt werden. Außerdem erodieren Salzwiesen an der Außenkante und verschmälern sich, wodurch ihre Schutzwirkung bei Sturmfluten ebenfalls nachlässt.



Bei weiter ungebremstem Treibhausgasausstoß und beschleunigtem Meeresspiegelanstieg können die Küstenschutzfunktionen der Wattflächen infolge des Sedimentdefizits bereits Mitte des Jahrhunderts deutlich beeinträchtigt werden.

Bei erfolgreicher Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen kann diese Entwicklung zwar deutlich verzögert, auf lange Sicht (Ende des Jahrhunderts) jedoch ohne zusätzliche Anpassungsmaßnahmen nicht vermieden werden (*MEKUN 2019*).


Als effizienteste Maßnahme wird in diesem Zusammenhang ein Sedimentmanagement angesehen, bei dem geeignete Sande aus der vorgelagerten Nordsee in das Watt eingebracht werden. Zudem sollten Küstenschutzmaßnahmen die Erosion nicht weiter verstärken, sondern die Ablagerung der Sande unterstützen (*MEKUN 2019, Reise 2015*).



Grundwasserversalzung

Die fortschreitende Versalzung von Grundwasserressourcen als Folge des Meeresspiegelanstiegs ist eine weitere große Herausforderung an der Küste. Auch die Dünen auf den Nordseeinseln sind durch den künftigen Meeresspiegelanstieg verstärkt gefährdet. Als Bestandteil des Küstenschutzes schützen sie nicht nur die Inseldörfer, sondern auch die Süßwasserlinsen. Durch Versickerung von Niederschlagswasser sind diese Linsen die einzigen Süßwasserressourcen der Inseln. Bis auf wenige Ausnahmen werden sie zur lokalen Trinkwasserversorgung der Nordseeinseln genutzt. Die schützenden Dünen unterliegen als sandige Körper direkt der Erosion; mit zunehmender Sturmflutaktivität nehmen Dünenabbrüche nach Ausmaß und Häufigkeit zu (NLWKN 2010). Zudem wächst die Gefahr einer Überflutung; eine schnelle und starke Grundwasserversalzung durch Salzwasserinfiltration wäre die Folge. Die Trinkwasserversorgung wäre dann durch das von oben einsickernde Salzwasser für lange Zeit unmöglich (NLWKN 2005). Die Schutzfunktion der Dünen wird vor allem durch eine ausreichende Breite gewährleistet, die nur durch Sandauffüllungen aufrechterhalten werden kann. Weiterhin müssen Schutzdünen durch eine möglichst geschlossene Vegetationsdecke ihrerseits gegen windbedingte Erosion geschützt werden, um sie räumlich zu fixieren (NLWKN 2010).

Auch auf dem Festland wächst die Gefahr der Grundwasserversalzung. Je höher der Meeresspiegel der Nordsee steigt, desto größer wird der Höhenunterschied zwischen Meer und eingedeichtem Land (vgl. Kap. Herausforderungen durch menschliche Einflüsse). Dadurch wächst auch der Druck des



Dünen leisten auf den meisten Nordseeinseln auch Trinkwasserschutz. Mit zunehmender Sturmflutaktivität nehmen Erosion und Dünenabbrüche zu.

Salzwassers auf die grundwasserführenden Schichten weiter an. Die zunehmende Versalzung beeinträchtigt die Nutzung des Grundwassers in der Landwirtschaft. Insbesondere in den Frühlings- und Sommermonaten wird sich deren Bewässerungsbedarf künftig noch erhöhen, da der Trockenstress der Kulturpflanzen aufgrund der erhöhten Verdunstung zunimmt. Bei Spätfrost setzt der gestiegene Salzgehalt des Grundwassers die Wirksamkeit der Frostschutzberegnung im Obstbau herab.

Technische Lösungen wie z. B. der Einsatz von hydraulischen oder physikalischen Barrieren und technische Meerwasserentsalzung können den Salzwassereintrag vermindern, sind jedoch kostenintensiv; außerdem ist unklar, inwieweit sich ihre Wirksamkeit aufrechterhalten lässt. Längerfristig könnte der fortschreitende Salzwassereintrag verlangsamt werden, indem Entwässerungsmaßnahmen und Grundwasserentnahmen reduziert werden (UBA 2021).





Durch den Klimawandel ist künftig mit zunehmendem Winterniederschlag zu rechnen. Dem erhöhten Entwässerungsbedarf stehen aufgrund des Meeresspiegelanstiegs geringere Sielzeiten gegenüber.

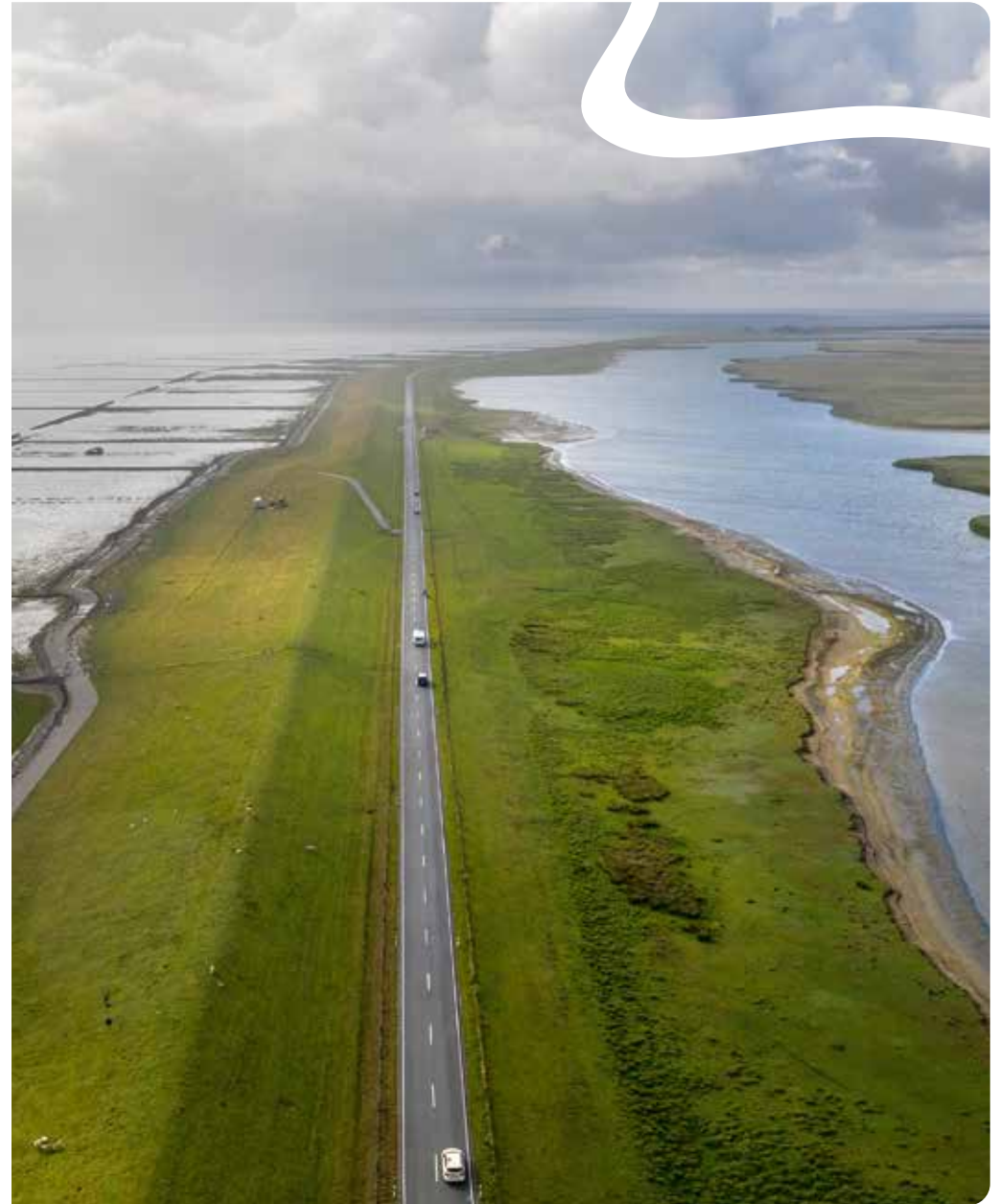
Entwässerung

Ein weiteres Problem, das sich durch den Klimawandel verstärken wird, stellt die Entwässerung großer Teile des Küstenhinterlands dar, die bereits heute unterhalb des Meeresspiegels liegen und durch Deiche geschützt werden (vgl. Kap. Herausforderungen durch menschliche Einflüsse). Diese werden derzeit mithilfe von Sielen entwässert, zunehmend aber auch mithilfe von Pumpen. Durch den Meeresspiegelanstieg werden die potentiellen Sielzeiten geringer, in denen das Wasser aus den niedrig gelegenen Bereichen mit natürlichem Gefälle außendeichs geleitet werden kann (Spiekermann et al. 2018). Infolgedessen steigt der (Energie-)Aufwand durch den zunehmenden Pumpbetrieb, wenn der Status quo der Binnenentwässerung erhalten werden soll. Neben dem Meeresspiegelanstieg tragen zunehmende Niederschlags- und Abflussmengen in den Wintermonaten zu einer Verschärfung der Situation der Binnenentwässerung bei. Eine zentrale Rolle spielt auch hier die Entwicklung der Sturmflutaktivität, da beim Zusammentreffen von mehreren aufeinander folgenden Sturmfluten und ergiebigen Regenfällen die Leistungsfähigkeit der Entwässerungsinfrastruktur schon heute an ihre Grenzen stößt. Die Folge ist eine Häufung kritischer Situationen trotz des aufwändigen technischen Ausbaus im Rahmen der Umsetzung der bisherigen wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung (Bormann et al. 2009).

Dem zunehmenden Entwässerungsbedarf kann zwar mittelfristig mit der Erweiterung bestehender Entwässerungsverfahren begegnet werden, der Neubau von weiteren Schöpfwerken ist jedoch zeit- und kostenintensiv und ihr Betrieb hat im Vergleich zu Sielen einen sehr hohen Energiebedarf.

Außerdem werden immer häufiger Situationen eintreten, in denen die geodätische Förderhöhe der Schöpfwerke durch hohe Nordseewasserstände überschritten wird. Dadurch bedingte Unterbrechungen der Entwässerung werden infolgedessen zunehmen (*UBA 2021*).

Es erscheint daher unumgänglich, auch die Flächen- und Landnutzung an die zunehmenden Wassermengen in den eingedeichten Marschgebieten anzupassen. Neben der Schaffung/Erweiterung von Überschwemmungs- bzw. Retentionsflächen sollten Anpassungsmaßnahmen für alle Nutzungsarten (Landwirtschaft, Verkehr, Siedlungsbau und Industrie) entwickelt werden.



KÜSTENENTWICKLUNG UNTER DEM ASPEKT DER NACHHALTIGKEIT

Vor dem Hintergrund, dass der Meeresspiegel auch an der Nordseeküste noch über viele Jahrhunderte weiter ansteigen wird und sich zum Teil bereits heute die Grenzen bisheriger Küstenschutzmaßnahmen abzeichnen, ist es notwendig, neben den aktuellen Planungen langfristig wirksamere Ansätze zu entwickeln.

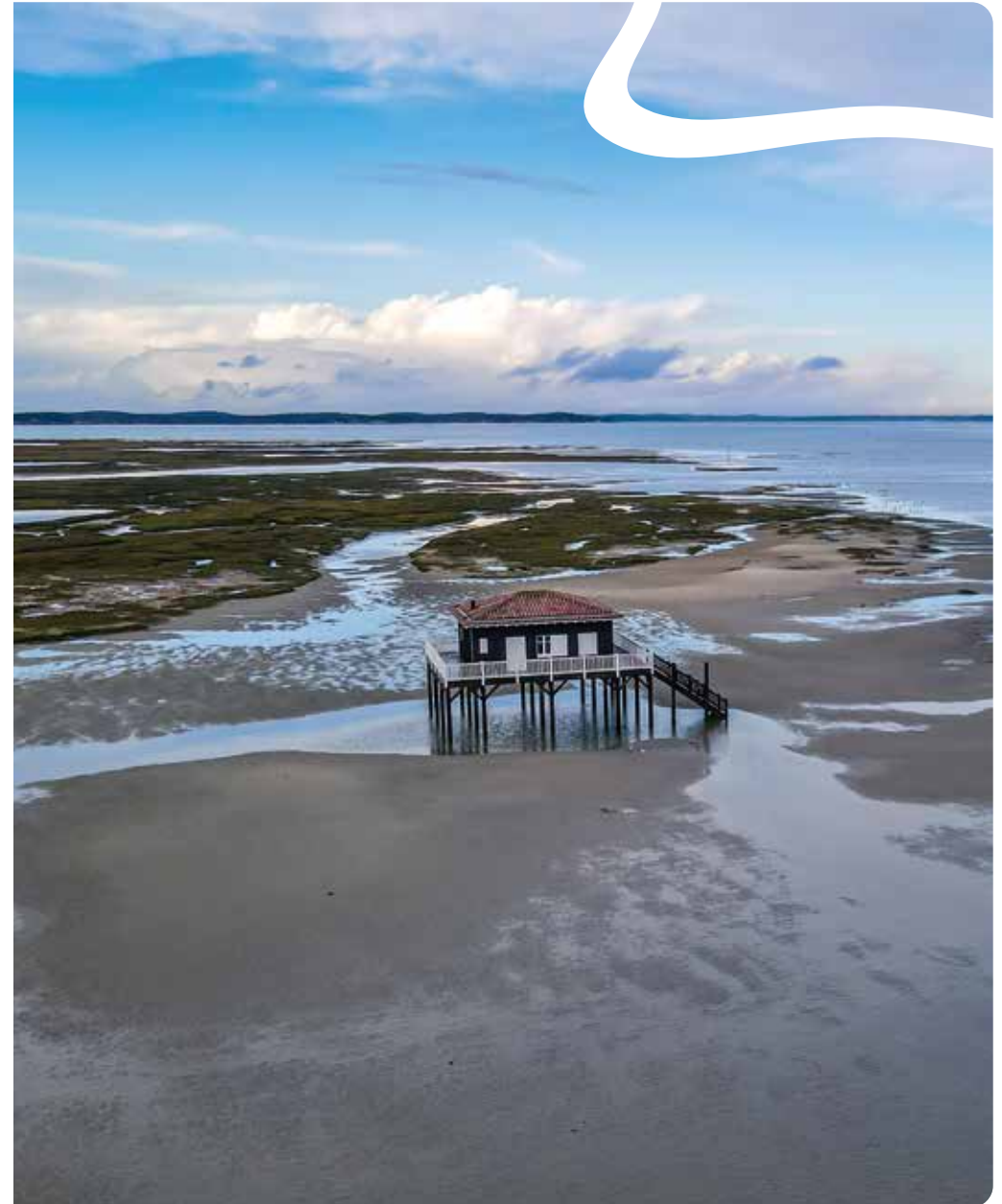
Der Wohlstand, aber auch die Herausforderungen der deutschen Nordseeküste stehen in engem Zusammenhang mit den Küstenschutzmaßnahmen der Vergangenheit. Das hohe Schutzniveau der Deiche ermöglichte die wirtschaftliche Entwicklung der Küstenregion und sicherte sie. Gleichzeitig machte die nahezu geschlossene Deichlinie ihre fortlaufende Ertüchtigung und den technischen Ausbau eines komplexen Entwässerungssystems zur Daueraufgabe. Erosion im Deichvorland und fortschreitende Versalzung des küstennahen Grundwassers sind ökologische Folgen dieser Maßnahmen, die weiteren Anpassungsbedarf erzeugen. Eine fortbestehende Fokussierung des Küstenschutzes auf bisherige Maßnahmen wie Deicherhöhung und -verbreiterung, künstliche Entwässerung und technische Lösungen zur Vermeidung von Grundwasser- versalzung wird mit zunehmendem Meeresspiegelanstieg immer aufwändiger und kostenintensiver. Fehlende oder unzureichende finanzielle Mittel können die Kapazitäten von Sandaufspülungen auch dann beschränken, wenn langfristig ausreichend geeigneter Sand zur Verfügung steht. Denn mit zunehmendem Meeresspiegelanstieg wird der zeitliche Abstand zwischen zwei Aufspülungen immer kürzer, so dass die Kosten stark steigen werden. Aber auch technische Grenzen der Fortführung bisheriger Anpassungsmaßnahmen zeichnen sich bereits heute ab. So werden früher oder später Deicherhöhungen in größerem Maße erforderlich sein, als dies heute bei der Planung und Stabilisierung des Untergrundes berücksichtigt wird. Die Tragfähigkeit des Untergrundes reicht dann jedoch ohne zusätzliche Maßnahmen nicht mehr aus. Bei Schöpfwerken kann das Erreichen der geodätischen Förderhöhe eine temporäre technische Leistungsgrenze darstellen (LAWA 2020), die immer öfter überschritten wird. Zudem kann die gesellschaftliche Akzeptanz für die erforderlichen Maßnahmen schwinden, insbesondere wenn

Steuergelder für den Küstenschutz bundesweit erhöht würden und in Norddeutschland Interessengruppen profitierten, denen bisher suggeriert wurde, dass allein staatliche Organe für die Klimaanpassung sorgen müssen, damit ihr individuelles Lebensumfeld unverändert bleiben kann.

Insbesondere vor dem Hintergrund, dass der Meeresspiegel auch an der Nordseeküste noch über viele Jahrhunderte weiter ansteigen wird und sich zum Teil bereits heute die Grenzen bisheriger Küstenschutzmaßnahmen abzeichnen, ist es notwendig, neben den aktuellen Planungen langfristig wirksamere Ansätze zu entwickeln. Klimaanpassungsstrategien an der Nordseeküste können nur dann langfristig wirksam sein, wenn die regionale Ausprägung des Klimawandels, die natürlichen Prozesse und die Wechselwirkungen menschlicher Eingriffe gleichermaßen berücksichtigt werden.

Eine nachhaltige Küstenentwicklung erfordert eine ganzheitliche Betrachtung. Dabei wird die Verantwortung für die heute lebenden Menschen mit der Verantwortung für zukünftige Generationen verbunden. Nachhaltigkeitspolitik wird als ein Geflecht verstanden, in dem insbesondere einzelne Politikbereiche nicht mehr getrennt voneinander betrachtet werden können. Es gilt vielmehr, sie miteinander zu verknüpfen und ausgewogen weiterzuentwickeln (*Deutscher Bundestag 2023*). Kern einer nachhaltigen Entwicklung ist es, die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit – wirtschaftliche Effizienz, soziale Gerechtigkeit und ökologische Tragfähigkeit – als gleichberechtigt anzusehen (*BMZ 2023*). Nachholbedarf bei der bisherigen Küstenentwicklung lässt sich bisher vor allem in puncto ökologischer Nachhaltigkeit erkennen. Ihre Vernachlässigung führt dazu, dass bestimmte Ressourcen und wichtige Ökosystemleistungen unwiderruflich zerstört oder unbrauchbar gemacht werden, was die Chancen für

wünschenswerte Entwicklungen stark mindert (Nowak 2023). Bereits heute sind die Ökosystemleistungen der Watten, Salzwiesen und Marschen für den Küstenschutz und die Entwässerung deutlich beeinträchtigt. Die damit verbundenen Herausforderungen werden durch den Klimawandel verstärkt. Die Wirksamkeit technischer Lösungen wird sich mit dem künftigen Meeresspiegelanstieg weiter vermindern, gleichzeitig werden diese immer kostenintensiver. Eine nachhaltige Küstenentwicklung muss daher auch die ökologische Nachhaltigkeit wiederherstellen. Wir müssen lernen, natürliche Prozesse zu nutzen, um die Küstenregion langfristig als Siedlungs-, Wirtschafts- und Erholungsraum zu erhalten. Eine nachhaltige Küstenentwicklung weist viele Schnittmengen mit den 17 Nachhaltigkeitszielen (*Sustainable Development Goals, SDG*) der Vereinten Nationen auf. Sie erfordert Transformationen in der Wasserwirtschaft (*SDG 6*), in der Gestaltung von Siedlungen und Städten (*SDG 11*) und im Umgang mit Ökosystemen (*SDG 15*). Die Anpassungskapazität steht in direktem Zusammenhang mit der Bedeutung von Klimaanpassung im politischen Kontext und muss von hohen Budgetspielräumen flankiert werden. Die Verantwortung liegt jedoch nicht nur bei der Politik, sondern auch bei jedem Einzelnen. Insgesamt müssen Küstenbewohner, Planer und Investoren offen, lernfähig und entscheidungswillig im Hinblick auf neue Entwicklungen und ökosystembasierte Schutzmaßnahmen sein. Die Aufklärung und die Sensibilisierung in diesem Bereich sind ein weiteres zentrales Nachhaltigkeitsziel (*SDG 13.3*), das die Grundlage für erforderliche Strategien darstellt, um die Küstengemeinden langfristig vor Beeinträchtigungen zu schützen (BMZ 2023).



LITERATUR

Alhorn, F., Meyerdirks, J. (2017): Multifunktionale Räume für Küsten- und Naturschutz. Technical Report, DOI: 10.13140/RG.2.2.15015.19365

Behre, K.-E. (2008): Landschaftsgeschichte Norddeutschlands – Umwelt und Siedlung von der Steinzeit bis zur Gegenwart. Wachholtz, 308 S.

BMZ (2023): Nachhaltigkeit (nachhaltige Entwicklung). <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/nachhaltigkeit-nachhaltige-entwicklung-14700> (zuletzt abgerufen am 31.08.2023)

Böhme, A., Gerkenmeier, B., Bratz, B., Krautwald, C., Müller, O., Goseberg, N., Gönert, G. (2023): Improvements to the detection and analysis of external surges in the North Sea. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 23, 1947–1966, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1947-2023>

Bormann, H., Alhorn, F., Giani, L., Klenke, T. (2009): Climate Proof Areas – Konzeption von an den Klimawandel angepassten Wassermanagementstrategien im norddeutschen Küstenraum. *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2 (2009), S. 363–369.

Deutscher Bundestag (2023): Was ist Nachhaltigkeit? https://www.bundestag.de/aussschuesse/weitere_gremien/pbne/vorstellung/was-ist-nachhaltigkeit-890694 (zuletzt abgerufen am 18.09.2023)

Feser, F., Barcikowska, M., Krueger, O., Schenk, F., Weisse, R., Xia, L. (2015): Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe – A review. In: *Q.J.R. Meteorol. Soc* 141 (687), S. 350–382. DOI: 10.1002/qj.2364

Fischer, L., Reise, K. (Hrsg.) (2011): Küstenmentalität und Klimawandel, Küstenwandel als kulturelle und soziale Herausforderung. ISBN 978-3-86581-221-6, 230 S., München 2011.

Garner, G. G., Hermans, T., Kopp, R. E., Slangen, A. B. A., Edwards, T. L., Levermann, A., Nowicki, S., Palmer, M. D., Smith, C., Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S., Golledge, N. R., Hemer, M., Kopp, M. E., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nurhati, I. S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Yu, Y., Hua, L., Palmer, T., Pearson, B. (2021): IPCC AR6 Sea-Level Rise Projections. Version 20210809. PO.DAAC, CA, USA. <https://podaac.jpl.nasa.gov/announcements/2021-08-09-Sea-level-projections-from-the-IPCC-6th-Assessment-Report> (zuletzt abgerufen am 27.09.2023)

Gaslikova, L., Grabemann, I., Groll, N. (2013): Changes in North Sea storm surge conditions for four transient future climate realizations. *Nat Hazards* 66:1501–1518. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0279-1>

Groll, N., Weisse, R. (2017): A multi-decadal wind-wave hindcast for the North Sea 1949–2014: coastDat2. *Earth Syst Sci Data* 9(2):955–968. <https://doi.org/10.5194/essd-9-955-2017>

Hansen, U. A. (1979): Brandungsstau in Brecherzonen (Kurzfassung). In: *Die Küste*. Heide, Holstein: Boyens, S. 102–103.

Keizer, I., Le Bars, D., de Valk, C., Jüling, A., van de Wal, R., Drijfhout, S. (2023): The acceleration of sea-level rise along the coast of the Netherlands started in the 1960s. *Ocean Sci* 19:991–1007, <https://doi.org/10.5194/os-19-991-2023>

Köster, R. (1998): Wattedimente. *Umweltatlas Wattenmeer, Band 1*, 40–41. Stuttgart. ISBN: 3-8001-3491-8

Krieger, D., Krueger, O., Feser, F., Weisse, R., Tinz, B., von Storch, H. (2020): German Bight storm activity, 1897–2018. *Int J Climatol* 41(S1):E2159–E2177. <https://doi.org/10.1002/joc.6837>

Krueger, O., Feser, F., Weisse, R. (2019): Northeast Atlantic storm activity and its uncertainty from the late nineteenth to the twenty-first century. *J Climate* 32(6):1919–1931. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0505.1>

Lang, A., Mikolajewicz, U. (2020): Rising extreme sea levels in the German Bight under enhanced CO2 levels: a regionalized large ensemble approach for the North Sea. *Clim Dyn* 55:1829–1842. 7 <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05357-5>

LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2020): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder, 113 S. https://www.lawa.de/documents/lawa-klimawandel-bericht-2020-barrierefrei_1689844741.pdf (zuletzt abgerufen am 15.12.2023)

Liu, X., Meinke, I., Weisse, R. (2022): Still normal? Near-real-time evaluation of storm surge events in the context of climate change. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 22:97–116. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-97-2022>

Lowe, J., Gregory, J. (2005): The effects of climate change on storm surges around the United Kingdom. *Phil Trans R Soc A* 363:1313–1328. 7 <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1570>

Mayer, B., Mathis, M., Mikolajewicz, U., Pohlmann, T. (2022): RCP8.5-projected changes in German Bight storm surge characteristics from regionalized ensemble simulations for the end of the twenty-first century. *Frontiers in Climate*, Vol. 4, <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.992119>

MEKUN – Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur des Landes Schleswig-Holstein (2019): Strategie für das Wattenmeer 2100, https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/k/kuestenschutz/Downloads/strategieWattenmeer2100.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (zuletzt abgerufen am 16.08.2023)

MEKUN – Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur des Landes Schleswig-Holstein (2022): Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein Fortschreibung 2022, Kiel, 112 S.

Niedersächsischer Städte- und Gemeindebund (2023): Niedersächsische Allianz Ländlicher Raum schlägt Alarm: Kürzung der GAK-Mittel bewirkt massive Schwächung der ländlichen Räume. <https://www.nsgb.de/botschaften-aus-der-realitaet-2/> (zuletzt abgerufen am 15.09.2023)

NLWKN – Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2005): Information zur Sicherung und Verstärkung der Schutzdüne vor dem Pirolatal auf Langeoog. 6 S.

NLWKN – Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2010): Generalplan Küstenschutz – Ostfriesische Inseln.

NLWKN Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2021): Klimawandel und Küstenschutz: Ein entscheidender Meter mehr – Niedersächsischer Klimadeich und verdopplung des Vorsorgemaßes.

https://www.nlwkn.niedersachsen.de/jb2021/Niedersaechsischer_Klimadeich/klimawandel-und-kustenschutz-ein-entscheidender-meter-mehr-niedersaechsischer-klimadeich-und-verdopplung-des-vorsorgemasses-201169.html (zuletzt abgerufen am 15.12.2023)

Nowak, A. (2023): Ökologische Nachhaltigkeit. In: Gabler Wirtschaftslexikon. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/oekologische-nachhaltigkeit-53450> (zuletzt abgerufen am 31.08.2023)

Reise, K. (2015): Kurswechsel Küste – Was tun, wenn die Nordsee steigt? ISBN 978-3-529-05394-8, 200 S.

Spiekermann, J., Ahlhorn, F., Bormann, H., Kebschull, J. (2018): Zukunft der Binnenentwässerung: Strategische Ausrichtung in Zeiten des Wandels. Eine Betrachtung für das Verbandsgebiet des I. Entwässerungsverbandes Emden. Universität Oldenburg; Küste und Raum; Jade Hochschule. DOI: 10.13140/RG.2.2.26977.56167

Spiekermann, J., Franck, E. (2014): Anpassung an den Klimawandel in der räumlichen Planung. Handlungsempfehlungen für die niedersächsische Planungspraxis auf Landes- und Regionalebene. Akad. für Raumforschung und Landesplanung, Hannover.

Steffelbauer, D.B., Riva, R., Timmermans, J., Kwakkel, J. (2022): Evidence of regional sea-level rise acceleration for the North Sea. *Environ. Res. Lett.* 17 074002. DOI: 10.1088/1748-9326/ac753a

UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. 277 S.

Weisse, R., von Storch, H., Niemeier, H., Knaack, H. (2012): Changing North Sea storm surge climate: An increasing hazard? *Ocean Coast Manag* 68:58–68. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.09.005>

Weisse, R., Meinke, I. (2016): Meeresspiegelanstieg, Gezeiten, Sturmfluten und Seegang. In: Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. ISBN: 978-3-3662-50396-6

Weisse, R. (2018): Sturmfluten und Seegang. In: Lozán, J. L., Breckle, S.-W., Graßl, H., Kasang, D., Weisse, R. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Extremereignisse. S. 222–227. <https://doi.org/10.25592/uhhfdm>.

Websites:

kuestenschutzbedarf.de
meeresspiegel-monitor.de
norddeutscher-klimaatlas.de
sturm-monitor.de
sturmflut-monitor.de

BILDNACHWEIS

- © Pixabay (Titel)
- © Bundesanstalt für Wasserbau CC BY 4.0 (S. 3)
- © Bundesanstalt für Wasserbau CC BY 4.0 (S. 7)
- © Creative-Commons-Lizenz/Arne Hüchelheim (S. 9)
- © Pixabay (S. 11)
- © gerckens.photo – stock.adobe.com (S. 14)
- © Bundesanstalt für Wasserbau CC BY 4.0 (S. 15)
- © Creative-Commons-Lizenz/Viola sonans (S. 18)
- © Pixabay (S. 19)
- © iStock.com/Steffen_F (S. 21)
- © CC BY-SA 3.0/Wikipedia/GNU Free Documentation License (S. 23 oben)
- © Pixabay (S. 23 unten)
- © Creative-Commons-Lizenz CC0 1.0 Verzicht auf das Copyright (S. 24)
- © Pixabay (S. 25)
- © Pixabay (S. 27)
- © Insa Meinke (S. 28)
- © Insa Meinke (S. 29)
- © FotoStuss – stock.adobe.com (S. 30)
- © Michael Fritz (S. 31)
- © Pixabay (S. 34)
- © Olaf Kosinsky (kosinsky.eu), Lizenz: CC BY-SA 3.0-de (S. 35)
- © Creative-Commons-Lizenz/Coder2k (S. 37)
- © Dietmar Rabich/Wikimedia Commons/„Norderney, Weststrand, Hotel -- 2018 -- 1050“/CC BY-SA 4.0 (S. 40)
- © Creative-Commons-Lizenz/E-W (S. 41)
- © Konrad Weiss – stock.adobe.com (S. 44)
- © Creative-Commons-Lizenz/W. Bulach (S. 45)
- © Creative-Commons-Lizenz/Lämpel (S. 48)
- © Creative-Commons-Lizenz/Ra Boe/Wikipedia (S. 49)
- © Bundesanstalt für Wasserbau CC BY 4.0 (S. 52)
- © iStock.com/digitalimagination (S. 53)
- © iStock.com/thierry64 (S. 58)
- © Bundesanstalt für Wasserbau CC BY 4.0 (S. 63)



IMPRESSUM

Herausgeber

Norddeutsches Küsten- und Klimabüro
Helmholtz-Zentrum Hereon
Max-Planck-Str. 1
21502 Geesthacht

Telefon: 04152 87 1868
insa.meinke@hereon.de
www.kuesten-klimabuero.de

Gestaltung

Michael Fritz Kommunikationsdesign, Hamburg

Auflage

3000

Geesthacht, Januar 2024

ISBN 978-3-940923-14-1

Gedruckt auf 100 Prozent Recyclingpapier
Klimaneutral



www.blauer-engel.de/uz195

- ressourcenschonend und umweltfreundlich hergestellt
- emissionsarm gedruckt
- hauptsächlich aus Altpapier

FD2

Dieses Druckerzeugnis wurde mit dem Blauen Engel ausgezeichnet.



Druckprodukt mit finanziellem

Klimabeitrag

ClimatePartner.com/13032-2311-1011



RECYCLED
Papier aus
Recyclingmaterial
FSC® C095223