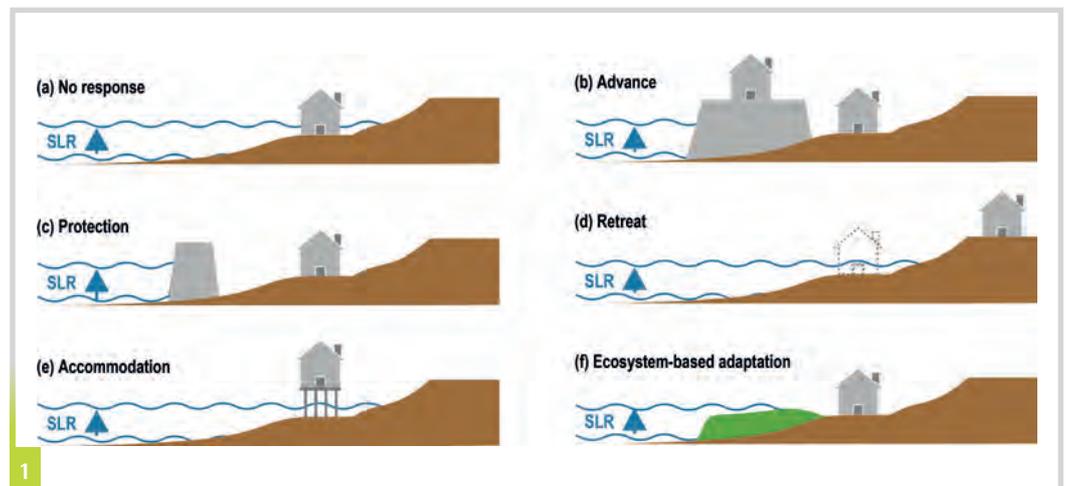


Veränderungen des Meeresspiegels

Unmittelbare Folgen, mittelfristige Wirkungen und nachhaltige Maßnahmen zur Anpassung

Der Meeresspiegelanstieg und seine Folgewirkungen stellen Küstengemeinden in der Gegenwart und für die kommenden Jahrzehnte vor erhebliche Herausforderungen.

Wissenschaftler*innen des Ludwig-Franzius-Instituts stellen den aktuellen Stand der Forschung zu den Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs sowie potenziellen Anpassungsstrategien vor.



Der Klimawandel schreitet uneingeschränkt und mit schwerwiegenden Konsequenzen voran. Es ist nachgewiesen, dass menschliche Aktivitäten die globale Erwärmung verursachen und weiter vorantreiben. Natürliche Prozesse und Stressoren wurden verstärkt und werden bei uneingeschränkten CO₂-Emissionen weiterhin angefacht. Die unmittelbaren Folgen bewirken dabei nicht nur Veränderungen in der Atmosphäre, in der Kryosphäre und Biosphäre, sondern es werden Auswirkungen im Ozean und an den Küsten bereits heute beobachtet, die sich mittelfristig deutlich intensivieren werden.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, muss nicht nur die Wahrnehmung für diese Veränderungen erhöht und das Verständnis für die Folgen des Meeresspiegelan-

stiegs verbessert werden. Es muss dazu auch ein breites gesellschaftliches Bewusstsein über die mittelfristigen Wirkungen geschaffen und Handlungswissen für nachhaltige Maßnahmen zur Anpassung der Küsten bereitgestellt werden. Denn seit der Mensch begonnen hat, Küsten, Inseln oder Flussmündungen zu besiedeln, versucht er, sich vor der Kraft des Meeres zu schützen und gleichzeitig die sich ihm bietenden Ressourcen zu nutzen und Lebensräume zu erschließen. Die heute weithin bekannten unmittelbaren Folgen des Klimawandels spiegeln sich in Wetter- und Klimaextremen wider – zum Beispiel Extremtemperaturen, Dürren und Überflutungen in allen Regionen der Welt – und führen unweigerlich zu steigenden Verlusten und Schäden für Mensch und Natur. Noch weitreichendere Verlus-

te werden infolge des Anstiegs des Meeresspiegels erwartet, der als unmittelbare Folge des globalen Klimawandels zahlreiche Effekte im Küstenraum nach sich zieht.

Diese Entwicklungen verlangen sowohl eine höhere gesellschaftliche und politische Aufmerksamkeit als auch sorgfältig untersuchte und nachhaltige Reaktionen. Für den langfristigen Erhalt des Lebens- und Wirtschaftsraums bei gleichzeitigen Effekten aus Verstädterung und Bevölkerungswachstum stellen sich Fragen, wie ein zukünftiger Schutz der Küsten gewährleistet werden kann, welche Folgen konkret zu erwarten sind und wie sich die Lebensgrundlagen in flachen Küstengebieten in welchen Zeiträumen verändern werden. Beratungen und Entscheidungsprozesse müssen

Abbildung 1
Grundlegende Strategien zur Anpassung an den Meeresspiegelanstieg.
Quelle: Oppenheimer et al. (2019): *Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities*. In H.-O. Pörtner et al. (Hrsg.), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, Cambridge University Press

dabei alle denkbaren Optionen der Anpassung exponierter Küsterräume vorausschauend ausloten (s. Abb. 1). Damit geht ein Paradigmenwechsel im Küstenschutz einher und grundsätzliche Lösungsansätze und Strategien werden zum Beispiel auf sogenannten Anpassungspfaden aufgestellt, um so mit Blick auf zukünftige Entwicklungen rechtzeitig den Finanzierungsrahmen zur Neuausrichtung von Anpassungszielen oder zur Verbesserung von Schutzniveaus zu diskutieren. Dazu kommen alternative Ansätze des gezielten Rückzugs aus exponierten Gebieten oder des weichen beziehungsweise ökosystembasierten Küstenschutzes, die vielfach zusätzliche Vorteile mitbringen, aber teilweise noch belastbare Wirkungsnachweise erfordern.

Dass der Meeresspiegelanstieg küstennahe Megacities, dicht besiedelte Küstengebiete, ungeschützte Flussmündungen und exponierte kleine Inselstaaten gefährdet, ist hinlänglich bekannt. Absolut ist der Meeresspiegel zwischen 1901 und 2018 global im Mittel um circa 25 Zentimeter gestiegen, davon allein zwischen 1971 und 2018 um etwa 15 Zentimeter. Es ist nachgewiesen, dass es niemals größere Raten des Meeresspiegelanstiegs gab und dieser eine unmittelbare Folge des menschengemachten Klimawandels ist. Die treibenden Faktoren des Meeresspiegelanstiegs liegen einerseits in der thermalen Expansion des Wasserkörpers infolge der Erwärmung der Atmosphäre und andererseits in der Massenzunahme des Ozeans durch das Abschmelzen von Gletschern, vor allem auf Grönland und in der Antarktis. Die Anstiegsraten betragen heute global im Mittel mehr als vier Millimeter pro Jahr – Tendenz steigend (s. Abb. 2), was eine Beschleunigung des Anstiegs darstellt.

Seit Anfang der 1990er Jahre belegen Satellitenbeobachtungen, dass erhebliche regionale Unterschiede in der Veränderung des Meeresspiegels in den Weltmeeren vorherrschen. Ein breit verteiltes Netz von Messstationen erfasst seither die Veränderungen kontinuierlich, um die Prozesse dahinter besser zu verstehen und Projektionen zukünftiger Entwicklungen daraus abzuleiten. Der auf diese Weise be-

folgt hat und sich mit dem absoluten Anstieg des Meeresspiegels überlagert.

Die Entwicklung des Meeresspiegelanstiegs in der Zukunft ist direkt mit den globalen Treibhausgasemissionen und dem damit verbundenen Temperaturanstieg verknüpft. Falls die Emissionen ungebremst weiter wie bisher zunehmen, muss mit 60 bis 110 Zentimetern Anstieg bis Ende

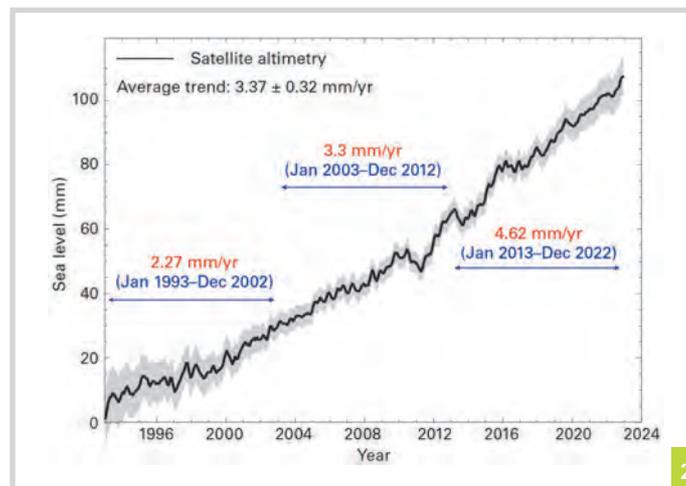


Abbildung 2
Gemittelter globaler Meeresspiegelanstieg [in Millimetern] zwischen 1993–2022 sowie dessen Unsicherheitsbänder (grau) und die beobachteten jährlichen Anstiegsraten in drei aufgezeigten Zeiträumen (linear fitting).
Quelle: World Meteorological Organisation (2023): State of the Global Climate 2022

obachtete Anstieg überlagert sich mit natürlichen Schwankungen des Meeresspiegels, so dass dieser regional auch kurzzeitig abnehmen kann, zum Beispiel beeinflussen El-Niño- und La-Niña-Phänomene die regionale Ozeanerwärmung und prägen sich auf den Meeresspiegel aus. Der sogenannte postglaziale isostatische Ausgleich (GIA) bewirkt wiederum langfristige Hebungen beziehungsweise Senkungen der Landflächen an den Küsten, die während der letzten Eiszeiten von Inlandeis bedeckt waren, sodass der Meeresspiegel auch relativ abnehmen kann, zum Beispiel in Skandinavien. In vielen Küstenmetropolen nimmt der relative Meeresspiegelanstieg wiederum drastisch zu, da anthropogene Nutzungen, wie Grundwasserentnahme zur Trinkwasserbereitstellung, ein Absinken der Landflächen zur

dieses Jahrhunderts gerechnet werden. Sofern die Erwärmung dem Paris-Szenario entsprechend auf deutlich unter zwei Grad Celsius begrenzt wird, müssen wir im Vergleich zu heute immer noch von einem zusätzlichen Anstieg im globalen Mittel von 30 bis 60 Zentimetern bis 2100 ausgehen. Wichtig zu beachten ist, dass der Meeresspiegel über das Ende dieses Jahrhunderts noch lange Zeit weiter ansteigen wird, auch wenn die gesetzten Klimaschutzziele zwischenzeitlich erreicht wurden. Der IPCC-Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima (SROCC) projiziert einen möglichen maximalen Anstieg um bis zu 5,40 Meter bis zum Jahr 2300 infolge ungehinderter Treibhausgasemissionen. Indes ist klar, dass Ausmaß und Beschleunigung des Meeres-

spiegelanstiegs insbesondere davon abhängen, wie sich die Änderungen der kontinentalen Eisschilde in Grönland und der Antarktis entwickeln. Auch wenn wir in den nächsten Jahren das viel zitierte 1,5°C-Ziel zur Eindämmung der Klimaerwärmung einhalten, wird der Meeresspiegel global im Mittel trotzdem weiter steigen und gegenüber heute die Marke von +2,0 Metern in 2300 erreichen.

teils in den Küstenräumen Asiens und Afrikas liegen. Die Steigerung des Bewusstseins über diese Veränderungen und die Notwendigkeit der Anpassung und langfristigen Transformation dieser exponierten Räume sind demnach unabdingbar.

Als mittelfristige Wirkung des Meeresspiegelanstiegs werden häufigere Extremwasserstände durch Sturmfluten erwar-

passte Schutzvorkehrungen zu erheblichen Schäden und unweigerlichen Verlusten führen.

Auch die Gezeitendynamik im Küstenmeer und in den angrenzenden Flussmündungen wird sich mittelfristig verändern. Es ist nachgewiesen, dass die Amplituden der halbtäglichen M2-Tide bei einem Meeresspiegelanstieg von etwa 80 Zentimetern in der

Abbildung 3
(A) Darstellung der jährlichen Investitionen in den Küstenschutz an der Küste von Mecklenburg-Vorpommern zwischen 1990 und 2018. (B) Aufspülmenge in Tausend Kubikmetern zwischen 1964 und 2018.
Quelle: Tiede et al. (2023): Long-term shoreline changes at large spatial scales at the Baltic Sea: remote-sensing based assessment and potential drivers. *Frontiers in Marine Science*, 10:1207524

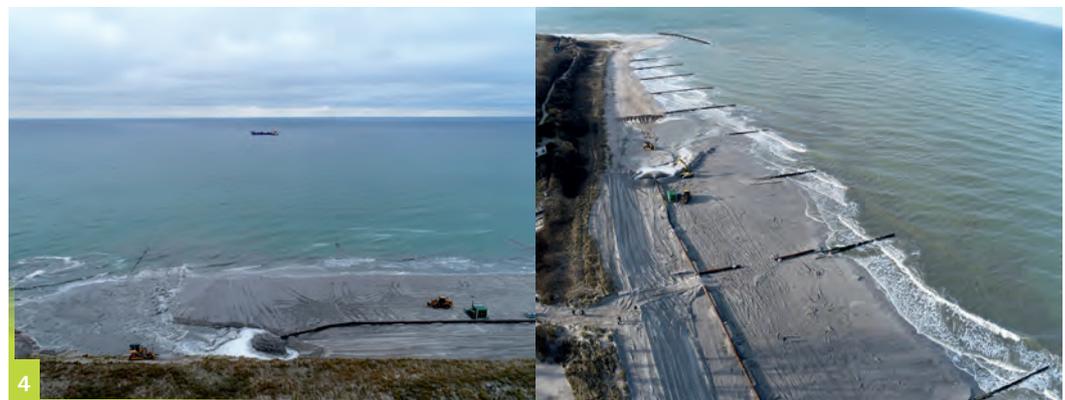
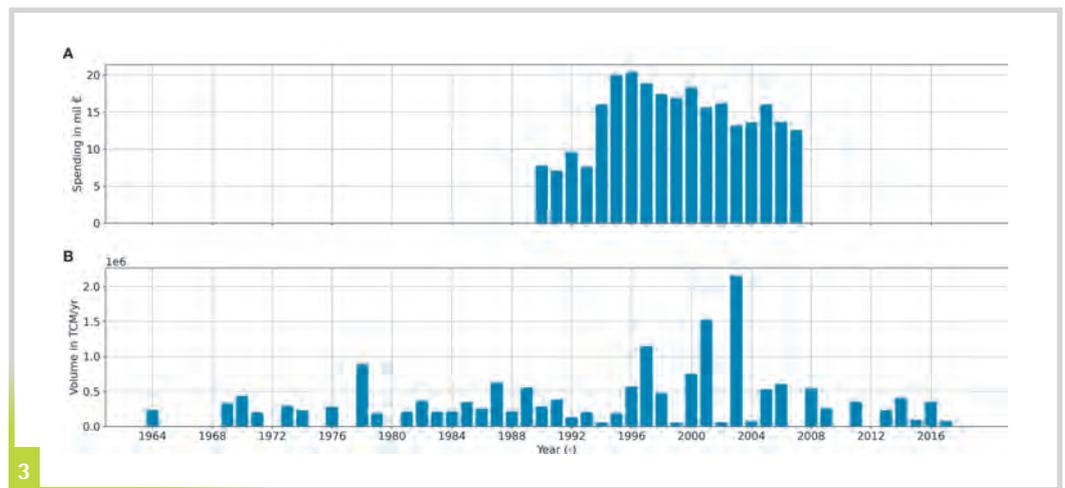


Abbildung 4
Untersuchte Sandaufspülung im Forschungsprojekt ECAS-Baltic bei Ahrenshoop, Ostsee.
Fotos: J. Tiede

Zeitgleich nehmen Nutzungs- und Besiedlungsdruck an den Küsten zu: Im Jahre 2030 werden weltweit circa eine Milliarde Menschen in Küstenniederungen leben. Und schon 30 Jahre später werden es 1,5 Milliarden Menschen in küstennahen Megacities und stark urbanisierten, dicht besiedelten Räumen sein. Jeder vierte Mensch wird dann in Megacities leben, die größten-

tet, das heißt Hochwasser, die bisher statistisch einmal in 100 Jahren aufgetreten sind, wiederholen sich deutlich häufiger, zum Beispiel mit einer 10- oder 20-jährlichen Auftretenswahrscheinlichkeit. Im Umkehrschluss werden neue 100-jährliche Extreme mit weit höheren Wasserständen an den Küsten auftreten und ohne rechtzeitig hergestellte beziehungsweise ange-

Deutschen Bucht um etwa 20 Zentimeter ansteigen werden, was wiederum zu einer Veränderung der Tidenströmungen führt und beispielsweise eine sogenannte Flutstromdominanz der angrenzenden Flüsse wie Elbe und Weser verstärken kann. Die dadurch verursachte Ungleichheit zwischen Sedimenteintrag und -austrag zieht einen erhöhten Bedarf an Baggerungen in den

Seehäfen nach sich und ist nur ein Beispiel der nachgewiesenen kausalen Verkettung von Prozessen mit schwerwiegenden Effekten auf den Lebens- und Wirtschaftsraum.

Ein Paradigmenwechsel im Küstenschutz hilft ferner bei der Anpassung an die bereits heute beobachteten und projizierten Veränderungen der Küste. Die in *Abbildung 1* vom IPCC aufgezeigten Strategien zur Anpassung an den Meeresspiegelanstieg fordern ein Umdenken zur Sicherung der Küsten und erweitern den Katalog möglicher Maßnahmen kategorisch. Konventionelle Küstenschutzwerke bieten immer ein für den jeweiligen Bemessungsfall hinreichendes Schutzniveau, erreichen jedoch vor dem Hintergrund des Meeresspiegelanstiegs deutlich schneller als ursprünglich angesetzt ihr Lebensende. Bestehende Küstenschutzwerke verlieren ihre Wirksamkeit ab einem gewissen Meeresspiegelanstieg und bieten darüber hinaus nur wenige Ökosystemleistungen. Vor diesem Hintergrund gewinnt der weiche Küstenschutz in den letzten Jahrzehnten in Mitteleuropa und in den USA als sogenannte Sandersatzmaßnahme an Bedeutung und ist derzeit die favorisierte Strategie der Anpassung. Aufspülungen von Sand am Strand und im Küstenvorfeld sind flexibel einsetzbar und werden zugleich als ökologisch vorteilhaft angesehen. Allerdings ist auch Sand eine endliche Ressource, die weltweit stark nachgefragt ist und künftig noch knapper werden wird. Diese Entwicklung wirft die Frage auf, welche Maßnahmen langfristig und nachhaltig Sicherheit in Küstengebieten bieten können (s. *Abb. 3*).

Es ist offenkundig, dass sowohl die Exposition als auch der Nutzungs- und Besiedlungsdruck in Küstenregionen

infolge konkurrierender Aktivitäten und Ansprüche steigen. Dies führt zu kontroversen Diskussionen und Regulierungen im Kontext des Schutzes und der nachhaltigen Nutzung von Küstenregionen. Ohne die erfolgreich implementierte Anpassung der Küsten wird es zukünftig zu wesentlich stärkeren Schäden und Verlusten sowie zu Konflikten und Gerechtigkeitsfragen kommen, die bislang politisch, rechtlich und gesellschaftlich – vor allem in Europa – zu wenig diskutiert werden.

Indes wird die unbestritten notwendige Anpassung des Küstenraums an den projizierten Meeresspiegelanstieg auch in Deutschland medial und politisch weitgehend ausgeblendet. Dialoge, ob getroffene Maßnahmen überhaupt ausreichend oder weitere auszuführen sind, fehlen weitgehend. Stattdessen findet eine Trivialisierung statt, die in populistischen Empfehlungen mündet, zum Beispiel „...die Deiche müssen erhöht werden!“, was mit Blick auf die komplexen und vielschichtigen Fragestellungen im Küstenraum viel zu kurz greift. Erstrebenswert sind hingegen breit angelegte, wissenschaftlich fundierte Debatten, die angesichts kommender Herausforderungen die notwendigen Anpassungsziele und daraus abzuleitenden Strategien und Maßnahmen sachlich diskutieren und Handlungsempfehlungen formulieren.

→ Weiterführende Infos:



Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann

seit 2007 Geschäftsführender Leiter des Ludwig-Franzius-Instituts für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen. Zeitgleich leitet er geschäftsführend das Forschungszentrum Küste (FZK) mit dem Großen Wellenströmungskanal (GWK+). Seine Forschungsschwerpunkte liegen unter anderem im Küsteningenieurwesen (Küstenschutz), in der Offshore Windenergie sowie im Risiko- und Hochwassermanagement. Kontakt: schlurmann@lufi.uni-hannover.de



Dr.-Ing. Jan Visscher

ist seit 2014 Oberingenieur am Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen und leitet die Arbeitsgruppe Hochwasserschutz, Küsten- und Ästuardynamik. Dazu arbeitet er in der Koordination der Feldmessungen und des Forschungsverbands „Gute Küste Niedersachsen“. Kontakt: visscher@lufi.uni-hannover.de



Dr.-Ing. Christian Jordan

arbeitet seit 2014 am Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen und ist dort seit 2022 als Postdoktorand tätig. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen in den Bereichen der Küsten- und Ästuardynamik sowie in der Erforschung der Umweltauswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen. Kontakt: jordan@lufi.uni-hannover.de



Jan Tiede M.Sc.

ist seit 2018 als wissenschaftliche Mitarbeiter am Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen tätig. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen in der Erforschung der Küstendynamik und des ökosystembasierten Küstenschutzes, insbesondere unter Anwendung von Fernerkundungsmethoden. Kontakt: tiede@lufi.uni-hannover.de