

Um wie viel müssen wir die Deiche an der Nordsee erhöhen?

Was meinen Sie: Wenn der Meeresspiegel einen halben Meter steigt, müssen die Deiche dann einen halben Meter erhöht werden, um denselben Schutz vor Überflutung zu erhalten? Weit gefehlt – erläutert der folgende *Gastbeitrag von Arne Arns*

Änderungen des mittleren Meeresspiegels (*engl. mean sea level, MSL*) sind nicht nur Grundlage unzähliger (oftmals) wissenschaftlicher Diskussionen, sondern beeinflussen auch direkt die Küstenschutz-Strategien der Anrainerstaaten. So dienen Küstenschutzbauwerke üblicherweise dem Schutz des Hinterlandes vor großflächigen Überflutungen durch extreme Wasserstände und Wellen. Der Wasserstand setzt sich dabei aus den astronomischen Gezeiten, dem Windstau sowie dem mittleren Meeresspiegel (MSL für mean sea level) als Basishöhe zusammen. Dabei addieren diese drei Faktoren sich nicht einfach nur linear sondern können sich gegenseitig beeinflussen, etwa indem tieferes Wasser die Bodenreibung vermindert. Während ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Tide und Windstau bereits für viele Regionen weltweit nachgewiesen werden konnte (siehe z.B. Horsburgh & Wilson, 2007; Rego & Li, 2009), basieren die meisten Küstenschutzkonzepte auf der Annahme, dass ein Anstieg des MSL zu einer gleich großen Erhöhung von Extremwasserständen führt – 50 Zentimeter Meeresspiegelanstieg würde nach dieser Annahme also eine Erhöhung der Deiche um 50 Zentimeter erfordern.

In einer im Januar in der Fachzeitschrift *Scientific Reports* veröffentlichte Studie zeigen wir nun jedoch, dass diese Annahme aufgrund nichtlinearer hydrodynamischer Rückkopplungen zu einer deutlichen Unterschätzung der erforderlichen Bemessungshöhen führen könnte. Demnach müssen Landesschutzdeiche entlang der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste im statistischen Mittel um etwa das 1,5-fache des Meeresspiegelanstiegs erhöht werden, um diesen Effekt zu kompensieren. Die Analysen basieren zwar auf einer regionalen Fallstudie, lassen sich jedoch auch weltweit auf andere Flachwasserküsten übertragen.

Zum generellen Hintergrund: die erforderlichen Schutzhöhen werden global (wie auch in Schleswig-Holstein) häufig aus extremwertstatistischen Verfahren abgeleitet. Hierzu werden aus langjährigen Wasserstandszeitreihen (d.h. an punktuellen Pegelmessstellen aufgezeichnete Wasserstände) Stichproben gebildet, die die größten Wasserstände der Beobachtungsperiode umfassen. Mit Hilfe von theoretischen Verteilungsfunktionen lässt sich das generelle Systemverhalten der höchsten beobachteten Wasserstände beschreiben und Aussagen über Wasserstände mit definierten Überschreitungswahrscheinlichkeiten (bzw. Jährlichkeiten – also z.B. ein Mal alle 120 Jahre) ableiten. Mittels Extrapolation können dabei sogar robuste Aussagen über seltene Ereignisse abgeleitet werden, die in der Beobachtungsperiode bislang gar nicht vorgekommen sind. So lassen sich z. B. aus einer 70-jährigen Zeitreihe Aussagen über ein Ereignis mit einem mittleren Wiederkehrintervall von 100 oder sogar 200 Jahren ableiten. Im Bereich der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste werden Landesschutzdeiche unter Verwendung ebendieser Prozedur auf einen Referenzwasserstand mit einem mittleren Wiederkehrintervall von 200 Jahren bemessen. Hinzu kommt der sogenannte Wellenauflauf, der die vertikale Auslenkung der Welle beim Eintreffen auf den Deich beschreibt.

Mit Hilfe dieses klassischen Ansatzes lassen sich unter stationären Bedingungen – also in einem stabilen Klima – robuste Ergebnisse erzielen. Berücksichtigt man jedoch die bereits im letzten Jahrhundert beobachteten Änderungen des MSL (14-22 cm im globalen Mittel; siehe z.B. Dangendorf et al., 2017) bzw. die für Ende diesen Jahrhunderts projizierten Anstiege, dann stellt sich unweigerlich die Frage, welchen Einfluss dieser Meeresspiegelanstieg auf Extremereignisse hat?

Hierzu ist es erforderlich, die Wasserstandskomponenten Tide und Windstau getrennt voneinander zu betrachten. Betrachten wir zunächst die Tide der Nordsee. Diese entsteht zu großen Teilen durch die gezeitenerzeugenden Kräfte in den Tiefwasserbereichen des Nordatlantiks, d.h. die Gezeiten der Nordsee werden indirekt durch eine Art „Mitschwingung“ angeregt. Bei der Wanderung von den tiefen Bereichen des Nordatlantiks in die flachen Regionen der Deutschen Bucht wird die Tide durch sogenannte Flachwasser- und Reibungseffekte deformiert. Dabei gilt: je flacher desto stärker die Deformation! Steigt der Basiswasserstand (MSL) nun an, dann reduzieren sich hierdurch auch die deformierenden Effekte. Die Tidekurve nähert sich dabei immer stärker einer sinusartigen Form an, während die Amplitude der Tideschwingung zunimmt. Diese analytisch begründete Entwicklung konnten wir auch durch Computersimulationen bestätigen. Im Hinblick auf den Windstau (*engl. Surge*) ist dagegen bekannt, dass eine Erhöhung des Basiswasserstandes eine Reduktion der Windstauwirkung verursacht. Folglich verursacht ein steigender MSL eine Verringerung des Windstaus. Auch dies konnten wir in unseren Analysen zeigen.

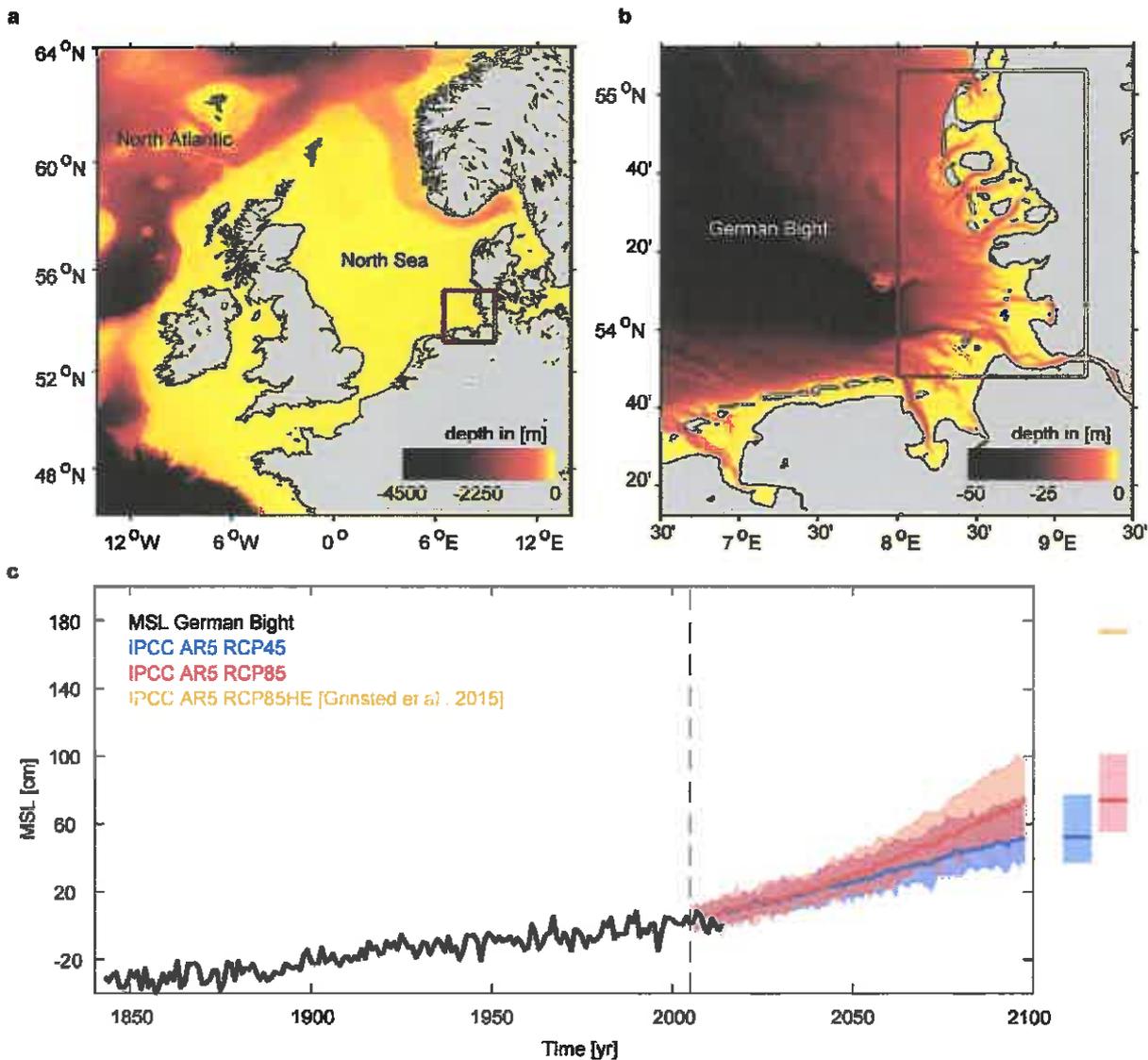


Abb. 1 Untersuchungsgebiet und Meeresspiegel-Projektionen: (a) Grenzen des numerischen Modells, das zur Simulation der Wasserstände und Wellen verwendet wurde. Die Untersuchungen beziehen sich primär auf die sehr flachen Bereiche der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste, die in (b) im Detail dargestellt sind. Die Farbskalen in (a) und (b) geben die Tiefen im Untersuchungsgebiet an. (c) Zeigt die beobachteten (schwarz) und projizierten (farbig) Meeresspiegeländerungen der Szenarien RCP4.5, RCP8.5 und RCP8.5HE, die innerhalb der Computersimulationen berücksichtigt wurden.

Die für den Küstenschutz spannende Frage lautet nun: wie wirken Änderungen des MSL auf bemessungsrelevante Sturmflutwasserstände (d.h. die Summe aus Tide und Windstau) und auf Wellen? Da eine analytische Betrachtung unter Berücksichtigung aller potentieller Einflussfaktoren nicht möglich ist, basieren unsere Analysen auf numerischen Sensitivitätsanalysen. Hierzu haben wir innerhalb eines numerischen Wasserstands- und Seegangs Modells (Arns et al., 2015 & 2017) den Basiswasserstand um die MSL Projektionen der IPCC Szenarien RCP4.5 (+54 cm) und RCP8.5 (+71 cm) (Church et al., 2013) sowie um das RCP8.5 *high end* (RCP8.5HE) Szenario (+174 cm) (Grinsted et al., 2015) erhöht (siehe Abbildung 1). Dabei zeigen die Simulationen insgesamt eine netto Zunahme des Wasserstandes mit einem mittleren Wiederkehrintervall von 100 Jahren um 12 cm (RCP4.5) bis 17 cm (RCP8.5), zusätzlich zum Anstieg des mittleren Meeresspiegels. Zwar variieren die Ergebnisse entlang der betrachteten Küstenlinie, jedoch zeigt sich eine generelle Tendenz zu Sturmflutwasserständen, die den mittleren Meeresspiegelanstieg noch deutlich überschreiten. Folglich würde die Erhöhung der Deiche allein um den Betrag des MSL-Anstiegs zu einer Verringerung des Schutzniveaus gegen Sturmfluten führen.

Wie Tide und Windstau, werden auch Wellen durch Flachwasser- und Reibungseffekte beeinflusst. Dabei sind die Wellenhöhen im Flachwasser tiefenbegrenzt, d.h. sie können nicht höher werden, als das 0,78 bis 1,2-fache (je nach Brechertyp) der Wassertiefe. Wir haben dies etwas anschaulicher als eine Art Filtereffekt beschrieben. Mit steigendem MSL nimmt diese Filterwirkung allmählich ab und Wellen, die zuvor durch die Tiefenbegrenzung im Küstenvorfeld gebrochen wären, können nun frei bis an den Deich auflaufen (siehe Abbildung 2). Betrachten wir nun die Ergebnisse der numerischen Sensitivitätsstudie, dann zeigen die Wellenhöhen (für ein Wiederkehrintervall von 100 Jahren) eine Zunahme zwischen 26 cm (RCP4.5) und 78 cm (RCP8.5HE). Am Deich verursacht die Welle den sogenannten Wellenauflauf, d.h. ein Hochlaufen der Welle an der Böschung des Bauwerkes. Die dabei erreichte Höhe beschreibt die Wellenauflaufhöhe. Für Bemessungsfragen wird dieser Wellenauflauf mit den Wasserständen zu definierten Wiederkehrintervallen überlagert, d.h. die Zunahme der Wellenhöhen hat ebenfalls direkte Konsequenzen für erforderliche Deichhöhen.

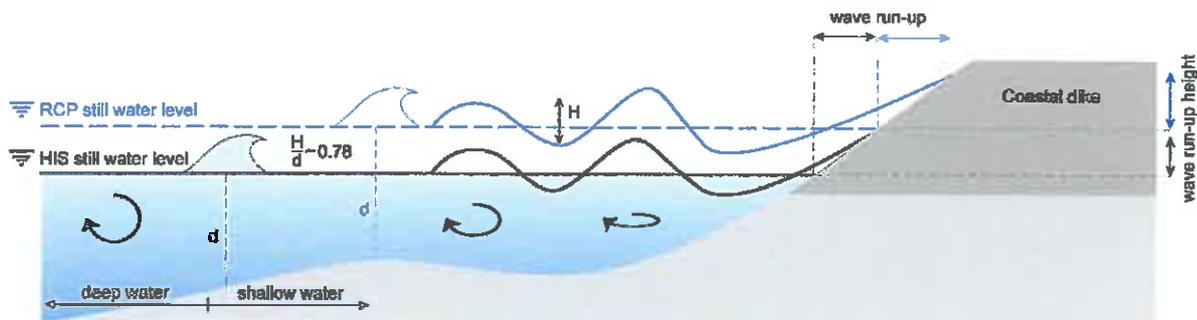


Abb 2 Schematische Darstellung relevanter Wechselwirkungen zwischen Wellenbewegungen und Meeresspiegeländerungen im Küstenvorfeld. Die Wellen wandern mit unterschiedlichen Höhen in Richtung Küste. In küstennahen, sehr flachen Bereichen beginnen die höheren Wellen zu brechen. Beim aktuellen Meeresspiegel (schwarze Linie) passiert dies weiter entfernt von der Küste. Infolge dieser Filterwirkung können nur kleinere Wellen Richtung Küstenschutzbauwerk wandern. Steigt der Meeresspiegel an, dann wandert der Brechpunkt der Wellen weiter Richtung Strand während gleichzeitig auch weniger Wellen brechen und somit ungehindert auf das Schutzbauwerk treffen.

Da die bisherige Bemessungspraxis keinen Zusammenhang zwischen den Jährlichkeiten von Wasserstand und Wellen vorsieht, haben wir einen neuen Ansatz entwickelt, bei dem die beiden Größen unter Berücksichtigung von deren Abhängigkeit gekoppelt werden (für Details siehe Arns et al., 2017). Fast man nun alle, für die Bemessung relevante Komponenten mit Hilfe dieses Ansatzes zusammen, dann müssen Deiche im statistischen Mittel um das 1,5-fache (stellenweise sogar bis zum doppelten) gegenüber dem mittleren Meeresspiegelanstieg erhöht werden, um das aktuelle Sicherheitsniveau zu halten.

Die Ergebnisse deuten also darauf hin, dass aktuelle Bemessungspraktiken den Einfluss von Meeresspiegeländerungen auf die hydrodynamischen Belastungen am Deich unterschätzen. Dabei haben insbesondere die bislang weniger beachteten Komponenten (Sturmflut, Welle) den größten

Einfluss. Gleichzeitig muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Studie auf einer Reihe von Annahmen basiert. So wurden keine Wetteränderungen in den Projektionen berücksichtigt, da es bislang keine gesicherten Aussagen gibt, wie sich die Häufigkeit schwerer Stürme im Zuge des Klimawandels verändern wird. Ähnliches gilt auch für potentielle Veränderungen der Wattflächen (Morphologie). In den Modellstudien wurden diese als konstant angenommen, jedoch würde ein „Mitwachsen“ der Watten dem nichtlinearen Anstieg entgegenwirken. Erste Untersuchungen deuten darauf hin, dass damit in der Deutschen Bucht zumindest teilweise zu rechnen ist (siehe z.B. Hofstede et al., 2016). Jedoch zeigen sich auch dabei räumlich stark unterschiedliche Entwicklungen. Erst räumlich hoch aufgelöste Projektionen der Morphodynamik im Küstenvorfeld erlauben daher robuste Abschätzungen von Veränderungen des Sturmflutrisikos.



Arne Arns ist promovierter Bauingenieur mit dem Schwerpunkt Küstenwasserbau, Oberingenieur und Leiter der „Coastal Extremes“ Gruppe am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Ermittlung küstenhydrologischer Extremereignisse sowie im Bereich vom Impactanalysen.

Quellen

- Arns, A., Wahl, T., Dangendorf, S., Jensen, J. The impact of sea level rise on storm surge water levels in the northern part of the German Bight. Coastal Engineering, DOI:10.1016/j.coastaleng.2014.12.002, 2015.
- Arns, A., Dangendorf, S., Jensen, J., Talke, S., Bender, J., Pattiaratchi, C.B.: Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. In: Scientific Reports 7. DOI: 10.1038/srep40171, 2017.
- Church, J. A. et al. Sea Level Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2013.
- Dangendorf, S., Marcos, M., Wöppelmann, G., Conrad, C., Frederikse, T., Riva, R.: Reassessment of 20th century global mean sea level rise, PNAS, doi:10.1075/pnas.1616007114
- Grinsted, A., Jevrejeva, S., Riva, R.E.M., Dahl-Jensen, D. Sea level rise projections for northern Europe under RCP8.5. Climate Research; 64 (1): 15 DOI: 10.3354/cr0130, 2015.
- Hofstede, J.L.A., Becherer, J., Burchard, H.: Are Wadden Sea tidal systems with a higher tidal range more resilient against sea level rise?, J Coast Conserv, Vol. 20, Issue 5, doi: 10.1007/s11852-016-0469-1, 2016.
- Horsburgh, K. J. & Wilson, C.: Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea, J. Geophys. Res., 112, C08003, doi:10.1029/2006JC004033, 2007
- Rego, J. L. & Li, C.: Nonlinear terms in storm surge predictions: Effect of tide and shelf geometry with case study from Hurricane Rita, J. Geophys. Res., 115, C06020, doi:10.1029/2009JC005285, 2010