

Evaluierung von Küstenschutz-Strategien im Hinblick auf Klimaänderungsfolgen

Hanz Dieter Niemeyer, Cordula Berkenbrink, Anne Ritzmann, Heiko Knaack, Andreas Wurpts und Ralf Kaiser

Zusammenfassung

Die zu erwartenden Folgewirkungen des globalen Klimawandels werden an den Insel- und Küstenschutz erhebliche Anforderungen von bisher nicht erlebtem Maß stellen: Beschleunigter Meeresspiegelanstieg und höhere Staus bei Sturmfluten in Folge stärkerer Sturmintensität führen zu größeren Wassertiefen vor Schutzwerken, mit denen wiederum eine stärkere Seegangsbelastung einhergeht. Darüber hinaus wird es eine verzögerte und abnehmende Anpassung von Watten an beschleunigte Anstiegsraten des Meeresspiegelanstiegs geben, die zu einer weiteren Vergrößerung der Wassertiefen und damit auch zu verstärkten Seegangsbelastungen führen. Es stand daher zur Debatte, wie künftig der Insel- und Küstenschutz auszurichten sei, um den zu erwartenden Herausforderungen erfolgreich und zugleich effektiv begegnen zu können. Deshalb wurden Alternativen zu der bisher traditionell seit Jahrhunderten angewandten Strategie linienhafter Schutz untersucht. Mit gleichen Randbedingungen für verschiedene Szenarien von Klimaänderungsfolgen auf hydrodynamische Belastungen von Schutzwerken wurden in quantitativer Form die Konsequenzen alternativer Strategien im Vergleich zum linienhaften Schutz mit dem Maßstab gleicher Sicherheit für die zu schützenden Niederungsgebiete aufgezeigt, um eine objektive Evaluierung zu ermöglichen. Diese vergleichenden Untersuchungen mit alternativen Strategien haben eindeutig belegt, dass die Strategie linienhafter Schutz an Niederungsküsten optimal hinsichtlich Sicherheit und Kosteneffizienz ist. Daher ist die Strategie linienhafter Schutz Grundlage der in Niedersachsen von der Landesregierung 2013 eingeführten Anpassungsstrategie an Klimaänderungsfolgen bis 2100 geworden.

Schlagwörter

Küstenschutz-Strategien, Klimaänderungsfolgen, beschleunigter Meeresspiegelanstieg, Sturmfluten, Seegang, Bemessung

Summary

The expected change of global climate will create impacts being an unknown challenge for coastal protection: Both, accelerated sea-level rise and stronger storms create higher set-ups of storm surges and stronger waves. Moreover, the adaption of intertidal areas in the coastal areas might be delayed providing larger water depths in front of coastal structures allowing again the occurrence of stronger waves. The question, if coastal lowlands could remain safe against the sea is of increasing importance. Alternatives to the presently exercised strategy of keeping the line of protection are discussed with reference to historical experience. For a quantitative comparison mathematical modelling of hydrodynamic loads for designing coastal protection structures is carried out for distinct scenarios of boundary conditions to be expected as a consequence of

climate change until the year 2100. As a final result protection by keeping the line is found to be the most favourable strategy in respect of both, safety and effectiveness. Based on these findings the adaptation strategy for coastal protection to climate change effects until 2100 was implemented by the State Government of Lower Saxony in 2013.

Keywords

coastal protection strategies, climate change impacts, accelerated sea level rise, storm surges, design

Inhalt

1	Einleitung	614
2	Bemessungsszenarien und Ermittlung von Belastungsgrundlagen für die Evaluierung alternativer Strategien	615
2.1	Szenarien.....	616
2.2	Modellierung.....	616
2.3	Resultierende Belastungen der Deiche.....	617
3	Evaluierung alternativer Strategien	618
3.1	Rückzug	619
3.2	Anpassung.....	620
3.3	Schutz-Rückdeichung.....	622
3.4	Schutz-Staffelung.....	623
4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	625
5	Dankeswort.....	626
6	Schriftenverzeichnis.....	626

1 Einleitung

Der globale Klimawandel und die damit einhergehende Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs machen in vielen Teilen der Welt eine Neubewertung der Küstenschutzstrategien erforderlich. So auch in den Niederungsgebieten der südlichen Nordseeküste, die seit rund 1000 Jahren durch eine Deichlinie und ergänzende Massivbauwerke wie Sturmflutschutzwände oder Sturmflutsperrwerke geschützt werden. Angesichts des in Folge der globalen Klimaänderung zu erwartenden beschleunigten Meeresspiegelanstiegs und anderer Sekundärfolgen stellt sich die Frage, ob die bisher praktizierte Strategie des linienhaften Schutzes weiterhin angemessen ist oder ob Alternativen ernsthaft in Erwägung zu ziehen sind. Dies gilt umso mehr als Küstenschutzwerke durch verschiedene Sekundäreffekte des Klimawandels in Zukunft höheren Belastungen ausgesetzt sein werden. Die stärkere Sturmintensität und die damit verbundene Zunahme der Stauhöhen bei Sturmfluten (WOTH 2005) führt zu einer zusätzlichen Vergrößerung der Wassertiefen vor Küstenschutzwerken sowie zu einem verzögerten Mitwachsen der Wattflächen mit dem beschleunigten Meeresspiegelanstieg (MÜLLER et al. 2007). Da die Wellenhöhen und -perioden in den Wattflächen durch die Wassertiefen begrenzt sind (NIEMEYER 1983;

NIEMEYER und KAISER 2001), geht jede Erhöhung der Wassertiefe vor Ort mit einer entsprechend höheren Seegangsbelastungen an den Küstenschutzwerken einher.

Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse der Evaluierung verschiedener Küstenschutzstrategien vorgestellt, die innerhalb des Forschungsthemas A-KÜST im Rahmen des vom Land Niedersachsen initiierten Verbundprojekts KLIFF (Klimafolgenforschung Niedersachsen) vorgenommen wurde. Untersuchungsschwerpunkte von KLIFF waren die Anpassung an die Auswirkungen des globalen Klimawandels für die Themenbereiche Land-, Forst- und Wasserwirtschaft. Das Forschungsthema A-KÜST befasst sich unter verschiedenen Aspekten mit mehreren Teilprojekten mit dem übergeordneten Ziel einer Evaluierung unterschiedlicher Küstenschutzstrategien, die bereits in der Vergangenheit umgesetzt oder in Forschungsprojekten als potenzielle Alternativen erarbeitet worden sind (NIEMEYER 2005a, 2005b, 2010). Vorrangiges Ziel des Projekts ist ein systematischer Vergleich alternativer Strategien im Einklang mit der den Vorgaben des Niedersächsischen Deichgesetzes (NDG) entsprechenden aktuellen Bemessungspraxis (NIEMEYER 2008). Einige der Strategien werden bereits seit langem eingesetzt, etwa die Strategien Rückzug und Anpassung, andere sind Modifizierungen der Strategie Schutz, so etwa die Strategien Rückdeichung oder Staffelung (Abb. 1). Sie werden dem linienhaften Schutz, durch den die Strategie Schutz üblicherweise umgesetzt wird, in einem Vergleich gegenübergestellt (NIEMEYER 2005a, 2005b, 2010).

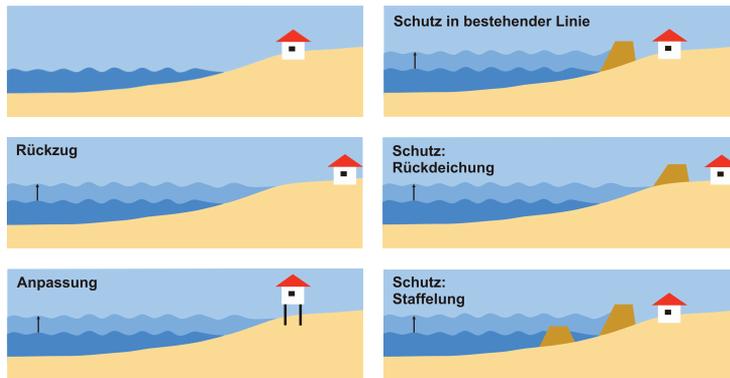


Abbildung 1: Alternative Küstenschutzstrategien in Anpassung an den Meeresspiegelanstieg nach IPCC (1990) sowie angepasst nach COMCOAST (2007); (NIEMEYER 2005a, 2005b).

2 Bemessungsszenarien und Ermittlung von Belastungsgrundlagen für die Evaluierung alternativer Strategien

Die Randbedingungen für die Evaluierung der Küstenschutzstrategien wurden durch Modellierung der Bemessungswasserstände und des Wellenklimas der südlichen Nordsee reproduziert. Die Modellierung erfolgte für die derzeitigen Bemessungsvorgaben sowie für wahrscheinliche und pessimistische Szenarien für zukünftige Auswirkungen des Klimawandels. Auf dieser Grundlage erfolgte die Analyse der hydrodynamischen Belastungen an Küstenschutzwerken im Testgebiet Ems-Dollart-Ästuar mittels mathematischer Modellierungen. Bei der Evaluierung der hydrodynamischen Belastungen kamen die

Methodik und räumliche Auflösung zur Anwendung, die aktuell zur Bemessung von Küstenschutzwerken in Niedersachsen verwendet werden.

2.1 Szenarien

Zur Darstellung der Entwicklungen hydrodynamischer Belastungen im Dollart-Gebiet bis zum Ende des Jahrhunderts wurden drei Szenarien angesetzt (Abb. 2): Das erste ist identisch mit der gegenwärtige Bemessung nach den Vorgaben des NDG und ergänzender Ausführungsbestimmungen. Dabei ist im Bemessungswasserstand ein Vorsorgemaß von 0,5 m enthalten, das zum einen – entsprechend dem in den letzten Jahrhunderten an der südlichen Nordseeküste gemessenen Anstieg des mittleren Tidehochwassers – eine statische Erhöhung des mittleren Meeresspiegels von 25 cm und zum anderen einen zusätzlichen Stau bei Sturmfluten von 25 cm in Folge stärkerer Sturmintensität berücksichtigt (NIEMEYER 2008). Im zweiten Szenario wird das Vorsorgemaß für den Bemessungswasserstand auf 1,0 m erhöht. Die statische Erhöhung des Meeresspiegels liegt hier bei 65 cm und befindet in derselben Größenordnung wie der in den Szenarien des IPCC (2007) angesetzte obere Grenzwert des Meeresspiegelanstiegs. Zusätzlich wurde der Stau bei Sturmfluten zur Berücksichtigung wachsender Sturmstärken um 35 cm erhöht. Der Wert deckt sich mit älteren (WOTH et al. 2006) und jüngeren Untersuchungen des Instituts für Küstenforschung des HZG (WEISSE et al. 2012) im Rahmen des Forschungsthemas A-KÜST. Das Vorsorgemaß im dritten, pessimistischen Szenario beträgt 1,5 m und resultiert aus einer Erhöhung des statischen Meeresspiegels um 100 cm und einer des Staus bei Sturmfluten um 50 cm. Wassertiefen und Windantrieb nehmen in jedem der drei Szenarien zu; entsprechend der physikalischen Gesetzmäßigkeiten wachsen Wellenhöhen und -perioden mit.

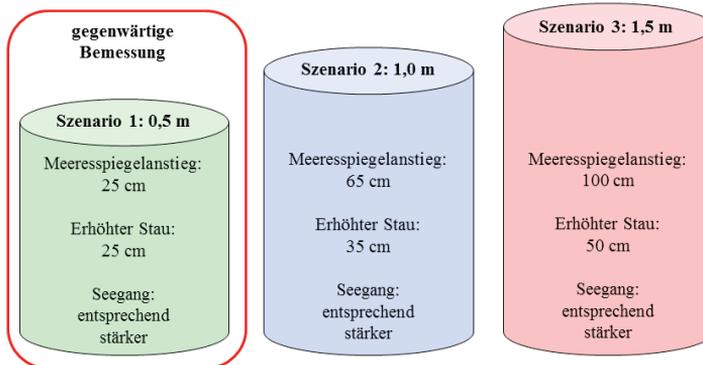


Abbildung 2: Szenarien für steigende Bemessungswasserstände und stärkeren Bemessungsseegang.

2.2 Modellierung

Die Modellierung von Wasserständen im Bereich des Ems-Dollart-Ästuars erfolgt mit dem Tidemodell DELFT-3D über eine hierarchisch aufgebaute Kaskade aus drei miteinander gekoppelten zweidimensionalen hydrodynamischen Modellen mit zunehmender Auflösung. Abgedeckt wird der gröber aufgelöste Festlandsockel mit der gesamten

Nordsee und angrenzenden Teilen des Nordost-Atlantiks sowie mit jeweils erhöhter Auflösung die Deutsche Bucht und schließlich das Ems-Dollart-Ästuar mit einer Auflösung von etwa 120 m (Abb. 3). Der Anstieg des Meeresspiegels wird jeweils durch Addition des Wertes zum entsprechenden Wasserstandsszenario eingesteuert. Der wachsende Stau bei Sturmflut wird über die gesamte Modellkaskade durch eine Erhöhung der jeweiligen Windgeschwindigkeit auf Grundlage der Sturmflut vom 9. November 2007 erzeugt und für jedes einzelne Szenario für den Pegel Borkum am Eingang des Ästuars angepasst.

Die Berechnung des Seegangs vor den Deichen erfolgte mit dem mathematischen Seegangsmodell SWAN, das in zwei miteinander hierarchisch verbundenen Modelltopografien in Kopplung mit dem Tidenmodell Delft-3D betrieben wird. Dabei wurden sowohl der gestiegene Wasserstand aus den Szenarien als auch entsprechende Windbedingungen berücksichtigt. Die Auflösung des inneren Modells betrug 30 - 10 m. Am seeseitigen Rand des äußeren Modells wird der Seegang über ein JONSWAP-Spektrum mit einer spektralen signifikanten Wellenhöhe $H_{m0} = 10$ m, einer Peakperiode $T_p = 15$ s und einer mittleren Richtung von $Dir = 315^\circ$ eingesteuert. Diese Werte folgen der in Niedersachsen aktuell ausgeübten Bemessungspraxis (NIEMEYER 2001, 2008). Eine weitergehende Erhöhung der Randwerte des Seegangs für die Szenarien mit erhöhten Wasserständen lässt keine wachsenden Werte bei den Belastungsgrößen der Schutzwerke erwarten, da dafür die örtlichen Wassertiefen stets den begrenzenden Faktor darstellen.

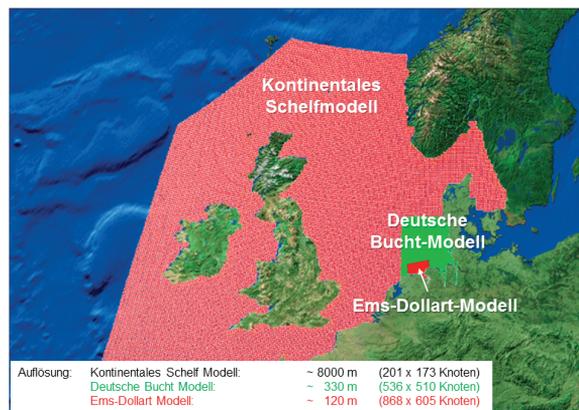


Abbildung 3: Modellkaskade zur abgestuften Modellierung mit wachsender Auflösung der Topografie.

2.3 Resultierende Belastungen der Deiche

Die modellierten Scheitelwasserstände steigen von der Nordsee in Richtung Ems-Dollart-Ästuar beträchtlich an (Abb. 4). Im Falle der ausgewählten Szenarien nimmt der Anstieg im Verhältnis zur Erhöhung der absoluten Wasserstände zu. Im ersten Szenario beispielsweise ergibt das für den Bemessungswasserstand am Pegel Borkum vorgesehene Vorsorgemaß von 0,5 m im inneren Bereich des Ästuars eine Erhöhung der Bemessungswasserstände von etwa 0,6 m.

Die lokalen Seegangsbedingungen sind in Abhängigkeit von der Lage der Küstenlinie zur Windrichtung stark veränderlich. Auf Grund zunehmender Windgeschwindigkeiten

und Wassertiefen wachsen die signifikanten Wellenhöhen in einer Größenordnung von einigen Dezimetern an und die Energieperioden verlängern sich um bis zu 0,5 s.

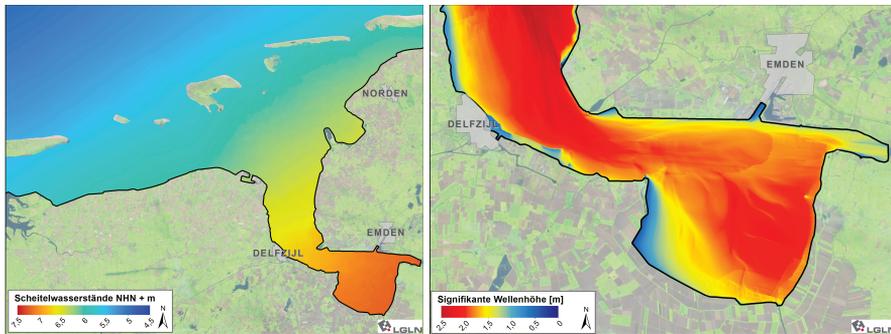


Abbildung 4: Links: Scheitelwasserstände der Bemessungsturmflut für Szenario 2; Rechts: Signifikante Wellenhöhen H_{m0} [m] für Szenario 2.

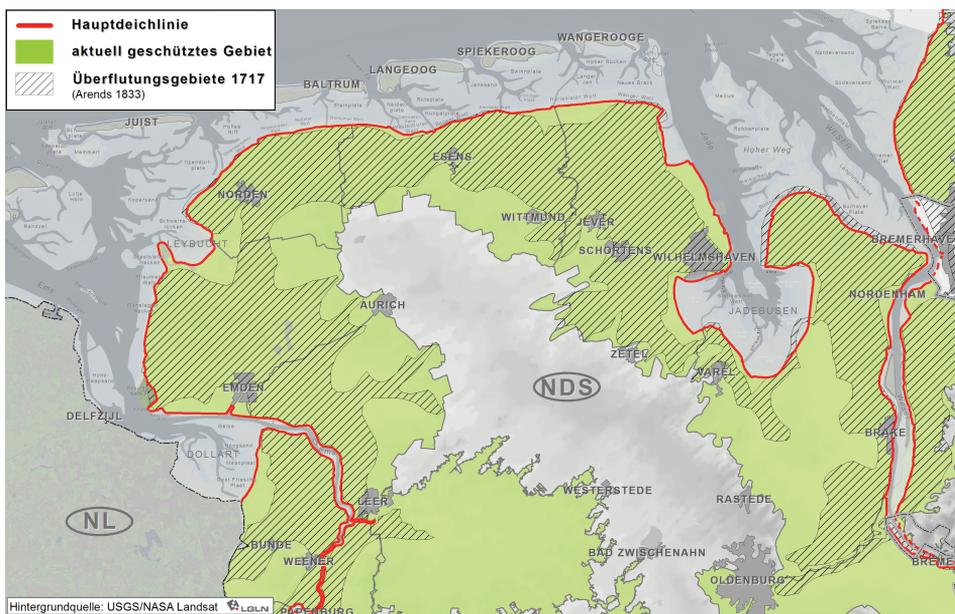


Abbildung 5: Geschützte Niederungsgebiete im westlichen Teil Niedersachsens sowie überflutete Gebiete nach der Weihnachtsflut von 1717 (RITZMANN und NIEMEYER 2011).

3 Evaluierung alternativer Strategien

In Deutschland wird – ebenso wie in den Nachbarstaaten – gegenwärtig der linienhafte Schutz als bevorzugte Strategie im Küstenschutz angewandt. Zur Bewältigung zunehmender hydrodynamischer Belastungen werden die Schutzwerke in den bestehenden Linien verstärkt (Abb. 5). In den geschützten Niederungsgebieten Niedersachsens leben 1,2 Millionen Menschen auf 14 % der Landesfläche (REGIERUNGSKOMMISSION KLIMASCHUTZ 2012). Darüber hinaus ist die Sicherheit vor Sturmfluten für eine große

Zahl von Menschen in den Nachbarländern Bremen und Hamburg sowie in der niederländischen Provinz Groningen vom Küstenschutz in Niedersachsen abhängig. Ohne Schutzmaßnahmen wären die Lebens- und Wirtschaftsgrundlagen dieser Menschen bedroht. Hinsichtlich des Klimawandels stellt sich die Frage, ob die aktuell praktizierte Strategie des linienhaften Schutzes auch in der Zukunft praktikabel bleibt oder andere Strategien vorzuziehen sind. Die Ergebnisse der zu diesem Zweck vorgenommenen Evaluierungen werden nachfolgend präsentiert.

3.1 Rückzug

Ein Rückzug aus allen sturmflutgefährdeten Küstengebieten würde enorme Verluste an Siedlungsgebieten und Produktionsmitteln mit sich bringen. Eine Umsiedlung der Küstenbewohner in überflutungssichere Gebiete ohne Bedarf an Schutzwerken würde darüber hinaus eine große Belastung für jeden Einzelnen und die Gesellschaft als Ganzes darstellen. Die Umsetzung dieser Strategie der Abkehr vom Sturmflutschutz würde sehr große Flächen unbewohnbar machen. Dies wird eindrücklich durch die Küstengebiete veranschaulicht, die gemäß dem Niedersächsischen Deichgesetz als geschützte Küstengebiete ausgewiesen sind (Abb. 5). Die von ARENDS (1833) dokumentierten und von Hans Homeier (FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE 1980) lagegetreu nachbearbeiteten Überflutungsbereiche nach der katastrophalen Weihnachtsflut im Jahr 1717 belegen die Anfälligkeit gegenüber hohen Sturmfluten bei einem ineffektiven Küstenschutz (Abb. 5). Die Fläche der von einer Sturmflut mit ähnlich starkem Windantrieb überfluteten Gebiete wäre heute auf Grund des seither angestiegenen Meeresspiegels und des entsprechend um etwa 0,75 cm höheren mittleren Tidehochwasserstands sogar noch größer (Abb. 6).

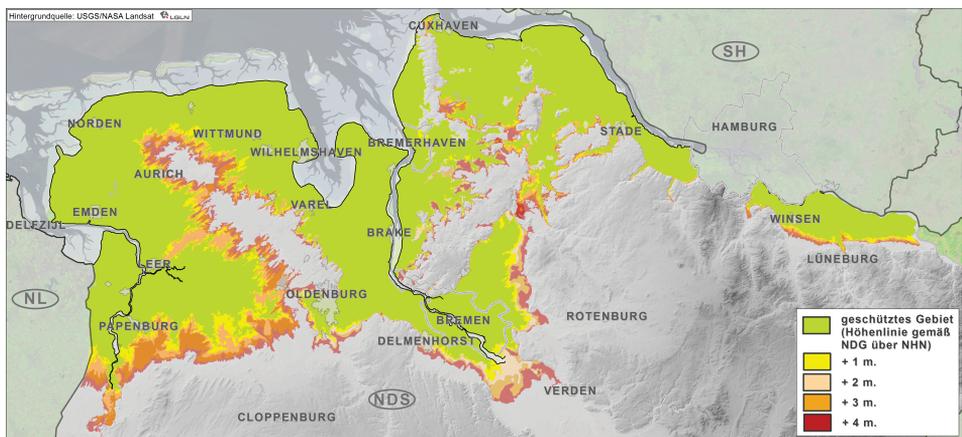


Abbildung 6: Überflutungsbereiche nach Umsetzung der Strategie Rückzug aus sturmflutgefährdeten Gebieten (RITZMANN und NIEMEYER 2011).

Eine Abkehr vom Küstenschutz in den niedersächsischen Küstenniederungen würde nicht nur für die dort ansässigen Menschen den Verlust ihrer Lebens- und Wirtschaftsgrundlage bedeuten, sondern auch eine ähnlich große Zahl von Menschen in den Nachbarstaaten gefährden, die mittelbar vom Küstenschutzsystem Niedersachsens abhängig sind. Darüber hinaus würde das kulturelle Erbe der Küstenniederungen wie beispielsweise mittelalterliche

Kirchen oder prähistorische Steingräber unwiederbringlich zerstört werden. Gemessen an den wirtschaftlichen und kulturellen Verlusten, die mit einer Aufgabe des Küstenschutzes verbunden wären, sind die mit dem Verzicht auf Küstenschutz erzielbaren Einsparungen als ausgesprochen nachrangig anzusehen. Die Größenordnung der Verluste in Folge eines Rückzugs wird durch das Ausmaß der im Niedersächsischen Deichgesetz als sturmflutgefährdet eingestuft Gebiete hinreichend belegt. Die Folgen des künftigen Klimawandels wurden durch Addition des antizipierten Meeresspiegelanstiegs von 0,5 m und 1,0 m zum aktuellen Bemessungswasserstand berücksichtigt.

3.2 Anpassung

Die Strategie Anpassung verzichtet auf vollständige Sturmflutsicherheit in den bisher geschützten Gebieten; sie setzt auf die Schaffung von sturmflutsicheren Deichringen um Siedlungs- und Industriegebieten in den Niederungsgebieten entlang der Küste und Tide-ästuarien. Die historischen Warften der früher praktizierten Anpassung sind heute unzureichend für die Gewährleistung der Sturmflutsicherheit, da seit ihrer Aufschüttung die Sturmfluthöhen auf Grund des gestiegenen Meeresspiegels soweit zugenommen haben, dass ihre Höhen dafür zu niedrig sind. Weitere unmittelbare Erhöhungen sind nur in den wenigen Fällen möglich, für die keine Siedlungs- und Bauungsstrukturen vorliegen. Die meisten Warften sind jedoch dicht bebaut (Abb. 7).

Für eine Erhöhung besiedelter Warften wäre ein vollständiger Abtrag und anschließende Neuerrichtung der Infrastrukturen erforderlich. Aus wirtschaftlichen Gründen ist daher der Schutz ausgewählter Gebiete durch Deichringe als wirtschaftlichere Alternative zu bevorzugen. Dies gilt umso mehr, als die Höhen der Warften und die auf ihnen befindliche Infrastruktur in Zukunft immer wieder an steigende Wasserstände angepasst werden müssten, was als wesentlich kostenintensiver einzuschätzen ist als eine entsprechende Ertüchtigung von Ringdeichen um zu schützende Bereiche.



Abbildung 7: Rundwarftendorf Rysum in Ostfriesland. Die Markierungen stehen für Wasserstände oberhalb NHN. Der aktuelle Bemessungswasserstand liegt etwa 6,5 m über der Bezugshöhe (RITZMANN und NIEMEYER 2012).

Ein schematisches Beispiel eines Gebiets mit geringer Bevölkerungsdichte verdeutlicht den enormen Aufwand zur Schaffung sturmflutgeschützter Rückzugsbereiche in den Niederungsgebieten (Abb. 8). Der Vorteil der Strategie Anpassung liegt grundsätzlich in der dabei erreichbaren kürzeren Deichlinie bei gleichzeitiger Aufgabe von anderen

Gebieten mit geringerer eingeschätzter volkswirtschaftlicher Bedeutung. Dieser Vorteil könnte im Untersuchungsgebiet westliches Ostfriesland nur dann erzielt werden, wenn der Schutz durch Deichringe auf größere Siedlungen – wie etwa solche mit mehr als 20.000 Bewohnern – beschränkt würde. Gemessen an der Größe der aufzugebenden Siedlungs- und Wirtschaftsbereiche in den bisher geschützten Gebieten ist kein wirtschaftlicher Vorteil erreichbar (Abb. 9). Sollen aber Siedlungen oberhalb einer Einwohnerzahl von 150 Menschen in den Schutz einbezogen werden, ist keine Einsparung an zu unterhaltender Deichstrecke möglich. Eine etwa gleich lange Strecke wäre bereits erforderlich, um weniger als die Hälfte dieser Siedlungen in einem Deichring zu schützen (Abb. 9), die hier ohne Kriterien für eine Priorisierung exemplarisch ausgewählt wurden. Der Neubau der dafür erforderlichen Strecken ist daher gegenüber Erhalt und Verstärkung der bestehenden Schutzlinie wirtschaftlich unverträglich: zum einen sind – bei erheblichen Investitionskosten für die Schaffung von Deichringen – keine signifikanten Zuwächse an Sicherheit gegenüber der Strategie linienhafter Schutz erreichbar und zum anderen wäre trotz der erforderlichen höheren Aufwändungen für die Sturmflutsicherheit auch bei dieser Lösung ein Großteil der bisher geschützten Gebiete aufzugeben (Abb. 9).

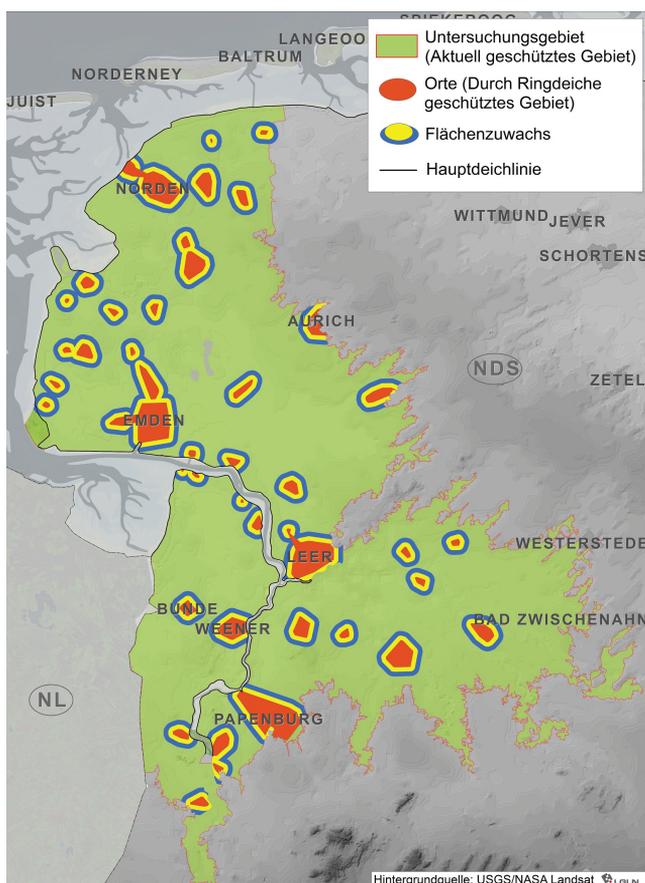


Abbildung 8: Untersuchte Deichringe für Siedlungen und Gewerbegebiete (RITZMANN und NIEMEYER 2012).

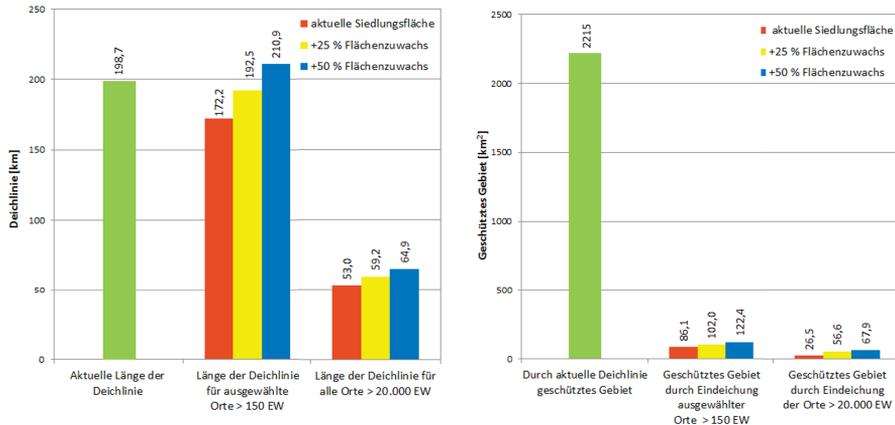


Abbildung 9: Vergleich der Strategien Anpassung durch Deichringe und linienhafter Schutz. Links: Länge der Deichlinien für a) Gesamtheit der geschützten Gebiete nach NDG durch linienhaften Schutz in bestehender Linie; b) Deichringe mit etwa äquivalenter Gesamtlänge wie bei a) für ausgewählte Siedlungen mit mehr als 150 Einwohnern; c) für Deichringe um Siedlungen mit mehr als 20.000 Einwohnern. Rechts: Größe der jeweiligen sturmflutsicheren Gebiete (RITZMANN und NIEMEYER 2012).

Darüber hinaus wäre die Anfälligkeit der zwischen den geschützten Orten verlaufenden Infrastrukturen wie Straßen, Eisenbahnstrecken oder Energieversorgungsleitungen gegenüber der Wirkung von Sturmfluten größer, sodass dafür anfallende Instandhaltungskosten ungleich höher wären als in den bisher geschützten Gebieten. Bereits ein grober Vergleich zeigt, dass der Investitionsaufwand für das Schaffen der Strukturen zur Umsetzung der Strategie Anpassung als Alternative zum linienhaften Schutz in bestehender Linie beim Eintritt von Klimaänderungsfolgen ungleich höher ist als für die Ertüchtigung von Schutzwerken in der bisher bestehenden Linie und durch die Aufgabe kleinerer Siedlungen und den Wegfall landwirtschaftlicher Erträge gleichzeitig erhebliche volkswirtschaftliche Einbußen zu erwarten sind. Für die Niederungsgebiete der niedersächsischen Küste ist die Strategie Anpassung im Vergleich zum Schutz der Gebiete insgesamt als ausgesprochen ungeeignet und unvorteilhaft zu bewerten.

3.3 Schutz-Rückdeichung

Auch Abwandlungen des linienhaften Schutzes wie beispielsweise die Rückverlegung von Deichen sind als alternative Strategien diskutiert worden (COMCOAST 2007). Bei dieser Strategie wird eine neue Schutzlinie in größerer Entfernung von der Küstenlinie angelegt, wobei sich auf den ausgedehnten Bereichen – in hinreichend seegangsgeschützten Gebieten – Gürtel von Salzwiesen bilden, von denen eine Dämpfung des Seegangs bewirkt werden soll (COMCOAST 2007). Dieses Konzept vernachlässigt jedoch die Tatsache, dass an den Niederungsküsten der südlichen Nordsee im Verlauf der letzten Jahrhunderte nahezu durchgehend Landgewinnung betrieben worden ist (HOMEIER et. al. 2010) und in diesen Gebieten nach Eindeichungen früherer Salzwiesen keine Sedimentation und Auflandung mehr stattfinden konnte. Während die Salzwiesen vor den Deichen weiter mit dem steigenden Meeresspiegel wachsen konnten, stagnieren die Flächen hinter den Deichen. Daher

fällt das Gelände von der aktuellen Küstenlinie nach binnen mit zunehmender Entfernung von der See ab. Bei einer Rückdeichung werden mit zunehmender Entfernung zur aktuellen Deichlinie die Wassertiefen vor dem neuen Deich dementsprechend größer als vor der bisherigen sein, was wiederum zu einer Verstärkung des Seegangs führt. Am Beispiel einer Rückdeichung um 3,5 km am Dollart wird mittels einer Seegangmodellierung aufgezeigt, dass für die gegebenen Bemessungsbedingungen die signifikanten Wellenhöhen um etwa 15 % und die Energieperioden um etwa 8 % (Abb. 10) zunehmen, was im Ergebnis zu einer Vergrößerung des Wellenaufbaus um etwa 20 % führt.

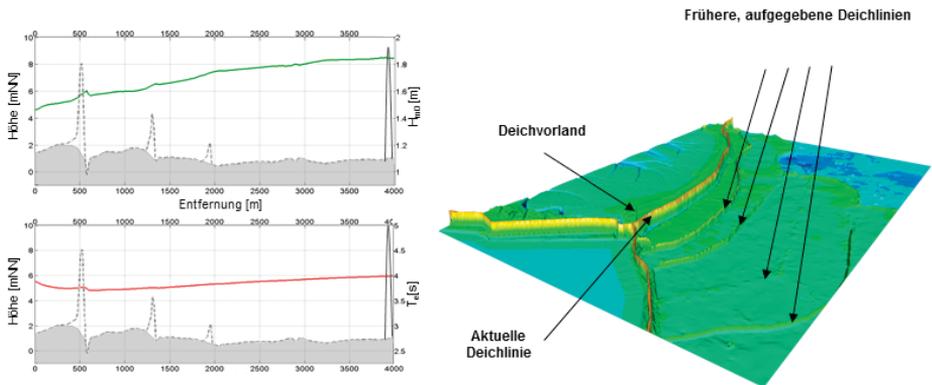


Abbildung 10: Links: Anstieg der signifikanten Wellenhöhe (oben) und Energieperiode (unten) im Falle einer Rückdeichung. Rechts: Lage früher errichteter Deichlinien landseitig der aktuellen Schutzlinie (KAISER et al. 2010).

Bereits dieses einfache Beispiel zeigt, dass eine Rückverlegung der Deichlinie in Marschgebieten keinerlei Vorteile bietet: Auf Grund der höheren Seegangsbelastung müssten dort die sturmflutkehrenden Schutzwerke stärker dimensioniert werden als in der vorhandenen Küstenlinie. Gleichzeitig wäre ein völliger Neubau der Deichlinie landseitig der vorhandenen Linie sowie eine Entschädigung der privaten Grundeigentümer in den ausgedeichten Bereichen nach geltendem Recht erforderlich. Ein unbestreitbarer Vorteil einer Rückdeichung wäre die Schaffung großer Salzwiesengebiete, die als wertvolle Ökosysteme gelten. Als Küstenschutzstrategie ist eine Rückdeichung sowohl im Hinblick auf Sicherheit als auch auf Wirtschaftlichkeit gegenüber der Ertüchtigung der Schutzwerke in bestehender Linie ausgesprochen nachteilig.

3.4 Schutz-Staffelung

Eine weitere modifizierte Form der Strategie Schutz ist die Staffelung von Schutzwerken in zwei Linien, wobei ein vorgelagertes Schutzwerk als Unterwasser-Wellenbrecher die Seegangsbelastungen aufnehmen soll, während ein zweites, nachgelagertes Schutzwerk allein die Sturmflutwasserstände kehren soll, weshalb es kaum oder gar nicht gegen Seegangsbelastungen durch flache Böschungen oder Armierung ausgelegt werden müsste (COMCOAST 2007).

Der Ansatz zur Staffelung von Schutzwerken fußt unter anderem auf Beobachtungen zur Seegangsdämpfung im Wellenlee von Sommerdeichen bei Sturmfluten. Bei höheren Sturmfluten ergaben Messungen hingegen wegen der gewachsenen Wassertiefen oberhalb ihrer Kronen eine nachlassende seegangsdämpfende Wirksamkeit von Sommerdeichen (NIEMEYER und KAISER 1998, 2001). Diese Ergebnisse konnten durch systematische mathematische Seegangsmodellierungen untermauert werden (NIEMEYER und KAISER 1998, 2001): gemessen an den Randbedingungen der aktuellen niedersächsischen Bemessung ist der Nutzen bestehender Sommerdeiche als Unterwasser-Wellenbrecher hinsichtlich der Reduzierung des Wellenaufbaus am sturmflutkehrenden Deich vernachlässigbar, da für Bemessungswasserstände nach den bekannten Brecherkriterien kein Wellenbrechen an den Sommerdeichen mehr zu erwarten ist. Von daher ist aus der Gewährleistung der Deichsicherheit kein Aufwand für die Instandhaltung von Sommerdeichen zu rechtfertigen.

Nach den Ergebnissen der Modellierungen unter Einbeziehung der Klimaszenarien kann dieses Konzept für die in an Niederrückküsten vorherrschenden Randbedingungen keinesfalls umgesetzt werden, ohne dass ein – im Vergleich zum linienhaften Schutz in bestehender Linie – unverhältnismäßiger Verbrauch an Ressourcen erforderlich wird. Selbst wenn höhere Wellen – bei sehr hochliegender Kronen – am vorgelagerten Wellenbrecher gebrochen werden, erzeugen sie in dessen Lee Sekundärspektren, die durch die hohen Windgeschwindigkeiten bei Sturmfluten auf ihrer Laufstrecke einen hinreichenden Energieeintrag erfahren, um wieder vergleichbar große Höhen und Längen wie vorher auszubilden. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Entfernung des wasserstandskehrenden Bauwerks vom Wellenbrecher: die seegangsdämpfende Wirkung für das wasserstandskehrende Bauwerk verringert sich, wodurch sich die Seegangsbelastung dort derjenigen zunehmend annähern, die bei Verteidigung auf einer Linie besteht (Abb. 11). Hinzu kommt als weiterer Nachteil, dass wie bei Rückdeichungen auch bei der Staffelung der wasserstandskehrende Deich durch das binnenseitig abfallende Geländeprofil grundsätzlich größere Wassertiefen am Bauwerksfuß aufweist als in der bisherigen Schutzlinie.

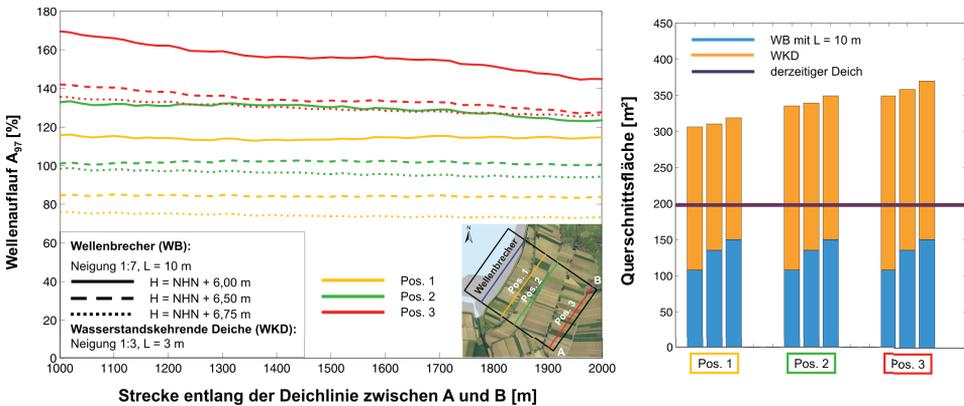


Abbildung 11: Links: Wellenaufbau an Deichen hinter einem Unterwasser-Wellenbrecher. Rechts: Benötigte Querschnittsfläche für einen konventionellen Deich beim linienhaften Schutz im Vergleich zum gestaffelten Schutz (Niemeyer et al. 2011b).

Der Aufwand zur Errichtung von wirksamen und bei beschleunigtem Meeresspiegelanstieg geeignet bleibenden Unterwasser-Wellenbrechern wäre ungleich viel größer als der Aufwand für Instandhaltung oder Verstärkung der bestehenden Deichlinie (Abb. 11). Auch bei Nutzung vorhandener Sommerdeiche müsste ein hoher Investitionsaufwand erbracht werden, um sie hinreichend zu dimensionieren und konstruktiv anzupassen, damit ihre Zerstörung bei sehr hohen Sturmfluten und die danach erfolgende starke Seeangabelastung an den primär wasserstandskehrenden – und damit stärker gegen Seeangabelastungen anfälligen – Deichen in zweiter Linie verhindert wird, die zu Gefährdungen des gesamten geschützten Hinterlands führen würden.

Die alternative Strategie des gestaffelten Schutzes mit Bauwerken in zwei Linien ist der seit 1000 Jahren eingesetzten traditionellen Strategie in einer Linie konzentrierter Schutzwerke nach den hier für wirklichkeitsgetreue Randbedingungen unter Einbeziehung pessimistischer Szenarien für Klimaänderungsfolgen vorgenommenen Untersuchungen deutlich unterlegen. Der Vergleich wird noch ungünstiger für die Alternative, wenn die dafür erforderlichen Investitionskosten allein denen für die Ertüchtigung bestehender Schutzwerke in bestehenden Linien gegenübergestellt werden und zudem die mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit im Vergleich höheren Instandhaltungskosten einbezogen werden.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der globale Klimawandel mit zu erwartenden Auswirkungen wie beschleunigter Meeresspiegelanstieg oder wachsender Stauhöhen von Sturmfluten ist ein zwingender Anlass zu einer ebenso gründlichen wie belastbaren Evaluierung von Küstenschutzstrategien. In diesem Beitrag wurden die Untersuchungsergebnisse des Forschungsthemas A-KÜST vorgestellt, die innerhalb des Forschungsvorhabens KLIFF des Landes Niedersachsen erzielt werden konnten. Im Rahmen der Evaluierung wurden mittels mathematischer Modellierung wirklichkeitsgetreue oder -nahe Bedingungen der hydrodynamischen Belastung an Schutzwerken mit dem Ziel ihrer Bemessung ermittelt. Die Ergebnisse sind repräsentativ für die Niederungsgebiete der südlichen Nordsee und lassen sich weltweit auf Küsten mit ähnlichen Randbedingungen übertragen.

Die Niederungsgebiete an den Küsten und den Ästuarien von Niedersachsen werden seit etwa 1000 Jahren durch eine konzentrierte Deichlinie geschützt. Diese Strategie wird auch an anderen Niederungsküsten an der südlichen Nordsee praktiziert. In der Vergangenheit wurden diese Schutzwerke zur Anpassung an gestiegene hydrodynamische Belastungen verstärkt. Die Evaluierung der unterschiedlichen Anpassungsstrategien ergab, dass die Strategie des Schutzes in bestehender Deichlinie auch für die Zukunft zu bevorzugen ist, selbst vor dem Hintergrund des zu erwartenden enormen Anstiegs der hydrodynamischen Belastungen durch den Klimawandel bis zum Jahr 2100.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurden im Rahmen einer umfassenden Anpassungsstrategie (REGIERUNGSKOMMISSION KLIMASCHUTZ 2012) Rahmenseetzungen für die künftige Küstenschutz-Strategie entwickelt, bei der für die Niederungsgebiete an der Küste und an den Ästuarien die Strategie linienhafter Schutz in bestehender Linie als bestgeeignetste aller Alternativen ausgewählt worden ist (REGIERUNGSKOMMISSION KLIMASCHUTZ 2012; NIEMEYER et al. 2012). Die Anpassungsstrategie wurde von der Niedersächsischen Landesregierung im Jahr 2013 beschlossen.

5 Dankeswort

Die Untersuchung alternativer Strategien für den Küstenschutz wurde im Rahmen des Forschungsthemas A-KÜST von der Forschungsstelle Küste im Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten und Naturschutz in Partnerschaft mit den folgenden Instituten ausgeführt: Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Institut für Küstenforschung, Forschungszentrum Westküste/Christian Albrechts Universität Kiel, Institut für Umweltkommunikation/Leuphana Universität Lüneburg. Das Forschungsthema A-KÜST war Teil des vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur initiierten und geförderten Programms KLIFF (Klimafolgenforschung Niedersachsen).

6 Schriftenverzeichnis

- ARENDS, F.: Physische Geschichte der Nordseeküste und deren Veränderungen durch Sturmfluthen seit der Cymbrischen Fluth bis jetzt. Emden, 1833.
- COMCOAST: COMCOAST Flood Risk Management Schemes. www.ec.europa.eu/ourcoast/download.cfm?fileID=773, 2007
- FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE: Reisefibel. Forschungsstelle Küste, Norderney, 1980.
- HOMMEIER, H.; STEPHAN, H. J. und NIEMEYER, H. D.: Historisches Kartenwerk Niedersächsische Küste der Forschungsstelle Küste. Ber. Forschungsstelle Küste, Bd. 43/2010.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Strategies for adaption to sea-level rise. Executive Summary of the Coastal Zone Management Subgroup. Intergovernmental Panel on Climate Change – Response Strategies Working Group. The Hague/The Netherlands, 1990.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M. and MILLER, H. L. (Eds.): Summary for Policymakers. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- KAISER, R.; KNAACK, H.; MIANI, M. and NIEMEYER, H. D.: Examination of Climate Change adaptation strategies for Coastal Protection. In: MCKEE SMITH, J. and LYNETT, P. (Eds.): Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering 2010, Shanghai, 2010.
<http://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/issue/view/154/showToc>
- MÜLLER, J.-M.; ZITMAN, T.; STIVE, M. and NIEMEYER, H. D.: Long-Term Morphological Evolution of the Tidal Inlet “Norderneyer Seegat”. In: MCKEE SMITH, J. (Ed.): Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering, San Diego 2006, World Scientific, New Jersey, 2007.
- NIEMEYER, H. D.: Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. BMFT – Forschungsber. MF 0203, 1983.
- NIEMEYER, H. D.: Bemessung von See- und Ästuardeichen in Niedersachsen. In: Die Küste, Heft 64, KFKI (Hrsg.), Boyens & Co. KG, Heide i. Holstein, 2001.
- NIEMEYER, H. D.: Bemessung im Insel- und Küstenschutz in Niedersachsen. NLWKN-Forschungsstelle Küste. Forschungsbericht 01/08, 2008.

- NIEMEYER, H. D.: Sturmflutschutz an Niederrückküsten – sind alternative Strategien sinnvoll? In: FANSA, M. (Hrsg.): Kulturlandschaft Marsch, Natur – Geschichte – Gegenwart. Isensee-Verl., Oldenburg, 2005a.
- NIEMEYER, H. D.: Coastal protection of Lowlands: Are alternative strategies purposeful for changing climate? In: Proceedings of the 14th Biennial Coastal Zone Conference, New Orleans/Louisiana, 17-21, 2005b.
- NIEMEYER, H. D.: Protection of Coastal Lowlands: Are Alternative Strategies a Match to Effects of Climate Change? In: Proceedings of 17th IAHR-APD Conference, Auckland/New Zealand, 2010.
- NIEMEYER, H. D. and KAISER, R.: Modeling of Effectiveness of Wave Damping Structures in Wadden Sea Areas. In: Proceedings of 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. Melbourne/Florida, 1998.
- NIEMEYER, H. D. und KAISER, R.: Hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen, Hellern und Sommerdeichen. In: KFKI (Hrsg.): Die Küste, 64, Boyens & Co. KG, Heide i. Holstein, 2001.
- NIEMEYER, H. D.; KAISER, R.; KNAACK, H.; DISSANAYAKE, P.; MIANI, M.; ELSEBACH, J.; BERKENBRINK, C.; HERRLING, G. and RITZMANN, A.: Evaluation of Coastal Protection Strategies for Lowlands in Respect of Climate Change. In: VALENTINE, E. M.; APELT, C. J.; BALL, J.; CHANSON, H.; COX, R.; ETTEMA, R.; KUCZERA, G.; LAMBERT, M.; MELVILLE, B. W. and SARGISON, J. E. (Eds.): Proceedings of the 34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Research and Engineering: 33rd Hydrology and Water Resources Symposium and 10th Conference on Hydraulics in Water Engineering. Barton, A.C.T.: Engineers Australia, 2011a.
- NIEMEYER, H. D.; BERKENBRINK, C.; MIANI, M.; RITZMANN, A.; DISSANAYAKE, P.; KNAACK, H.; WURPTS, A. and KAISER, R.: Coastal Protection of Lowlands: Are Alternative Strategies a Match to Effects of Climate Change? In: SCHÜTTRUMPF, H. and TOMASSICCHIO, G. R. (Eds.): Proceedings of the 5th International Short Conference on Applied Coastal Research, 2011b.
- NIEMEYER, H. D.; KAISER, R.; BERKENBRINK, C.; KNAACK, H. und WURPTS, A.: Evaluierung alternativer Küstenschutz-Strategien in Niedersachsen. Wasser und Abfall 14, Nr. 7/8, 2012.
- REGIERUNGSKOMMISSION KLIMASCHUTZ – Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz: Empfehlung für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels, 49-57, 2012 (<http://www.umwelt.niedersachsen.de/klimaschutz/aktuelles/107128.html>).
- RITZMANN, A. und NIEMEYER, H. D.: Gebietsverluste bei der Strategie Rückzug als Reaktion auf Klimaänderungsfolgen im niedersächsischen Tidegebiet. Forschungsbericht 02/2011, NLWKN-Forschungsstelle Küste, (unveröff.), 2011.
- RITZMANN, A. und NIEMEYER, H. D.: Gebietsverluste bei der Strategie Anpassung als Reaktion auf Klimaänderungsfolgen im niedersächsischen Tidegebiet. Forschungsbericht 02/2012, NLWKN-Forschungsstelle Küste, (unveröff.), 2012.
- WEISSE, R.; VON STORCH, H.; NIEMEYER, H. D. and KNAACK, H.: Changing North Sea Storm Surge Climate: An Increasing Hazard? Ocean & Coastal Management, Vol. 68, 58-68. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2011.09.005, 2012.

- WOTH, K: North Sea storm surge statistics based on projections in a warmer climate: How important are the driving GCM and the chosen emission scenario? In: Geophysical Research Letters, Vol. 32, doi: 10.1029/2005GL023762, 2005.
- WOTH, K; WEISSE, R. and v. STORCH, H.: Climate Change and North Sea Storm Surge Extremes: Ensemble Study of Storm Surge Extremes Expected in a Changed Climate Projected by Four Different Regional Climate Models. Ocean Dynamics, Vol. 56, 2006.