 https://doi.org/10.18171/1.087107

Aktuelle Bemessungspraxis für See- und Ästuardeiche in Niedersachsen

Cordula Berkenbrink[1] und Andreas Wurpts[2]

[1] *Nds. Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Cordula.Berkenbrink@nlwkn-ny.niedersachsen.de*
[2] *Nds. Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz*

Zusammenfassung

Die Bedeutung des Küstenschutzes gewinnt vor dem Hintergrund des zu erwartenden Klimawandels und dessen Auswirkungen auf den Meeresspiegel und die Entwicklung von Extremereignissen zunehmend an Bedeutung. 14 % der Landesfläche Niedersachsens gelten als sturmflutgefährdet. Große Teile davon liegen bereits heute unterhalb des mittleren Tidehochwassers. Ein rund 610 km lange Hauptdeichlinie schützt Bewohner, Industrie, Landwirtschaft und Infrastruktur vor dem Eindringen der Flut.
Dieser Beitrag stellt den aktuellen Stand der Technik in der Bemessungspraxis von See- und Ästuardeichen in Niedersachsen dar und erläutert die Methodik, die seit 2008 im Rahmen der Bilanzierung der Sturmflutsicherheit angewendet wird. Aufbauend auf bewährten Grundlagen erfolgt eine stetige methodische Fortentwicklung der Vorgehensweise zur Einbeziehung aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse mit den Zielen der weiteren fachlichen Absicherung sowie der Reduzierung der Vorhersageunschärfe und Verbesserung der Aussagegenauigkeit. Dabei ist stets die Rechtskonformität zu wahren. Gleichzeitig wird der Erkenntnisfortschritt genutzt, um die Wirtschaftlichkeit zu verbessern, wo durch differenziertere Betrachtung der einwirkenden Kräfte eine ressourcenschonendere Bauweise möglich wird.

Schlagwörter

Bemessungswasserstand, Wellenauflauf, Seegang, Bestickhöhe, Deich, Methodenentwicklung

Summary

The relevance of coastal protection becomes increasingly important in view of the fact, that the climate change – with expected influence on the sea level rise and extreme events – is progressing dramatically. 14 % of Lower Saxony's land area are deemed vulnerable to storm tides. Huge parts of those areas are already situated below mean high water. The 610 km main dike line protects inhabitants, industry, agriculture and infrastructure from the advancing flood.
This paper describes the Lower Saxony state of the art design-height-calculation for sea and estuarine dikes which was initiated by an evaluation study of Lower Saxony storm surge safety in 2008. Based on reliable scientific principles the modus operandi is continuously improved aiming to increase the scientific validation and to improve forecast accuracy while strictly maintaining legal conformity. The advancement

of knowledge is also expected to increase economic efficiency, since a differentiated contemplation of the acting forces allows more ressource-efficient ways of construction.

Keywords

design water level, wave run-up, sea state, dike height, improved methods

1 Einleitung

In Niedersachsen leben rund 1,2 Millionen Menschen auf 14 % der Landesfläche in sturmflutgefährdeten Regionen, dem sogenannten geschützten Gebiet (Abbildung 1). Eine rund 610 km lange Hauptdeichlinie, unterhalten durch 22 lückenlos aneinander anschließende Deichverbände vom Rheiderland an der Ems bis nach Geesthacht an der Elbe, verhindert das Eindringen des Tidehochwassers und insbesondere der Sturmflut ins Binnenland. Die Deichverbände werden durch die Eigentümer aller im Schutz der Deiche liegenden Grundstücke gebildet.

Zudem wird durch den Küstenschutz in Niedersachsen eine große Zahl von Menschen in den Nachbarländern Bremen und Hamburg sowie in der niederländischen Provinz Groningen mittelbar geschützt. Mögliche Folgewirkungen zukünftiger Klimaänderungen, wie beschleunigter Meeresspiegelanstieg, verstärkte Sturmintensität und sich daraus entwickelnde morphodynamische Reaktionen, stellen den Küstenschutz vor besondere Herausforderungen.

Dieser Bericht erläutert die methodische Vorgehensweise bei der niedersächsischen Ermittlung der rechnerischen Deichbestickhöhe. Diese wird seit 2008 in vergleichbarer Form zunächst im Rahmen der Bilanzierung des niedersächsischen Küstenschutzes angewandt und stellt eine implizite Grundforderung des Niedersächsischen Deichgesetzes (NDG) sicher, wonach für die gesamte Hauptdeichlinie ein einheitliches Schutzniveau sicherzustellen ist.

Die rechnerische Bestickhöhe bildet die Grundlage für die Bestickfestsetzung und wird in einem Zyklus von zehn Jahren wiederholt, um auf die zu erwartende Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs angemessen reagieren zu können. Ihre Fortführung wurde aus diesem Grunde in der Empfehlung für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels (Regierungskommission Klimaschutz 2012) gefordert und fand auf diesem Wege Eingang in die klimapolitische Umsetzungsstrategie Niedersachsen (MU 2013).

Es erfolgt eine stetige methodische Fortentwicklung der Vorgehensweise zur Einbeziehung des Wissensstandes mit den Zielen der weiteren wissenschaftlichen Absicherung sowie der Reduzierung der Vorhersageunschärfe und Verbesserung der Aussagegenauigkeit. Dabei wird unmittelbar die Wirtschaftlichkeit verbessert, da mit einer differenzierteren Betrachtung der einwirkenden Kräfte eine ressourcenschonendere Bauweise möglich wird.

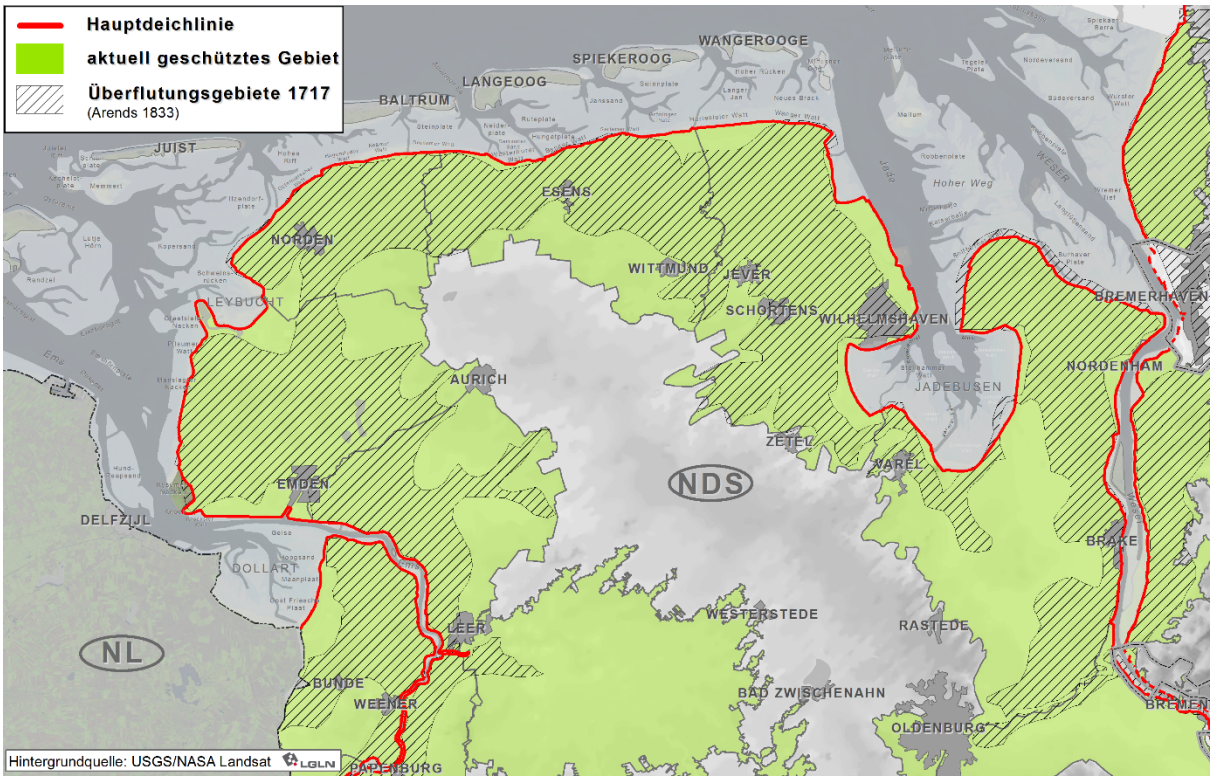

Abbildung 1: Übersicht des durch die Hauptdeichlinie (rote Linie) geschützten Gebietes (grüne Fläche) zwischen Ems und Weser mit der Überflutungskarte der Weihnachtssturmflut 1717 nach Arends (schraffiert) (Niemeyer et al. 2018).

2 Rechtliche und fachliche Grundlagen

2.1 Historische Entwicklung

Nach der Sturmflutkatastrophe von 1953 in den Niederlanden ist in den deutschen Küstenländern die Strategie im Insel- und Küstenschutz von Reagieren auf Vorsorge umgestellt worden. Zudem wurde im Land Niedersachsen nach der Sturmflut vom Februar 1962 mit dem Niedersächsischen Deichgesetz (NDG) eine belastbare planrechtliche Grundlage für Behörden und Deichverbände geschaffen. Für die adäquate Anwendung wurde ein ausführlicher Kommentar erstellt (Lüders und Leis 1964). Die Bemessung im Tidegebiet ist in § 4 des NDG geregelt, wobei folgende Einflussgrößen in der Bestickhöhenermittlung berücksichtigt werden müssen:

- zu erwartendes höchstes Tidehochwasser
- örtlicher Wellenauflauf

Für die Ermittlung des „zu erwartenden höchsten Tidehochwassers“ sind im Kommentar zum NDG konkrete Vorgaben für methodische Umsetzungen angegeben. Da die im Kommentar benannten Verfahren die Oberwasserwirkung in Tideflüssen unberücksichtigt lassen, wurden die Bemessungswasserstände in Tideästuarien weiterhin auf der Grundlage von hydraulischen Modellversuchen ermittelt. Sie sind nach den Sturmfluten vom Januar 1976 über Analogieschlüsse empirisch neu festgelegt worden (Ingenieurkommission 1979); für die Tideelbe wurden sie nach Abstimmungen mit Hamburg und Schleswig-Holstein erneut geringfügig modifiziert (Länderarbeitsgruppe 1988).

Da die im Kommentar zum NDG genannten Verfahren nur dort konkrete Bemessungshöhen liefern, wo Wasserstandsinformationen durch Pegelaufzeichnungen vorliegen und der Einfluss des Oberwassers aus den Binnengewässern nicht berücksichtigt wird, werden heute mathematische Modelle verwendet. Der nach dem Einzelwertverfahren ermittelte Bemessungswasserstand am Küsten- bzw. Mündungspegel im Untersuchungsgebiet bildet den Scheitelwert der mit dem Modell nachgebildeten Sturmflut.

Mangels Informationen über das lokale Seegangsklima in den morphologisch überaus differenzierten Küstengebieten und Ästuaren konnte die Wellenauflaufhöhe anfangs nur auf der Basis vergangener Sturmfluten abgeschätzt werden. Daraus resultierten für lange Deichstrecken pauschale Höhenangaben, die ohne Berücksichtigung der Deichlinienführung und Vorlandsituation angesetzt wurden. Ab 1976 wurden aus eingemessenen Teekgrenzen nach Sturmfluten die zugehörigen kennzeichnenden Seegangsparameter abgeleitet und über örtlich konstante Relationen zur Wassertiefe für den Bemessungsfall extrapoliert und mit ihnen dann der Bemessungswellenauflauf ermittelt (Niemeyer 1977), (Niemeyer et al. 1995). Somit konnte – in Orientierung am Naturgeschehen – eine wesentlich differenziertere Festlegung des Bemessungswellenauflaufs als mit der vorher praktizierten pauschalen Festlegung erreicht werden. Seit 1997 wird der Bemessungsseegang unter Verwendung des vollspektralen Seegangsmodells der dritten Generation SWAN ermittelt (Niemeyer 2001), welches die Eingangsgrößen für die Berechnung der Wellenauflaufhöhe liefert. Mit dieser Methodik wurde eine sowohl sicherere als auch wirtschaftlichere Bemessung von Deichen gegen Wellenauflauf und Wellenüberlauf als bis dahin praktiziert möglich.

2.2 Berücksichtigung der klimatischen Entwicklungen

Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels wirkt sich sowohl auf das küstenschutzrelevante mittlere Tidehochwasser als auch auf das für die Entwässerung der Niederungsgebiete bedeutsame mittlere Tideniedrigwasser aus. Dabei sind im Wesentlichen zwei Effekte ursächlich. Der sterische Meeresspiegelanstieg ist ein sehr langsamer und aufgrund der Wärmespeicherfähigkeit der Ozeane langanhaltender Prozess. Durch die prognostizierten steigenden Temperaturen wird das Wasser an der Oberfläche erwärmt und dehnt sich aus. Durchmischungsprozesse fördern langsam kälteres Wasser nach oben, was sich wiederum aufwärmt und ausdehnen kann. Vergleichbare Prozesse finden bei einer Änderung des Salzgehaltes durch Süßwassereintrag statt, was ebenfalls die Dichte des Wassers verändert und den Wasserspiegel anhebt. Dieser Einfluss ist jedoch deutlich geringer als die Wärmeausdehnung. Der eustatische Effekt bezieht sich auf die Zufuhr von Wassermassen, die vorher nicht Teil der Ozeane waren. Abschmelzende Gletscher oder Eisschilde können den Meeresspiegel deutlich schneller ansteigen lassen als bisher aufgezeichnet. Beide Effekte können Auswirkungen auf die Meeresströme, wie beispielsweise den Golfstrom, erzielen und damit zusätzliche Änderungen in der Neigung der Meeresoberfläche auslösen, was den Meeresspiegel lokal beeinflusst. Hinzu kommt die Landabsenkung der südlichen Nordseeküste (glazialisostatischer Effekt) mit einer eher untergeordneten Rolle. Erdöl- oder Gasentnahmen können die Landabsenkung jedoch lokal beschleunigen.

Seit dem Tiefpunkt der letzten Kaltzeit steigt der Meeresspiegel bis heute an. Durch das in den eiszeitlichen Eisschilden gebundene Wasser lag der Meeresspiegel rd. 120 m unter dem heutigen Niveau. Die flache Nordsee fiel bis über die Doggerbank hinaus

trocken. Bis ca. 5.000 v. Chr. stieg der Meeresspiegel zunächst mit über einem Meter pro Jahrhundert sehr schnell an (Abbildung 2). Danach nahm die Geschwindigkeit ab, zwischenzeitlich gab es sogar rückläufige Phasen, wobei der Trend steigender Wasserstände aber weiterhin anhielt.

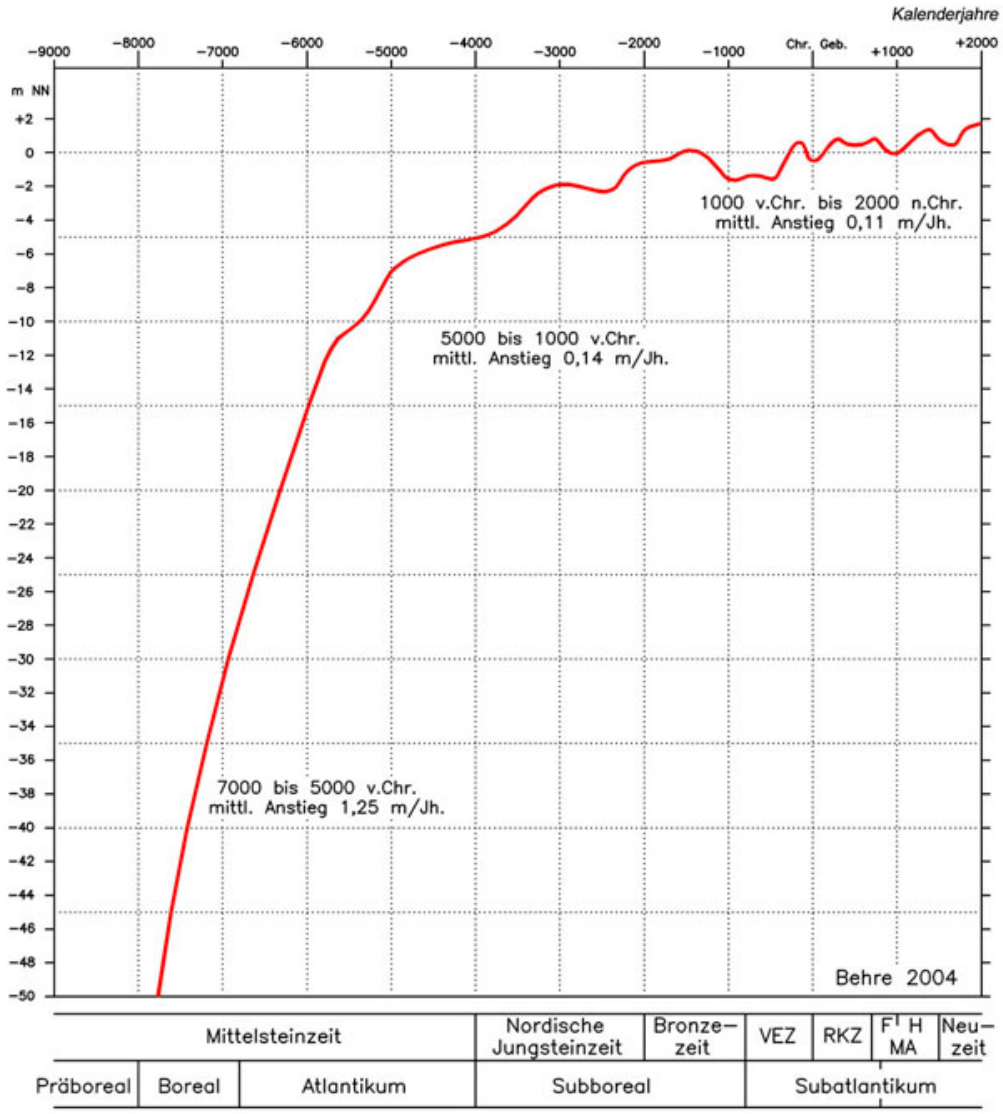

Abbildung 2: Die Anstiegskurve des Mittleren Tidehochwassers an der südlichen Nordsee. Die Altersangaben beziehen sich auf kalibrierte Kalenderjahre. In der Fußleiste sind die Transgressionen in römischen, die Regressionen in arabischen Ziffern angegeben (Behre 2005).

Die jüngste Entwicklung kann anhand von Pegelaufzeichnungen verfolgt werden, sofern diese homogene Datensätze erzeugen, die nicht im Laufe der Jahre durch wasserbauliche oder morphologische Veränderungen in ihrer Umgebung beeinflusst wurden. Man geht davon aus, dass der Norderneyer Messpegel diese Anforderung erfüllt (Abbildung 3). Die Messdaten zeigen im mehrjährigen Mittel einen kontinuierlichen Anstieg der mittleren Tidehoch- und Tideniedrigwasser und einen Anstieg des Tidehubs.

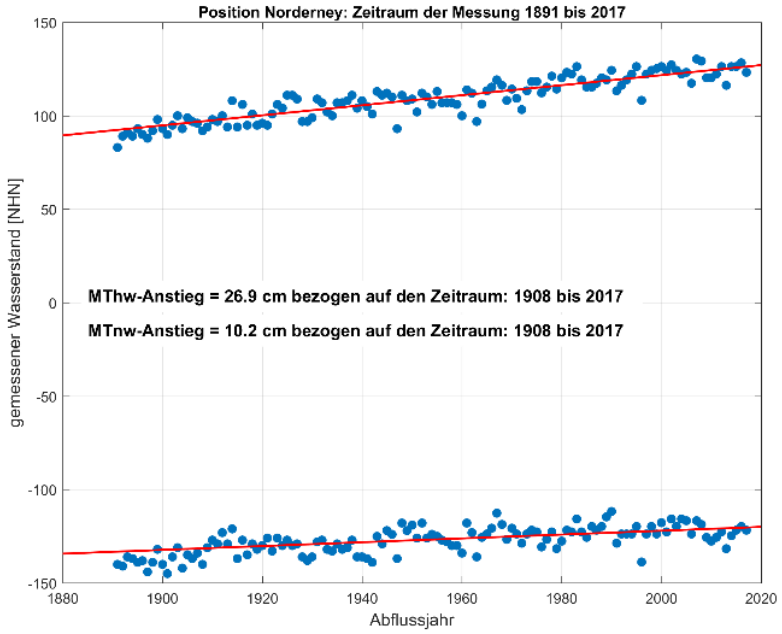

Abbildung 3: Änderung der mittleren Tidewasserstände bezogen auf den Pegel Norderney Riffgat (Pegelbetreiber WSA-Emden).

Die Messwerte unterliegen gewissen natürlichen Schwankungen, zeigen aber insgesamt einen linearen Trend der letzten 120 Jahre von etwa 25 cm pro Jahrhundert MThw-Anstieg. Signifikante Trendänderungen zeichnen sich hier noch nicht ab. Die Schwankungen um die Trendlinie sind unmittelbare Folge der mittleren meteorologischen Situation im betrachteten Zeitraum.

Um die zukünftige Entwicklung des Klimas und – mittelbar – auch des Meeresspiegels abschätzen zu können, werden Klimamodelle eingesetzt, welche die physikalischen Prozesse der Atmosphäre naturnah und energetisch konsistent beschreiben können. Den Antrieb bilden Szenarien der globalen Entwicklung der Treibhausgasemissionen. Für den aktuellen Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC 2014) wurden aus der Bandbreite der in der Literatur beschriebenen möglichen zukünftigen Emissionsverläufe die sogenannten Repräsentativen Konzentrationspfade (RCP) entwickelt. Diese Szenarien erlauben einen höheren Detailierungsgrad und führen u. a. durch die Hinzunahme von Prognosen zum Abtauen des Festlandeises zu neuen, höheren Prognosen im Vergleich zu den vorherigen Sachstandsberichten. Die Modelle werden anhand vergangener Klimadaten validiert und schätzen unter Verwendung der Szenarien die Klimaänderung bis zum Ende des Jahrhunderts ab (Abbildung 4). Dargestellt sind die Prognosen für zwei Emissionsszenarien (durchgezogene Linie) bis 2300 einschließlich der Streubreite, die sich aus den Modellergebnissen selbst ergibt (Breite der Schattierung). Das pessimistische Szenario RCP 8.5 geht von einem ungebremsten Anstieg an Treibhausgasemissionen aus. Hierbei wird angenommen, dass bis 2100 keine effektiven Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen wirksam sind. Dagegen steht das Szenario RCP 2.6. Hier werden ab 2020 wirksame Maßnahmen zur Treibhausgasreduktion angenommen, sodass bereits ab den 2050ern die Konzentration sinkt.

Der aktuelle Sonderbericht über Ozeane und Kryosphäre (SROCC/IPCC 2019) beschreibt unter Verwendung der oben genannten Szenarien die Auswirkungen eines sich wandelnden Klimas auf die Ozeane, deren Ökosysteme und die Folgen für die Menschen.

Obwohl die nun veröffentlichen Werte bis zum Ende des Jahrhunderts die bisher genannten nur unwesentlich überschreiten, zeigt der über 2100 hinaus gefasste Untersuchungszeitraum bis zum Jahre 2300 deutlich eine mögliche Wirkung einer ungebremsten CO_2-Emission für die kommenden Jahrhunderte auf.

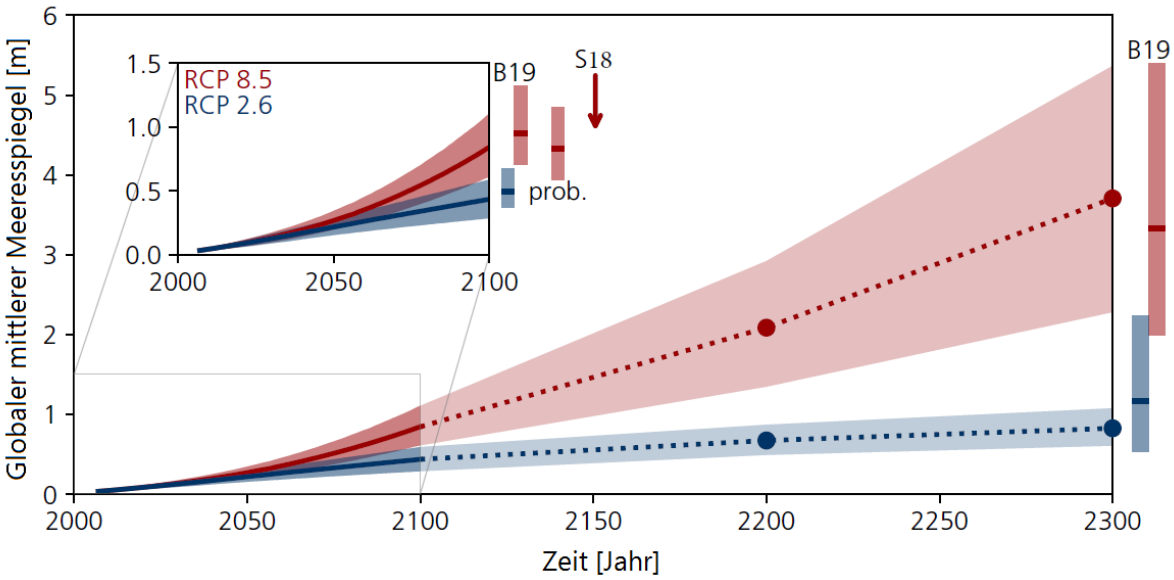

Abbildung 4: Prognostizierter globaler mittlerer Meeresspiegelanstieg bis 2300 für verschiedene Emissionsszenarien (IPCC 2019).

Um die konkreten Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die lokalen Bedingungen an der Niedersächsischen Küste abschätzen zu können, ist die sogenannte Regionalisierung der globalen Szenarien erforderlich. Weitere Fragestellungen zur konkreten lokalen Ausprägung von bislang nur global abgeschätzten Effekten sind Gegenstand aktueller Forschung.

Die Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Meeresspiegels sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Es ist davon auszugehen, dass dieser bis zur nächsten Warmzeit weiter ansteigt; unklar ist jedoch mit welcher Geschwindigkeit. Abhängig vom untersuchten Szenario wird ein mittlerer globaler Meeresspiegelanstieg von rd. 25–100 cm bis 2100 prognostiziert. Auch gibt es bislang kein gesichertes Wissen um die lokale Ausprägung des globalen Anstiegs. Gleiches gilt für den Einfluss der Meteorologie auf die Wasserstände entlang der Niedersächsischen Küste. Die Unterschiede in den Prognosen beruhen im Wesentlichen auf unterschiedlichen Annahmen für Treibhausgase und Aerosole und der Streubreite der Ergebnisse der Klimarechnungen. Ob das Abschmelzen des Festlandeises dabei ausreichend berücksichtigt wurde, ist umstritten.

Trotz der Unsicherheiten müssen die Niederungsgebiete Niedersachsens auf den Meeresspiegelanstieg vorbereitet sein. Insbesondere eine Beschleunigung der derzeitigen Anstiegsrate verkürzt die Reaktionszeiten für Deichverstärkungen im Küstenschutz, wobei durch ein geeignetes Vorsorgemaß sichergestellt sein soll, dass auch für die pessimistischen Szenarien ausreichend Zeit für eine Anpassung der Schutzwerke verbleibt. Zentrales Element einer Schutzstrategie ist daher die regelmäßige Überprüfung der tatsächlichen Entwicklung.

3 Rechnerische Bestickhöhe

3.1 Bemessungswasserstände

3.1.1 Einzelwertverfahren

Die Bemessungswasserstände werden gemäß dem Kommentar zum Niedersächsischen Deichgesetz (Lüders und Leis 1964) nach dem Einzelwertverfahren nach Hundt (1954) in der modifizierten Form nach Lüders (1957) und nach dem Vergleichsverfahren nach Liese bestimmt, wobei der höhere beider Werte gemäß der gesetzlichen Vorgabe anzusetzen ist. An der niedersächsischen Küste ist der Bemessungswasserstand nach dem Einzelwertverfahren maßgebend (Abbildung 5), welches auch die formalen Kriterien des NDG zutreffender erfüllt. Beiden Verfahren ist der deterministische Ansatz gemein, welcher der stringenten formalen Vorgabe des § 4 NDG entspricht, die einerseits eine wahrscheinlichkeitstheoretische Ermittlung der Bemessungswasserstände für Deiche ausschließt und andererseits ein deterministisch begründetes Maximum verlangt (Niemeyer 2001).

Der Bemessungswasserstand wird für ein Zeitfenster ermittelt, welches die nächsten einhundert Jahre berücksichtigt. Dies wird durch ein Vorsorgemaß realisiert, das einen Zuschlag für Klimaänderungsfolgen für 100 Jahre berücksichtigt. Durch den deterministischen Ansatz kann dem Bemessungswasserstand keine Jährlichkeit im Sinne der Binnenhochwasser, die auf statistischen Auswertungen gemessener Hochwasserereignisse beruhen, zugeordnet werden, hat aber durch die Superposition von Extremereignis und Klimazuschlag ein geringes Wiederkehrintervall.

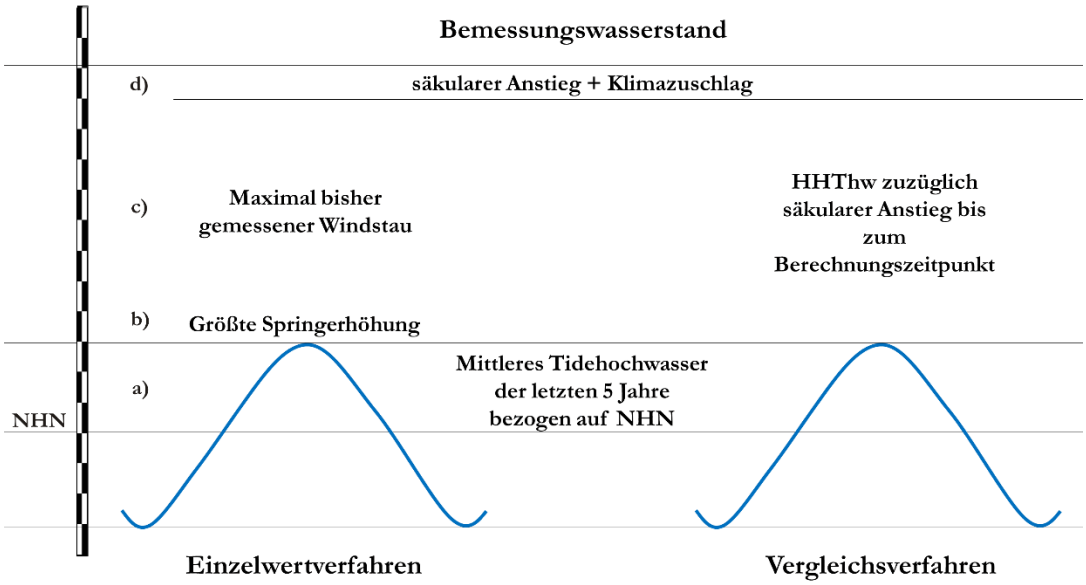

Abbildung 5: Bemessungswasserstände nach dem Einzelwertverfahren und Prüfung durch das Vergleichsverfahren (Lüders und Leis 1964, ML 1973, NLWKN 2007).

Bei dem Einzelwertverfahren werden vier Werte addiert, die den für die Bemessung gültigen höchsten Wasserstand darstellen. Auf das aktuelle fünfjährige mittlere Tidehochwasser (MThw) wird die größte Springerhöhung (b) und der größte bisher aufgetretene Windstau (c) addiert. Hinzu kommt ein Zuschlag für säkulare Effekte bzw. seit 2007 zusätzlich für Klimaänderungsfolgen (d) in Höhe von 50 cm.

Die Addition der maximalen Springtideerhöhung (b) zum MThw und zum gemessenen maximalen Windstau (c) ist keine physikalisch abgeleitete Kombination. Sie stellt vielmehr eine Sicherheitsmarge hinsichtlich eines möglicherweise auftretenden Windstaus dar, der größer ist als die bisher erfassten. Als Windstau wird die Differenz zwischen dem höchsten bisher gemessenen Hochwasser (HHThw) und dem zugehörigen MThw aus gemessenen Werten verwendet.

Die Kenntnisse über die Höhen historischer Sturmfluten sind lückenhaft und teilweise widersprüchlich. Außerdem sind höhere als die bisher beobachteten Sturmfluten nicht nur durch klimatische Veränderungen möglich. Die Rekonstruktionen historischer Windfelder im Rahmen des Forschungsvorhabens „Optimierung empirischer Sturmflutvorhersagen und Modellierung hoch auflösender Windfelder" belegen, dass bereits in der Vergangenheit Stürme mit deutlich höheren stauwirksamen Windgeschwindigkeiten in der südlichen Nordsee aufgetreten sind, als den höchsten bisher erfassten Stauwerten zugrunde lagen. Diese hatten lediglich aufgrund ihres Auftretens zusammen mit dem Tideniedrigwasser keine sehr schweren Sturmfluten zur Folge (Brecht und Frank 2015). Beispielhaft sei hier der Adolph-Bermpohl-Orkan von 1967 genannt (Abbildung 6b), dessen Spitzenböen nicht gemessen werden konnten, der aber über mehrere Stunden eine mittlere Windgeschwindigkeit von 149 km/h hielt (gemessen an der Station Helgoland).

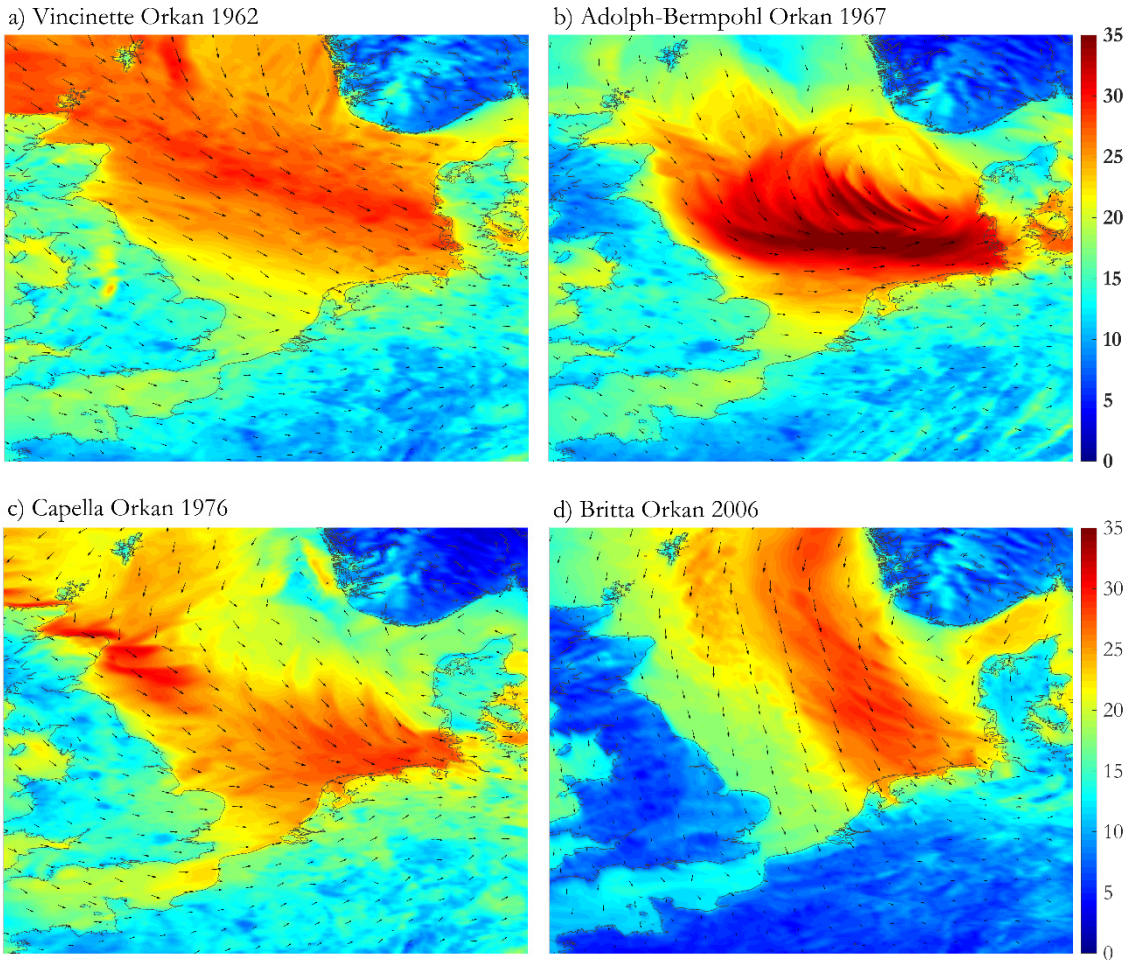

Abbildung 6: Darstellung der maximalen Windgeschwindigkeit in m/s über der Nordsee bei sehr schweren Sturmfluten (a, c und d) und des bisher stärksten gemessenen Sturmes (b).

Neben der Windstärke sind Zugbahn und Dauer des Sturms von hoher Bedeutung. Die Kombination dieser Parameter bietet auch ohne Klimaänderungen schon heute zahlreiche mögliche Ereignisse, die das bisher dokumentierte übersteigen. Außerdem wirkt ein Sturm nicht auf die gesamte niedersächsische Küste gleich stark. So hat z. B. der Orkan Britta (Allerheiligenflut 2006, Abbildung 6d), der zu den bisher höchsten gemessenen Wasserständen in der Ems geführt hat, weniger Einfluss auf die Wasserstände der Elbe als der Orkan von 1976, der dort mit niedrigeren Windgeschwindigkeiten für die höchsten gemessenen Wasserstände sorgte (Abbildung 6c).

Diese Unsicherheiten in dem maßgebenden Faktor Windstau (c) für Sturmfluten werden bei der Bemessung durch eine Erhöhung der Windgeschwindigkeiten als Teil des Vorsorgemaßes für Klimaänderungen (d) und durch die Einbeziehung der maximalen Springerhöhung (b) kompensiert.

3.1.2 Mathematische Modellierung

Das Einzelwertverfahren kann nur dort unmittelbar angewendet werden, wo Wasserstandsinformationen durch Pegelaufzeichnungen vorliegen. In Ästuaren und Tideflüssen ist zudem die Wirkung des Oberwasserabflusses aus dem Hinterland auf die Wasserstände relevant. Um die Bemessungswasserstände flächendeckend auszurechnen und den Oberwasserabfluss in Ästuaren berücksichtigen zu können, werden mathematische Modelle unter der Modellumgebung Delft3D (Deltares 2014) erstellt. Das verwendete Modul Delft3D-Flow ist ein multidimensionales hydrodynamisches Simulationsprogramm, das instationäre Strömungs- und Transportvorgänge, verursacht durch Tide und meteorologische Einwirkungen, auf einem orthogonal gekrümmten Gitter berechnet. Das Modell löst die dreidimensionalen Flachwassergleichungen und die Kontinuitätsgleichungen mit einem impliziten Finite-Differenzen-Verfahren. Für die Sturmflutmodellierungen wurde das Modell zu Beginn im zweidimensional-horizontalen Modus betrieben, somit handelt es sich bei den modellierten Strömungsgrößen um tiefengemittelte Werte. Mit der Möglichkeit, die Berechnungen auf mehrere Prozessoren zu splitten (parallelisierte Berechnungen), konnte die Laufzeit für Berechnungen so verkürzt werden, dass auch dreidimensionale Berechnungen möglich wurden.

Zur Berücksichtigung der großräumigen Sturmflutsituation wird mit einer Modellkaskade aus drei miteinander verknüpften Modellen gearbeitet, deren räumliche Auflösung in Richtung Küste zunimmt. Gesteuert werden die Berechnungen durch Wasserstands-, Luftdruck- und Windinformationen. Die erforderlichen Angaben zu Wasserständen als Randbedingungen am seewärtigen Rand des jeweiligen Detailmodells werden aus entsprechenden Modellläufen des sogenannten Deutsche-Bucht-Modells (WL|Delft Hydraulics 1997, Alkyon 2008) ausgelesen. Da auch dieses Modell für eine naturähnliche Reproduktion von schweren Sturmfluten eine noch zu geringe räumliche Ausdehnung hat, wird dieses Modell wiederum in ein den gesamten kontinentalen Schelf umfassendes Modell (Verboom et al. 1992) eingebettet, das auch Teile des Nordatlantiks umfasst (Abbildung 7). Das Deutsche-Bucht-Modell reicht von der niederländischen Insel Terschelling im Süden bis zum nördlichen Rand des Wattenmeers nördlich von Esbjerg in Dänemark. Das Rechengitter verfügt an den seeseitigen Rändern über eine Auflösung von 600 bis 1000 Metern und an den Küsten von 300 bis 500 Metern bei einer Gesamtzahl von 162.370 aktiven Rechenpunkten. Der Abstand der Rechenknoten des

Kontinentalen-Schelf-Modells beträgt ungefähr 8 Kilometer und die Anzahl liegt bei 19.720.

Die topografischen Grundlagen der Detailmodelle bilden die jeweils aktuellsten Peil- und Laserscandaten, die im Rahmen eines behördenübergreifenden Vermessungskonzeptes erhoben wurden.

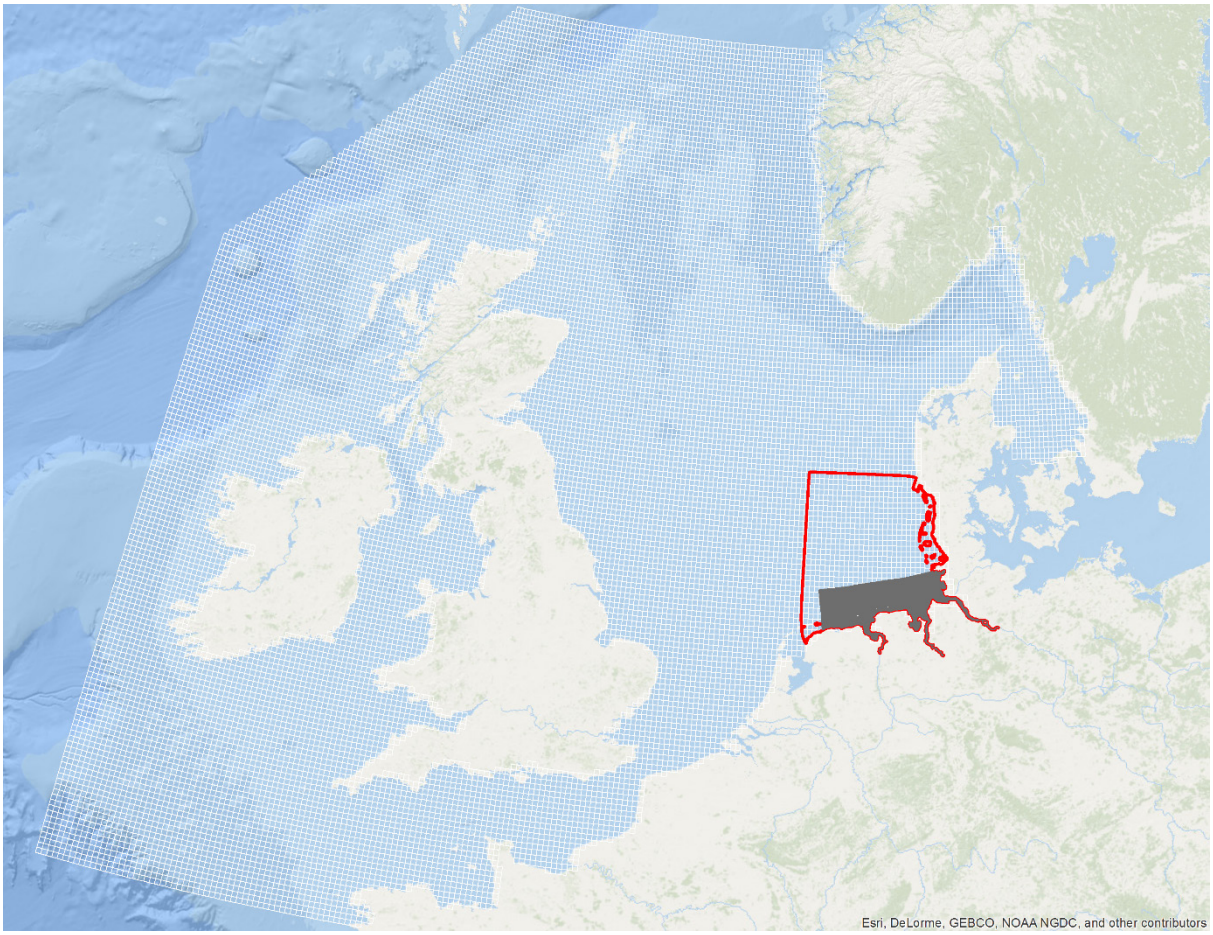

Abbildung 7: Modellkaskade mit Hierarchie der Modellgebiete für die Sturmflutmodellierung.

Um den möglichen Folgen des Klimawandels gerecht zu werden, wird über die Modellkaskade ein dem Vorsorgemaß entsprechender erhöhter Meeresspiegel sowie eine Intensivierung des Windfeldes vorgenommen, sodass an den Küsten- bzw. Ästuarmündungspegeln der Bemessungswasserstand erreicht wird, der mithilfe des Einzelwertverfahrens als Scheitelpunkt der Bemessungssturmflut festgelegt wird.

Der Oberwasserzufluss in den Ästuaren wird am stromauf des Tidewehrs liegenden Modellrand eingesteuert. Hierbei werden 58 % des maßgebenden höchsten Abflusses berücksichtigt (HQ). Der verwendete Abflusswert stützt sich auf die Empfehlungen der Länderarbeitsgruppe (Länderarbeitsgruppe 1988) und Untersuchungen an der Ems des STAWA Meppen (1996).

3.2 Bemessungsseegang

Zur Bestimmung der notwendigen Bestickhöhen wird neben dem Bemessungswasserstand die Bemessungswellenauflaufhöhe benötigt. Hierfür müssen die Seegangsparameter

signifikante Wellenhöhe H_{m0}, Energieperiode $T_{m-1,0}$ und mittlere Wellenangriffsrichtung bekannt sein.

Die Parameter werden mit dem mathematischen Seegangsmodell SWAN ermittelt. SWAN (Simulating WAves Nearshore) ist ein vollspektrales mathematisches Seegangsmodell der 3. Generation (Ris et al. 1995, Holthuisen et al. 1998, Booij et al. 1999), das für die Modellierung der Ausbreitung und Energiebilanz von Seegang in Küstengewässern mit stark gegliederten morphologischen Strukturen geeignet ist.

Die Berechnungen basieren auf der Wellen-Aktions-Gleichung und berücksichtigen physikalische Prozesse wie den Energieeintrag durch Wind, die Wellenausbreitung und -interaktion, sowie Refraktion, Shoaling und Wellenbrechen. Die Modellauflösung beträgt hierzu wenige zehn Meter, um die kleinräumig die Seegangsausbreitung beeinflussende Topografie angemessen berücksichtigen zu können und die Seegangsparameter hinreichend hoch aufgelöst auf die Deichfußlinie übertragen zu können (Abbildung 8).

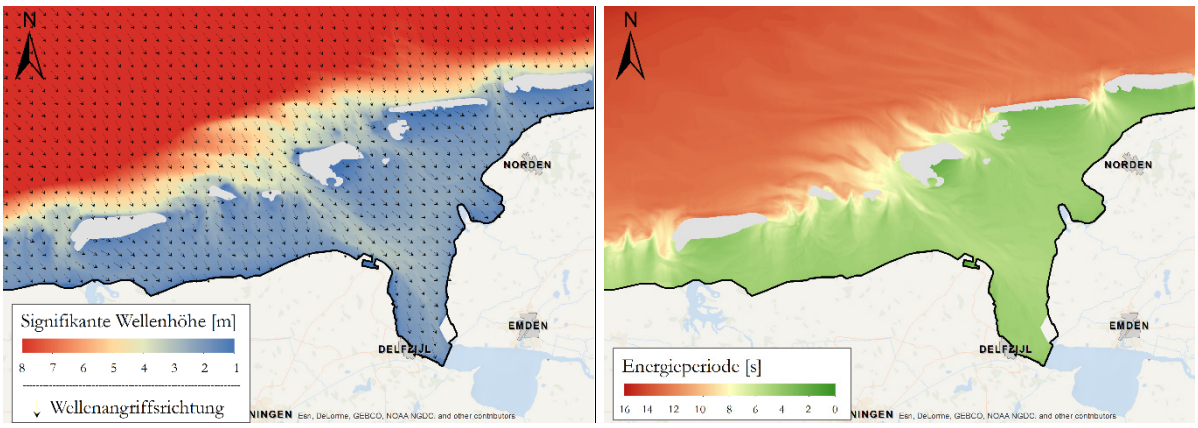

Abbildung 8: Ergebnis einer Seegangsmodellierung für den Bemessungsfall für die Hauptdeichlinie der Deichacht Krummhörn. Links: Signifikante Wellenhöhe H_{m0} und Wellenangriffsrichtung. Rechts: Energieperiode $T_{m-1,0}$.

Um die Wechselwirkungen von Seegang und Tideströmung bei der Ermittlung des Bemessungsseegangs zu berücksichtigen, werden Seegangs- und Tidemodell miteinander gekoppelt betrieben. Durch die Kopplung können zusätzlich zu den Wasserständen auch die Strömungen in ihrer Wirkung auf den Seegang berücksichtigt werden. Neben den stationären Seegangsrechnungen unter Zugrundelegung des Scheitelwasserstandes werden deshalb instationäre Seegangsmodellierungen für Zeitfenster um den Eintritt des Sturmflutscheitelwasserstandes herum durchgeführt. Im Fall der instationären Modellierungen kann das für die Bestickermittlung relevante Maximum der Summe aus Wasserstand und Wellenauflauf häufig mit einem Phasenversatz zum Scheitelwert der Bemessungssturmflut auftreten, weil aus Wechselwirkungen von Seegang und Strömung ein höherer Wellenauflauf resultieren kann als zum Zeitpunkt des Sturmflutscheitels.

Am seeseitigen Rand wird ein JONSWAP-Spektrum eingesteuert (mit: $H_{m0} = 10$ m; $T_{m01} = 12$ s, $T_p = 15$ s). Dieses Spektrum entspricht dem zu erwartenden Extremfall für das Küstenvorfeld der südlichen Nordsee: Es orientiert sich an Extremwerten (Niemeyer 1983) hinsichtlich der Wind- und Wasserstandsentwicklungen im Bemessungsfall (Niemeyer und Kaiser 2001) und ist somit in Einklang mit den Vorgaben des Niedersächsisches Deichgesetzes.

3.3 Bemessungswellenauflauf

Die Seegangsparameter werden in so hoher räumlicher Auflösung ermittelt, dass sie in geringen Abständen voneinander entlang der Hauptdeichlinie in hinreichend differenzierter Form verfügbar sind und zur Ermittlung des Bemessungswellenauflaufs A_{97} mit einer Überlauftoleranz von 3 % genutzt werden können. Dabei wird ein für die niedersächsischen Gegebenheiten modifiziertes Verfahren benutzt (nach van Gent 1999):

$$A_{97} = 1{,}62 \cdot \sqrt{\frac{g}{2\pi} \cdot H_{m0}} \cdot T_{m-1,0} \cdot \tan\alpha \cdot \gamma_R \qquad (1)$$

mit:	A_{97}	:	Bemessungswellenauflauf	[m]
	H_{m0}	:	spektrale signifikante Wellenhöhe	[m]
	$T_{m-1,0}$	:	Energieperiode	[s]
	g	:	Erdbeschleunigung	[m/s²]
	tan α	:	mittlere Böschungsneigung ohne Berme	[-]

Bei schrägem Wellenangriff wird entsprechend der Untersuchungsergebnisse niederländischer Modellversuche für naturähnlichen, kurzkämmigen Seegang (van der Meer und de Waal 1990) eine Abminderung des Bemessungswellenauflaufs um den Faktor γ_R in Abhängigkeit zum Angriffswinkel β des Seegangs vorgenommen.

$$\gamma_R = 1 - 0{,}0022 \cdot \beta \qquad (2)$$

Die oben angebenden Gleichungen werden für alle stationären und instationären Berechnungen und für alle stauwirksamen Windrichtungen um Nordwest gelöst. Das Maximum bildet den Bemessungsfall. Für die Außenböschung werden die in Niedersachsen geltenden Regelneigungen von 1:6 für Seedeiche und 1:4 für Ästuardeiche angesetzt (NLWKN 2007).

Bei hohen Sturmflutwasserständen kann der Wellenauflauf einzelner Wellen die Deichkrone überschreiten. Die Wassermenge läuft dann ganz oder teilweise auf der Binnenböschung ab. Hierdurch sind bei früheren Sturmfluten die Deichbrüche eingeleitet worden. Es ist daher wichtig, den Wellenüberlauf bei der Bemessung zu begrenzen, um ein Versagen des Deiches zu vermeiden. In Niedersachsen wird – im Wesentlichen aus Gründen planrechtlicher Belastbarkeit – nach den Vorgaben des TWB (1967) ein zulässiger Wellenauflauf von 3 % bei der Ermittlung des Bemessungswellenauflaufs A_{97} einbezogen.

4 Überführung der Ergebnisse in die Planungsebene

Die aus Bemessungswasserstand und Wellenauflaufhöhe resultierende erforderliche Bestickhöhe bildet die Grundlage für die Bestickfestsetzung durch die Genehmigungsbehörde. Hier werden die erforderlichen äußeren Abmessungen des Deiches im Profil einschließlich der Sicherungswerke und in der Linienführung beschrieben. Es beschreibt also das erforderliche Maß des Küstenschutzes, welches im Rahmen der Deicherhaltung zu gewährleisten ist. Das Bestick wird in Niedersachsen in der Form einer Allgemeinverfügung vom NLWKN festgesetzt und im Ministerialblatt öffentlich bekannt gemacht.

Auf diese Weise wird die Rechtsbehelfsfrist in Gang gesetzt und Planungssicherheit geschaffen.

An den Landesgrenzen zu Hamburg, Bremen und den Niederlanden ist außerdem zu beachten, dass trotz der teilweise unterschiedlichen Bemessungsmethoden eine einheitliche Deichlinienführung gewährleistet ist. An der niederländischen Grenze stimmten die erforderlichen Deichhöhen ohne weitere Abstimmungsprozesse überein. An der Weser wurde für Niedersachsen und Bremen das hier beschriebene Bemessungsverfahren für das gesamte Ästuar bis zum Tidewehr angewendet. An der Elbe wurden zwischen Schleswig-Holstein, Hamburg und Niedersachsen die Bemessungswasserstände abgestimmt und Randbedingungen für die Wellenauflaufermittlung festgelegt.

Die festgesetzten Deichhöhen werden als SOLL-Höhen im Generalplan Küstenschutz den vorhandenen Deichhöhen gegenübergestellt. So werden die Bereiche an der niedersächsischen Hauptdeichlinie identifiziert, die einen Nacherhöhungsbedarf aufweisen. Der Küstenschutz ist als Gemeinschaftsaufgabe des Bundes und der Länder im Grundgesetz verankert. Die Investitionskosten werden grundsätzlich zu 70 % vom Bund und zu 30 % vom Bundesland getragen.

Derzeit wird an der Fortschreibung des Generalplans Küstenschutz Niedersachsen/ Bremen gearbeitet, der die Ergebnisse bezogen auf die Deichlinienroute darstellt. Die bisher vorliegende Fassung von 2007 (NLWKN 2007) ist insbesondere dahingehend überholt, dass das Vorsorgemaß für säkulare Effekte und Klimaänderungen im Bemessungswasserstand seitdem verdoppelt wurde.

5 Fortentwicklung und Ausblick

Die Tidecharakteristik entlang der niedersächsischen Küste wird durch eine Vielzahl miteinander interagierender Prozesse geprägt. Insbesondere die Wechselwirkungen, die sich aus dem Zusammenspiel der vom Atlantik einschwingenden Gezeitenwelle mit der Küstenmorphologie ergeben, bestimmen das örtliche Tideregime. Diese Tatsache ist insofern von Relevanz, dass die nichtlineare Deformation der Gezeitenwelle auf ihrem Weg vom Nordatlantik bis an die Niedersächsische Küste u. a. eine deutliche Erhöhung der Thw gegenüber dem Wert am Schelfrand zur Folge hat, was sich auf die dortige Ausprägung der halbtäglichen Gezeit ebenso auswirkt wie auf den Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels. Weiterhin spielen die großräumige Wind- und Luftdrucksituation eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung der Wasserstände an der Küste in Extremsituationen.

Durch skalenübergreifende Modellierungen des gesamten Einflussgebietes auf Modellgittern, die durch die Verknüpfung von Rechtecken und Dreiecken die Topografie des Gebietes naturähnlich abbilden können (unstrukturiertes Berechnungsgitter), wird im Gegensatz zur oben beschriebenen Modellkaskade mit Gitterstrukturen, die auf orthogonale Rechtecke beschränkt sind, die reale Situation detaillierter und konsistenter beschrieben.

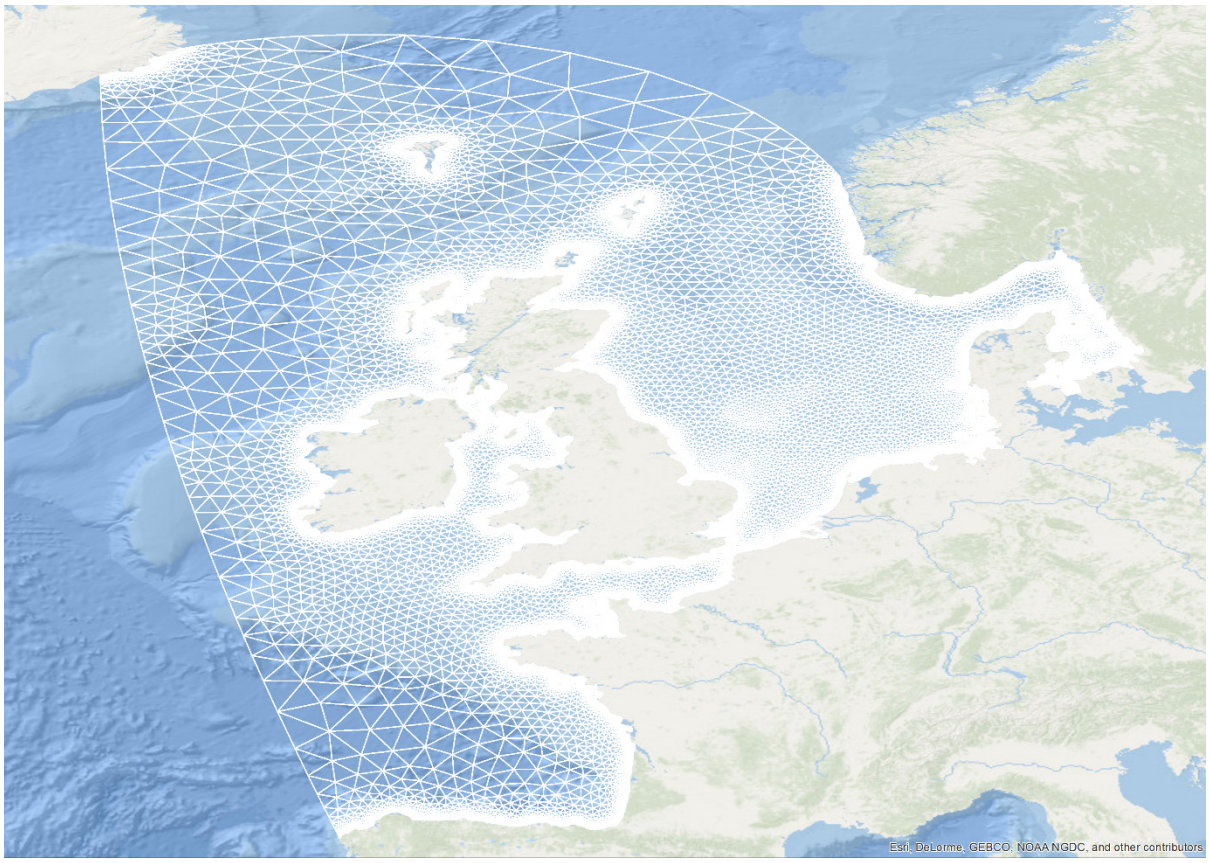

Abbildung 9: Skalenübergreifendes Ästuar-Schelf-Ozean-Modell zur Sturmflutmodellierung (Modellumgebung SCHISM – Hubert et al. 2020, Zhang und Baptista 2008, Zhang et al. 2016).

Das Strömungsmodell kann direkt und vollständig mit vollspektralen Seegangsmodellen gekoppelt werden, sodass auch welleninduzierte Strömungen, insbesondere in flachen Bereichen und in Deichnähe, berücksichtigt werden können.

Die zulässige Wellenüberlaufrate an der niedersächsischen Hauptdeichlinie wird bisher ohne eine Berücksichtigung der Widerstandsfähigkeit des Deichkörpers festgelegt. Naturversuche zur Überlauftoleranz in den Niederlanden zeigten allerdings erheblich höhere Wellenüberlauftoleranzen je nach Kleiqualität und Grasnarbe (van der Meer et al. 2009).

Vor diesem Hintergrund ist es naheliegend, die hydrodynamische Belastung differenzierter zu betrachten und der Widerstandsfähigkeit des verwendeten Baustoffes gegenüberzustellen, um eine effizientere Bemessung von See- und Ästuardeichen hinsichtlich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit zu ermöglichen. Auf dieser Überlegung beruht das Konzept einer integrierten Bemessung (Berkenbrink et al. 2010, Berkenbrink und Niemeyer 2018, Richwien et al. 2010).

Es lassen sich damit nicht nur Sicherheitsreserven oder -defizite bestehender Deiche aufdecken und quantifizieren, was für eine zielgerichtete Priorisierung erforderlicher Verstärkungen hilfreich wäre, sondern es besteht auch erhebliches Potenzial zur Identifikation von Belastungsreserven in Bezug auf höhere Wellenüberlaufmengen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf Klimaänderungen von großer Bedeutung, da bei beschleunigendem Meeresspiegelanstieg längere Reaktionszeiten möglich würden als bisher angenommen. Die Umsetzung der diesbezüglichen Erkenntnisse und bereits ausgearbeiteten Bemessungsansätze in die Praxis des Küstenschutzes sollte daher intensiviert werden, um sowohl die Sicherheit als auch die Wirtschaftlichkeit weiter zu verbessern.

Auch auf der rechtlichen und planerischen Ebene sind stetig Anpassungen in Bezug auf neue wissenschaftliche Erkenntnisse erforderlich. Neue Erkenntnisse in der Klimaforschung und der daraus resultierenden Prognosen für den Meeresspiegelanstieg und die Entwicklung von Extremereignissen betreffen die hier vorgestellte Methodik dahingehend, dass das Vorsorgemaß und der im NDG festgelegte Grenzwert für Nacherhöhungsbedarf für den Bemessungswasserstand geprüft und ggf. erhöht werden müssten.

6 Symbole

A_{97}	Bemessungswellenauflauf	[m]
BWSt	Bemessungswasserstand	[NHN+m]
HHThw	Höchstes Tidehochwasser	[NHN+m]
H_{m0}	spektrale signifikante Wellenhöhe	[m]
HQ	Höchster Abfluss	[m³/s]
MThw	Mittleres Tidehochwasser	[NHN+m]
MTnw	Mittleres Tideniedrigwasser	[NHN+m]
$T_{m-1,0}$	Energieperiode	[s]
T_p	Peakperiode	[s]
g	Erdbeschleunigung	[m/s²]
tan α	mittlere Böschungsneigung ohne Berme	[-]
β	Wellenangriffsrichtung	[°]
γ_R	Empirischer Beiwert für schrägen Wellenangriff	[-]

7 Literaturverzeichnis

Alkyon: German Bight Model Suite – Grid Generation and Set-up of Tidal Flow Models, 2008.

Arends, F.: Physische Geschichte der Nordsee-Küste und deren Veränderungen durch Sturmfluthen seit der cymbrischen Fluth bis jetzt. H. Woortman jun., Emden, 1833.

Behre, K.-E.: Meeresspiegelanstieg-Marschenentwicklung-Küstenlinien. Die letzten 10.000 Jahre an der deutschen Nordseeküste im Zeitraffer. 2005.

Berkenbrink, C.; Kaiser, R.; Niemeyer, H. D.: Mathematische Modellierung hydrodynamischer Belastungen von Deichen. In: Die Küste, 77, 2010.

Berkenbrink, C.; Niemeyer, H. D.: Integrierte Bemessung von See- und Ästuardeichen. In: Die Küste, 86, 2018.

Booij, N.; Ris, R. C.; Holthuisen, L. H.: A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions. Part I, Model Description and Validation, J. Geophys. Research, 104, C4, 1999.

Brecht, B.; Frank, H.: Optimierung empirischer Sturmflutvorhersagen und Modellierung hochauflösender Windfelder, Teilprojekt B: Modellierung hochauflösender Windfelder an der deutschen Nordseeküste. 2015.

Deltares: Delft3D-FLOW – Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual Hydro-Morphodynamics. Version: 3.15.34158. 2014.

Holthuisen, L. H.; Ris, R. C.; Booij, N.: A Verification of the Third-generation Model "SWAN", 5th Int. Worksh. Wave Hindcast. & Forecast.; Melbourne/Fl. USA, 1998.

Hundt, C.: Maßgebende Sturmfluthöhen für das Deichbestick an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste. In: Die Küste, 3, 1953.

Hubert, K.; Berkenbrink, C.; Wurpts, A.: Interaction of Estuarine Morphology and adjacent Coastal Water Tidal Dynamics. In: Die Küste, submitted.

Ingenieurkommission: Erfahrungen und Folgerungen aus den Januar-Sturmfluten 1976 für den Küstenschutz in Niedersachsen. (Autoren: Heinsohn, Kramer, Krause, Luck, Meyer-Toelle, Müller). In: Die Küste, 33, 1979.

IPCC: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M., Allen, S. K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P. M. (Hg.): Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, GB und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, ProClim, Bonn/Wien/Bern, 2014.

IPCC: Ocean and Cryosphere – Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities, SROCC, 2019.

Länderarbeitsgruppe: Bemessungswasserstände entlang der Elbe. (Autoren: Krause, Kroker, Probst, Scherenberg, Siefert). In: Die Küste, 47, 1988.

Lüders, K.: Wiederherstellung der Deichsicherheit an der deutschen Nordseeküste von der holländischen Grenze bis zur Elbe. In: Wasser und Boden, 9, 2, 1957.

Lüders, K.; Leis, G.: Niedersächsisches. Deichgesetz-Kommentar. Verl. Wasser und Boden, Hamburg, 1964.

ML: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen. Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forst -Referatsgruppe Wasserwirtschaft, 1973.

MU: Klimapolitische Umsetzungsstrategie Niedersachsen. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Hannover, 2013.

Niemeyer, H. D.: The Estimation of Design Wave Run-up on Sea Dykes in Consideration of Overtopping Security. Proc. 17th IAHR-Congress Baden-Baden, 1977.

Niemeyer, H. D.: Bemessung von See- und Ästuardeichen in Niedersachsen. In: Die Küste, 64, 2001.

Niemeyer, H. D.: Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. BMFT-Forschungsbericht MF 0203, 1983.

Niemeyer, H. D.; Berkenbrink, C.; Ritzmann, A.; Knaack, H.; Wurpts, A.; Kaiser, R.: Evaluierung von Küstenschutz-Strategie im Hinblick auf Klimaänderungsfolgen. In: Die Küste, 86, 2018.

Niemeyer, H. D.; Kaiser, R.: Design Wave Evaluation for Coastal Protection Structures in the Wadden Sea. In: Proc. 5th Int. Symp. Waves San Francisco/USA, 2001.

Niemeyer, H. D.; Gärtner, J.; Kaiser, R.; Peters, K.-H.; Schneider, O.: Estimation of Design Wave Run-up on Sea Dykes under Consideration of Overtopping Security by Using Benchmarks of Flotsam, 1995.

NLWKN: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen – Festland-, Küstenschutz Band 1, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz. Norden, 2007.

Regierungskommission Klimaschutz – Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz: Empfehlung für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Hannover, 2012.

Richwien, W.; Pohl, C.; Vavrina, L.: Bemessung von Deichen gegen Einwirkungen aus Sturmfluten. In: Die Küste, 77, 2010.

Ris, R. C.; Holthuisen, L. H.; Booij, N.: A Spectral Model for Water Waves in the Nearshore Zone. In: Proc. 24th Intern. Conf. o. Coast. Engg., Kobe/Japan, ASCE, New York, 1995.

STAWA Meppen: Anzusetzender Oberwasserabfluss bei der Überprüfung der Bemessungswasserstände. (Bearb. Ernst). Dienstber. 5-62212 (1219) vom 26.04.1996 (unveröffentlicht), 1996.

TWB (Technisch-Wissenschaftlicher Beirat): Empfehlungen der ehemaligen Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ und ihre Nutzanwendung für den Seedeichbau. Die Küste, 17, 1969.

van der Meer, J. W.; de Waal, J. P.: Waterbeweging up taluds. WL|Delft|Hydraul. Rapp. H 1256, 1993.

van Gent, M. R. A.: Wave Run-up and Wave Overtopping for Double Peaked Wave Energy Spectra. WL|Delft Hydraul., Rapp. H 3551, 1999.

Verboom, G. K.; de Ronde, J. G; van Dijk, R. P.: A Fine Grid Tidal Flow and Storm Surge Model of the North Sea. Continent. Shelf Res., Vol. 12, 1992.

WL|Delft Hydraulics: Set-up and Calibration of Tidal Flow Models Deutsche Bucht und Dithmarschen Bucht. Rapp. H 1821 (unveröffentlicht), 1997.

Zhang, Y.; Baptista, A. M.: SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. In: Ocean Modelling, 21 (3-4), 71–96. 2008.

Zhang, Y.; Ye, F.; Stanev, E. V.; Grashorn, S.: Seamless cross-scale modeling with SCHISM. In: Ocean Modelling, 102, 64–81, 2016.