

SEBOK – A

Seegangbelastung Ostseeküste - Teil A

Gerd Bruss¹, Nestor Jimenez¹, Hartmut Eiben¹, Michael Heinrichs², Jens Riemer² und Roberto Mayerle¹

¹Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, Universität Kiel, e-Mail: bruss@corelab.uni-kiel.de

²Landesbetrieb Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz, Schleswig-Holstein

Kurzfassung

Ziel des Teilprojektes SEBOK-A ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung von Bemessungsgrößen für Küstenschutzanlagen entlang der deutschen Ostseeküste auf Grundlage von Simulationen extremer Sturmszenarien.

Ausgehend von Anfangszuständen der letzten 50 Jahre erzeugte der deutsche Wetterdienst zunächst eine hohe Anzahl (30.000) physikalisch konsistenter Wetterlagen, die nach ihrem Potential hin untersucht wurden, hohe Wasserstände an der deutschen Ostseeküste zu erzeugen. Etwa 60 der so ausgewählten Szenarien mit hohem Sturmhochwasserpotential wurden verwendet, um mit einer Modellkette schrittweise die erzeugten Wasserstände und Seegangshöhen zunächst auf überregionaler Ebene und schließlich entlang der gesamten deutschen Ostseeküste lokal sehr hoch aufgelöst abzuschätzen.

Die verwendeten Modelle basieren auf der Modellfamilie des 'Danish Hydraulic Institute'. Sie wurden mit Hilfe von Messdaten kalibriert und verifiziert, und weisen gute Übereinstimmung mit den Naturdaten auf. Auf überregionaler Ebene, d.h. im Bereich der gesamten Ostsee, wurde ein dreidimensionales Strömungsmodell mit einem tiefengemittelten spektralen Seegangsmodell gekoppelt. Auf lokaler Ebene wurden hochauflösende Profilmodelle verwendet um die morphologische Auswirkung der Szenarien sowie die räumliche Entwicklung von Seegang und mittlerem Wasserstand bis an den Strand berechnen zu können. Diese küstenahen Modelle werden an den offenen Rändern mit den Ergebnissen der überregionalen Modelle in Form von Wasserstands- sowie Seegangszeitreihen angetrieben.

Die meteorologische Rekonstruktion des historischen Sturmes von 1872 durch das Seewet-

teramt Hamburg und das BSH sowie die Implementierung der rekonstruierten Windfelder in der gesamten Modellkette ermöglichten die flächendeckende Bestimmung von Wasserstand und Seegang und damit einen direkten Vergleich mit den Szenarien. In der Pommerischen Bucht erzeugten einige der Szenarien deutlich höhere Wasserstände als die Rekonstruktion von 1872. Hier würde sich also ein vergleichsweise hohes Gefährdungspotential für Küstenschutzanlagen ergeben, die auf Basis des 1872-Ereignisses bemessen wurden. Dagegen haben die Szenarien für den Nordwesten der deutschen Ostsee, z.B. für Flensburg mit dem 1872-Ereignis vergleichbare, und in der Mecklenburger Bucht sogar etwas niedrigere Wasserstände ergeben.

Die endgültige Auswahl der Szenarien, die für Bemessungszwecke herangezogen werden können, basiert einerseits auf der Größenordnung von Wasserstand und Seegangbelastung die direkt auf die zu bemessenden Küstenstrukturen wirken, andererseits auf die Auswirkung der Stürme auf die Morphologie des zu betrachtenden Küstenabschnittes. Der Vergleich der verschiedenen Szenarien untereinander sowie zu dem rekonstruierten Referenzereignis von 1872 führt zu den örtlich jeweils höchsten Belastungen. Das entwickelte Verfahren lässt sich sowohl zur direkten Bemessung künftiger Küstenschutzanlagen als auch zur Sicherheitseinschätzung bestehender Strukturen einsetzen.

Die durch die Szenarien verursachten morphologischen Änderungen in der Strandzone und deren verstärkende Rückkopplung auf den Seegang wurden ebenfalls untersucht. Erste Schätzungen aus den Simulationen liefern eine Größenordnung für die im Sturmverlauf entstehenden Risiken durch das Ausräumen von Stränden und Vorstränden. Die hier auf Profile bezogenen Untersuchungen haben ergeben, dass die Erosion während eines Sturmhochwassers bei der Bemessung von

Küstenschutzanlagen oder der Sicherheitsüberprüfung der Küste mit einzubeziehen ist und es daher weitergehender mehrdimensionaler Untersuchungen bedarf.

1 Einleitung

Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen entlang der deutschen Ostseeküste basieren derzeit noch weitestgehend auf dem Extremereignis des Sturmhochwassers von 1872. Dauer und relatives zeitliches Eintreten von Hochwasser und hohem Seegang werden nicht angemessen berücksichtigt. Zudem liegen Aufzeichnungen des Referenzwasserstandes von 1872 nur für vereinzelte Standorte vor, und verlässliche Aufzeichnungen des Seegangs sind nicht verfügbar.

Das Ziel des Teilprojektes SEBOK–A unter Federführung des Forschungs- und Technologiezentrums Westküste (FTZ) der Universität Kiel ist daher die Entwicklung einer Methode zur Sicherheitseinschätzung natürlicher Küstenformen und vor allem zur realistischeren Abschätzung von Bemessungsparametern für Küstenschutzanlagen, mit denen an jedem Küstenabschnitt entlang der deutschen Ostseeküste die ungünstigsten Belastungen berücksichtigt werden. Gleichzeitig soll die Methode aber auch, je nach Sicherheitsanforderung, für Fälle mit geringerem Gefährdungspotential einsetzbar sein. Das Teilprojekt SEBOK-A ist ein wesentliches Kernstück im Verbundprojekt MUSTOK, weil es in der praktischen Zielsetzung zu konkreten Sicherheitseinschätzungen von Küstenstrukturen im Belastungsfall führt und Bemessungswerte liefert.

Die vorgestellte Strategie verbindet physikalisch konsistente Sturmszenarien, generiert mit einem Ensemble Prediction System (EPS), mit numerischen Ozeansimulationen für Wasserstände und Seegang. Das Konzept für die Modellierung wurde so gewählt, dass von großräumigen Zuständen und Ereignissen schrittweise auf kleinräumige Küstenabschnitte hin verfeinert gearbeitet wird. Abschnitt 3.2 setzt dabei modelltechnisch den Schlussstein an jedem Küstenpunkt. Die Erfassung und Darstellung der relevanten Belastungen aus Sturmereignissen lässt einen Vergleich der Szenarien hinsichtlich des pessimalen Ereignisses zu. Die vorläufigen Ergebnisse legen nahe, den gesamten Verlauf von Sturm-Szenarien anstelle von einzelnen konstanten Werten für Bemessungszwecke zu betrachten.

Die bisher entsprechend festgestellten Küstenbelastungen der betrachteten Szenarien geben wesentliche Anhaltswerte zur Konzeption von konstruktiven Lösungen für Schutzbauwerke und Schutzstrategien.

2 Datengrundlage und Modelle

Die vorgestellte Strategie verbindet meteorologische Szenarien, generiert mit einer Ensemble Methode, mit numerischen Ozeansimulationen für Wasserstände und Seegang. Im Folgenden werden die meteorologische Datengrundlage sowie die verwendeten Modellsysteme erläutert.

2.1 Meteorologische Datengrundlage

Die meteorologischen Sturmszenarien wurden im Teilprojekt MUSE-Ostsee vom Deutschen Wetterdienst erzeugt. Hierbei handelt es sich um physikalisch konsistente, also mögliche Wetterlagen, die jedoch so bisher nicht aufgetreten sind bzw. nicht beobachtet wurden. Zunächst wurde eine große Anzahl von Vorhersagen (ca. 30.000) mit dem EPS des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) für Termine ab 1958 gerechnet, an denen starke Tiefdruckgebiete über der Ostsee aufgetreten sind. Durch eine Variation der Wetterbedingungen im Modell und der daraus resultierenden Veränderung von Intensität und Position der Zyklonen sollten möglichst gefährliche Wetterlagen erzeugt werden. Die Vielzahl der zunächst erzeugten Wetterlagen wurde anschließend anhand von Windgeschwindigkeit und Richtung sowie anhand des mit der empirischen Formel nach Schmagar (die Küste, Heft 66) berechneten Windstaus gefiltert. Die so ausgesuchten ca. 60 Szenarien wurden dann für die weiteren Untersuchungen am FTZ verwendet. Für eine detaillierte Beschreibung der Erzeugung der meteorologischen Datengrundlage wird auf den Beitrag des DWD (Schmitz) innerhalb des vorliegenden Tagungsbandes verwiesen.

Am Seewetteramt des DWD in Hamburg wurde parallel eine Rekonstruktion der Windfelder, die zu dem extremen Hochwasserereignis im November 1872 geführt haben, anhand von historischen Daten vorgenommen. In einem iterativen Prozess wurden die generierten Windfelder anhand von Vergleichen der im Ozeanmodell des BSH damit errechneten Wasserstände mit den gemessenen Wasser-

ständen fortlaufend verifiziert und korrigiert. Eine eingehende Beschreibung der meteorologischen Rekonstruktion findet sich in den Beiträgen des Seewetteramtes (Rosenhagen) sowie des BSH (Bork). Mit den erzeugten Windfeldern wurde die gesamte Modellkette durchlaufen was den detaillierten Vergleich des Referenzereignisses mit den Szenarien ermöglicht.

2.2 HN-Modelle am FTZ

Für SEBOK-A wurden hauptsächlich Modelle der Modellfamilie des 'Danish Hydraulic Institute' (DHI) eingesetzt. Die überregionalen Strömungs- und Seegangmodelle sind Ausschnitte von am DHI operationell betriebenen Nord-Ostseemodellen. Die verwendeten Modellausschnitte decken die gesamte Ostsee ab (vgl. Abbildung 1), die offenen Grenzen liegen im Bereich des Kattegat bzw. Skagerrak. Entsprechend den Projektanforderungen wurden die ursprünglichen Modelle im Bereich der deutschen Ostseeküste weiter verfeinert. Das Strömungsmodell löst auf einem gleichmäßig-rechtwinkligen Gitter die bekannten Bewegungs- und Kontinuitätsgleichungen im Finite-Differenzen Verfahren. Der Einfluss variabler Dichtegradierten, verursacht durch Temperatur- und Salinitätstransporte wird berücksichtigt. Die horizontale Gitterweite wird mittels interaktivem downscaling von 3 Seemeilen im Osten bis auf ca. 600m im Bereich der Kieler und Mecklenburger Bucht angepasst. Die vertikale Auflösung beträgt konstant 2m. Das zweidimensionale phasenmittelnde spektrale Seegangmodell basiert auf einem flexiblen Dreiecksgitter, auf dem die Wellenenergiegleichungen (transport equation for wave action density) im Finite-Volumen Verfahren gelöst werden. Wichtige Faktoren wie Wind, nichtlineare Wellen-Wellen Interaktion sowie Energiedissipation durch ‚whitecapping‘, Bodenreibung und Wellenbrechen werden berücksichtigt. Die Längen der Dreieckskanten variieren zwischen 20km in der zentralen Ostsee und 900m, bzw. 100m an ausgewählten Küstenabschnitten entlang der deutschen Ostseeküste. Die beiden Modelle werden auf überregionaler Ebene gekoppelt.

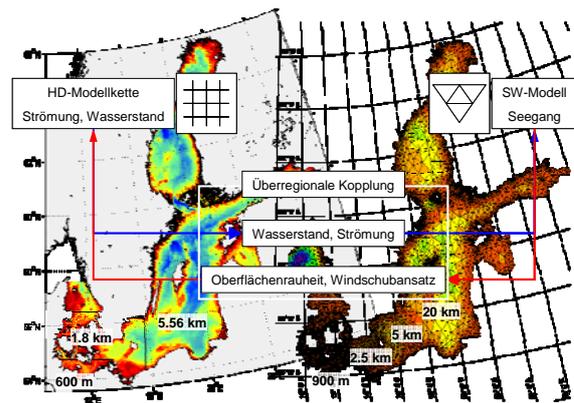


Abbildung 1: Überregionales Modellsystem

Eine Verifikation der Modelle wurde bzw. wird für die beiden Stürme Februar 2002 und Oktober 2006 durchgeführt. Für den meteorologischen Antrieb der Modelle wurden jeweils ca. 2 wöchige Reanalysedaten des DWD dieser Zeiträume verwendet. Anfangswerte für das Strömungsmodell wurden mit einer am BSH entwickelten Methode erzeugt (Janssen), als Randwerte am offenen Rand im Kattegat wurden Messwerte der Pegelstation Ringhals verwendet. Im Strömungsmodell wurde der für das Projekt maßgebende Modell-Parameter Wasserstand gegen Messdaten an 17 deutschen Pegelstandorten verglichen. Für eine erste Validierung wurde ein Windschubansatz nach Smith und Banke verwendet. Die berechneten Standardabweichungen der Differenzen zwischen 8 und 16cm für die einzelnen Pegelstandorte stellen eine gute Aussagekraft des Modells dar. Ein Vergleich zwischen dem Strömungsmodell des BSH und dem am FTZ eingesetzten Strömungsmodell des DHI ist geplant. Die Verifikation des überregionalen Seegangmodells ergab nach der Klassifizierung von Van Rijn (2003) ebenfalls gute Ergebnisse.

Auf lokaler Ebene wurden hochauflösende Profilmodelle verwendet um die morphologische Auswirkung der Szenarien sowie die räumliche Entwicklung von Seegang und mittlerem Wasserstand bis an den Strand berechnen zu können. Angetrieben werden diese küstennahen Modelle an den offenen Rändern mit den Ergebnissen der überregionalen Modelle in Form von Wasserstands- sowie Seegangszeitreihen.

Das phasenauflösende BOUSSINESQ-Seegangsmodul löst die erweiterte Boussinesq-Formulierung im Finite-Elemente bzw. Finite-Differenzen Verfahren, für ein- bzw. zweidimensionale Modellierungen. Das Modul

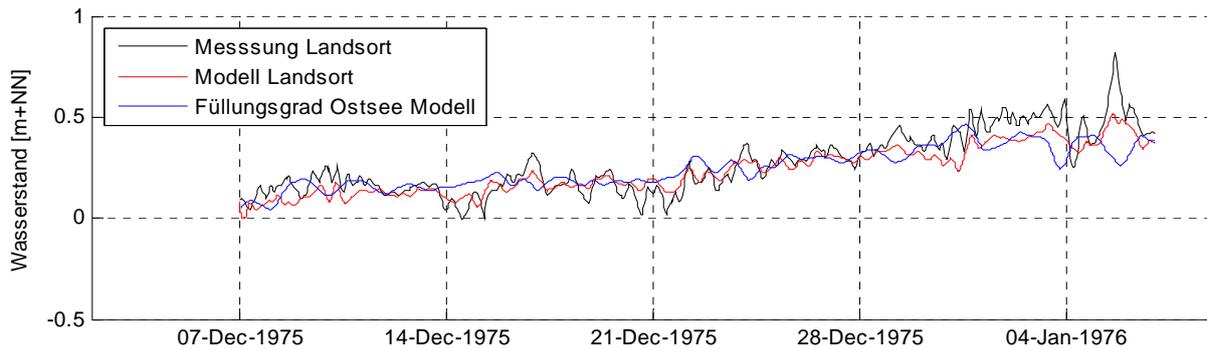


Abbildung 2: Vorlaufrechnung 12.75/01.76, angetrieben durch ‚era40‘ Windfelder

Rekonstruktion 1872

Wie bereits in Abschnitt 2.1 erwähnt wurde die Rekonstruktion des 1872 Ereignisses ebenfalls untersucht. Die am Seewetteramt generierten Windfelder wurden zum Antrieb der beiden überregionalen Modelle verwendet. Abbildung 3 vergleicht die mit dem Strömungsmodell berechneten Scheitelwasserstände mit den historischen Messwerten. Mit Ausnahme der beiden Pegeln Wismar und Warnemünde liegen die Abweichungen unter 35cm. Die Wasserstände an den Pegeln östlich von Fehmarn werden in der Rekonstruktion etwas überschätzt, im Westen dagegen leicht unterschätzt. Abgesehen von den beiden erwähnten Pegeln wird jedoch die generelle Verteilung gut erfasst. Neben dem Wasserstand konnte anhand der Windfelder außerdem die Seegangverteilung über der gesamten Ostsee während des Ereignisses rekonstruiert werden.

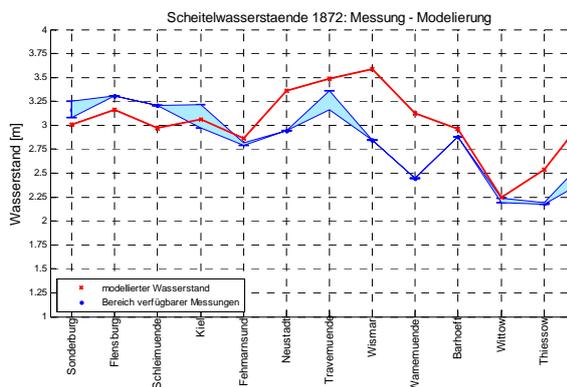


Abbildung 3: Vergleich der Scheitelwasserstände 1872, Rekonstruktion - Messung

Szenariorechnungen

Aufbauend auf die Vorlaufrechnungen wurden flächendeckend Wasserstände und Seegang für die einzelnen Sturmszenarien berechnet. In

Abbildung 4 sind die resultierenden Scheitelwasserstände, geordnet nach Größe, sowie die korrespondierenden maximalen Wellenhöhen am Pegel Kiel-Holtenau aufgetragen. Die Anteile unterschiedlicher auslösender Faktoren am Gesamt-Scheitelwasserstand sind in verschiedenen Farben dargestellt. Rot repräsentiert die Vorfüllung, also den über die gesamte Ostsee gemittelten Wasserstand zu Beginn eines Szenarios. Dieser Wert ergibt sich, wie oben beschrieben, aus den Vorlaufrechnungen. Die beiden Anteile in blau und grün stellen den meteorologischen Einfluss der Szenarien dar. Der blaue Anteil entspricht, für das Beispiel Kiel, dem mittleren Wasserstand der Kieler Bucht. Volumentransporte, zumeist aus der zentralen Ostsee nach Südwesten, die zu Veränderungen des Volumens der Kieler Bucht führen, werden hervorgerufen durch entsprechende großräumige Windverhältnisse, die mit eventuellen Rückschwingungseffekten kombiniert sind. Der grüne Anteil schließlich stellt den lokalen Windstau dar, d.h. die Auslenkung des Wasserstandes der Kieler Bucht um den Mittelwert, verursacht durch lokalen Wind. Durch diese grobe Klassifizierung lassen sich die Ursachen analysieren, die für das Entstehen extremer Wasserstände an der deutschen Ostseeküste nötige Voraussetzung sind.

Am Beispiel Kiel hat die Wasserstandserhöhung als Folge des Volumentransportes (blau) bei allen betrachteten Szenarien den größten Anteil am Scheitelwasserstand. Untersuchungen haben gezeigt, dass die reine Eigenschwingung der Ostsee, also das Zurückschwingen nach einer Auslenkung ohne Berücksichtigung des Windes, einen vergleichsweise geringen Anteil am Wasserspiegelanstieg während eines Sturmereignisses ausmacht. Die Großwetterlage mit entsprechen-

den Windverhältnissen über der zentralen Ostsee und dem Kattegat spielt demnach eine entscheidende Rolle.

Lokaler Windstau verursacht in den Szenarien eine maximale Wasserstandserhöhung von ca. 0,5m am Pegel Kiel Holtenau. In der Pommerischen Bucht, wo in den Szenarien generell örtlich höhere Windgeschwindigkeiten auftraten ist, z.B. an der Station Koserow, der Anteil des lokalen Windstaus höher.

Der Anteil der Vorfüllung an den Scheitelwasserständen der Szenarien schwankt zwischen -0,2 und +0,6 m NN. Da diese Bandbreite von 0,8m nicht unerheblich ist und die Höhe der Vorfüllung in keinem erkennbaren Verhältnis zur Höhe der erreichten Scheitelwasserstände steht, stellt sich die Frage nach der Zulässigkeit einer nachträglichen Anpassung aller Szenarien auf eine einheitliche Vorfüllung. Für die Begründung einer nachträglichen Anpassung muss daher die statistische Abhängigkeit der Szenarien vom Wettergeschehen der vorangegangenen 3-4 Wochen geklärt werden. Für Erörterungen zu diesem Thema wird auf den Beitrag der Universität Siegen verwiesen.

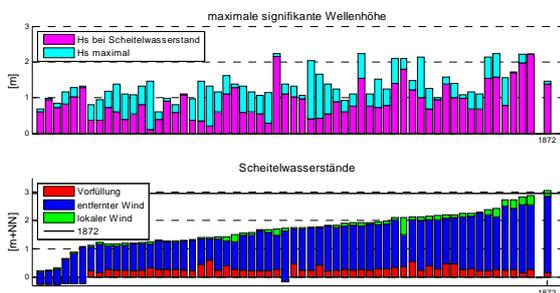


Abbildung 4: Scheitelwasserstände und signifikante Wellenhöhen in Kiel Holtenau

Aus den Ergebnissen des überregionalen Seegangmodells sind in Abbildung 4 oben zwei signifikante Wellenhöhen aufgetragen. Zum einen (magenta) handelt es sich um die signifikanten Wellenhöhen des Seegangs der zeitgleich mit dem Scheitelwasserstand aufgetreten ist, und zum anderen (cyan) um den maximal während des Szenarios erreichten Seegang an der Pegelstation Kiel Holtenau. Aus der Darstellung geht hervor, dass nur bei ca. 10% der Szenarien die beiden Maximalwerte von Wasserstand und Seegang zeitgleich auftreten. Das Auftreten von hohem Seegang scheint außerdem nicht an bestimmte (hohe) Wasserstände gebunden zu sein. Die Analyse

ungünstigster Belastungsfälle lässt sich folglich nicht auf die Betrachtung der beiden Maximalwerte reduzieren. Relatives zeitliches Eintreten von hohem Wasserstand und Seegang sowie Dauer des Sturmereignisses müssen berücksichtigt werden.

Der jeweils ganz rechte Balken in Abbildung 4 stellt den mit den rekonstruierten Windfeldern (vgl. 2.1) berechneten Scheitelwasserstand und Seegang des 1872 Ereignisses dar. Der in Kiel-Holtenau aufgezeichnete Scheitelwasserstand, als schwarze Linie dargestellt, wird in der Rekonstruktion nur geringfügig überschätzt. Auffällig ist der dennoch vergleichsweise geringe Anteil der Vorfüllung bei der Rekonstruktion. 88% des Scheitelwasserstandes werden durch den Anstieg des mittleren Wasserstandes der Kieler Bucht verursacht (blauer Anteil). Hervorgerufen wird dieser Anstieg durch einen kurzfristigen Volumentransport sowohl von Nordosten als auch vom Kattegat her nach Südwesten, angeregt durch nordwestlich bis nordöstliche Winde von bis zu 30m/s über der gesamten Südwestlichen Ostsee. Der lokale Seegang in Kiel bleibt in der Rekonstruktion vergleichsweise gering.

Sowohl rekonstruierter als auch gemessener Scheitelwasserstand von 1872 konnten durch die Szenarien in Kiel nicht ganz erreicht werden. Anderenorts wurden die Werte von 1872 durch die Szenarien zum Teil deutlich überschritten (vgl. Abbildung 5). Da die Szenarien in der Kieler Bucht zu niedrigeren Scheitelwasserständen, jedoch höherem Seegang als in der Rekonstruktion von 1872 geführt haben, kann die Frage nach dem ungünstigeren lokalen Belastungsfall im Vergleich zwischen Szenarien und 1872 durch die alleinige Betrachtung der Scheitelwerte nicht beantwortet werden. Abschließend für die Diskussion der Scheitelwerte wird deren räumliche Verteilung analysiert.

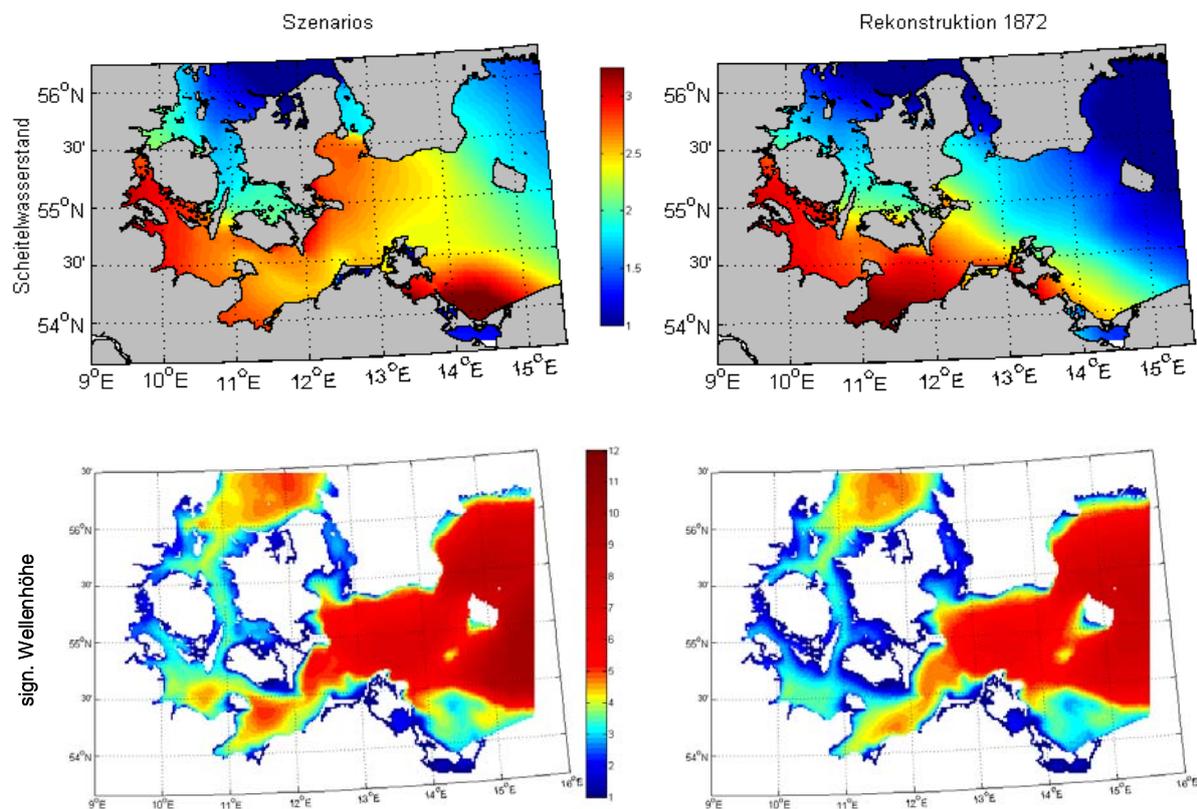


Abbildung 5: Vergleich Scheitelwerte Szenarien – Rekonstruktion 1872

In Abbildung 5 kann die räumliche Verteilung der Scheitelwerte von Wasserstandes (oben) und signifikanter Wellenhöhe (unten) zwischen den Szenarien (links) und der Rekonstruktion 1872 (rechts) verglichen werden. Dargestellt sind die in allen Szenarien bzw. während der Rekonstruktion 1872 maximal erreichten Werte in jeder Gitterzelle des Strömungs- bzw. Seegangsmodells.

Wie bei der Verifikation der Rekonstruktion 1872 gegen Messwerte bereits erläutert wurde, werden die Scheitelwerte in der Mecklenburger Bucht etwas überschätzt, die generelle Verteilung des Scheitelwasserstandes von 1872 in Abbildung 5 ist jedoch durchaus realistisch. Betrachtet man diese Verteilung vereinfacht als die Höhe, auf welche Küstenschutzanlagen derzeit bemessen sind, kann man durch einen Vergleich mit den Szenarien direkt das Gefährdungspotenzial, bezogen auf Scheitelwasserstände, entlang der gesamten deutschen Ostseeküste ablesen. Die Szenarien erreichen z.B. im Osten, in der Pommerschen Bucht, deutlich höhere Werte als die Rekonstruktion von 1872. Hier würde sich ein vergleichsweise hohes Gefährdungspotenzial ergeben. Im äußersten Nordwesten der deutschen Ostsee, in Flensburg, haben die Szena-

rien mit 1872 vergleichbare Wasserstände erzeugt.

Beim Seegang haben sich bei den Szenarien allgemein etwas höhere Werte ergeben als bei der Rekonstruktion von 1872. Dies liegt daran, dass der Seegang direkter auf lokale Windverhältnisse reagiert als der Wasserstand. In den Szenarien ist an jedem Ort eine deutlich größere Bandbreite an Windverhältnissen mit hohen Windgeschwindigkeiten aufgetreten, die den Wasserstand jedoch nicht extrem beeinflusst haben müssen. Da die physikalische Konsistenz der Szenarien ein entscheidendes Fundament der beschriebenen Methode bildet, ist die simple Überlagerung der beiden Verteilungen von maximalem Wasserstand und maximalem Seegang nicht zulässig. Wie bereits am Beispiel Kiel gezeigt, besteht kein klarer Zusammenhang zwischen den beiden Parametern. Zudem ist das zeitgleiche Eintreten beider Maximalwerte innerhalb eines Sturmes eher selten.

3.2 Untersuchungen im Küstennahbereich

Im vorigen Abschnitt wurde beschrieben, wie auf überregionaler Ebene die Verläufe von

Wasserstand und Seegang für die Szenarien sowie die Rekonstruktion des 1872 Ereignisses berechnet wurden. Im Bereich der deutschen Ostseeküste liegen diese Ergebnisse mit einer Auflösung von 600m für den Wasserstand sowie ca. 100m für den Seegang vor. Um die räumliche Entwicklung dieser Größen bis in küstennahe, für den Küstenschutz relevante Bereiche verfolgen zu können wurden hochauflösende küstennormale Profilmodelle für unterschiedliche Anwendungen aufgebaut. Die den Modellen zugrundeliegenden Theorien wurden bereits in Abschnitt 2.1 beschrieben.

Abbildung 6 zeigt schematisch die Küstennormalen an 4, in Zusammenarbeit mit dem ALR Kiel entsprechend ihrer Gefährdung ausgesuchten Strandabschnitten (Probstei, Fehmarn Nord, Dahme / Kellenhusen und Timmendorfer Strand). Um die Arbeitsweise zu verdeutlichen sind, beispielhaft für ein Szenario, die Ergebnisse der überregionalen Modelle in Form der Verläufe von Wasserstand und Seegang an den jeweiligen seeseitigen Enden der 4 Profile dargestellt. Diese Zeitreihen werden als Antriebsdaten für die Profilmodelle an deren offenen Rändern angesetzt. Die Richtungshistogramme repräsentieren die Wellenanlaufrichtung, die ebenfalls als Randwert in die Profilmodelle eingesteuert wird. Der Vergleich der Verläufe von Wasserstand und Seegang sowie der Wellenanlaufrichtung in Relation zur Küstenorientierung verdeutlicht die großen Unterschiede in der lokalen Auswirkung eines Sturmes. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, Untersuchungen zum Küstenschutz für jeden Strandabschnitt individuell durchzuführen.

Zunächst wurde die qualitative morphodynamische Wirkung der Szenarien an den betrachteten Küstenquerschnitten berechnet. In Abbildung 6 ist am Beispiel der Probstei die Veränderung der Profiltopografie, wie sie mit dem morphologischen Modell für ein Szenario berechnet wurde, dargestellt. Anfangs und Endzustand können verglichen und die verursachte Erosion berechnet werden. Die Erosion kann hier als ein Maß für die vom Sturm auf den jeweiligen Strandabschnitt eingebrachte Energie betrachtet werden. Damit können die Szenarien in ihrer Wirkung auf die Topografie untereinander sowie mit der Rekonstruktion des 1872 Ereignisses verglichen werden. Abbildung 7 vergleicht die 15 stärksten Szenarien an 4 verschiedenen Strandprofilen. Das untere Diagramm zeigt die qualitative Profil-Erosion, in der erneut die hohe räumliche Variabilität der Sturmauswirkungen deutlich wird. Im oberen Diagramm sind die zu den jeweiligen Sze-

narien und Orten gehörenden Scheitelwerte von Wasserstand und Seegang übereinander aufgetragen. Es wird deutlich, dass kein linearer Zusammenhang zwischen der morphologischen Wirkung eines Sturmes und den einzeln erreichten Scheitelwerten von Wasserstand und Seegang besteht, wie bereits in Abschnitt 3.1 angedeutet wurde. Die Dauer des Ereignisses und das relative zeitliche Eintreten von Hochwasser und hohem Seegang sind ebenso wichtige Faktoren. Neben der Auswahl örtlich relevanter Szenarien, basierend auf den reinen Scheitelwerten wie etwa für die Bemessung eines starren Bauwerks, kann mit dieser Methode zudem eine Auswahl über die morphologische Auswirkung der Stürme erfolgen. Eine Einbeziehung der Rekonstruktion des Ereignisses von 1872 in den Vergleich wird derzeit noch bearbeitet.

Um die so ausgewählten Szenarien für die eigentliche Bemessung von Küstenschutzanlagen einsetzen zu können wird das phasenauflösende Boussinesq-Seegangsmodell verwendet, um den räumlichen Verlauf von mittlerem Wasserstand und Seegang bis an die Küste zu verfolgen. Durch die hohe Auflösung der Profilmodelle und die damit verbundene Berücksichtigung auch kleinskaliger Effekte wird eine detaillierte Abschätzung der Seegangsbelastung direkt auf dem betrachteten Schutzbauwerk bzw. Strand über den gesamten zeitlichen Verlauf der Stürme möglich.

Erste Berechnungen entlang der beschriebenen Profile wurden durchgeführt, zunächst unter Einbeziehung der derzeit vorhandenen Schutzbauwerke. Somit konnte für den gesamten Verlauf eines Sturmes die tatsächlich auf dem Schutzbauwerk wirkende Seegangsbelastung ermittelt werden. Die Einbeziehung der Rekonstruktion von 1872 in die laufenden Untersuchungen ist geplant. Aus der Kombination mit dem morphodynamischen Modell kann schließlich die Auswirkung verschiedener möglicher Topografien auf Wellendissipation und tatsächliche Bauwerksbelastung abgeschätzt werden. Die Untersuchung der verstärkenden Wirkung von im Sturmhochwasserlauf auftretender Vorstrand- bzw. Stranderosion auf den Seegang hat bisher ergeben, dass der Einfluss einer veränderbaren Topografie nicht zu vernachlässigen ist.

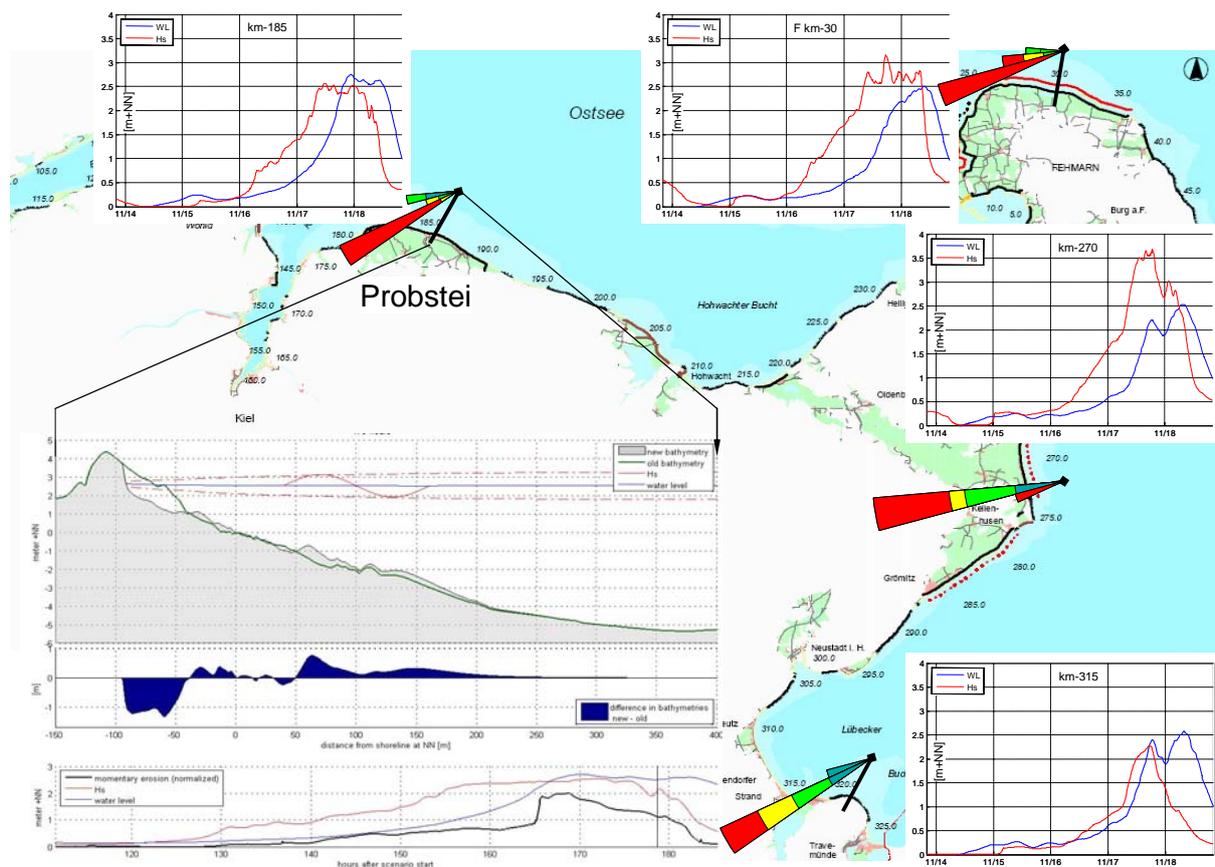


Abbildung 6: Schematische Darstellung von Strandnormalschnitten, Antriebsdaten der Profilmodelle und morphologischen Profilberechnungen

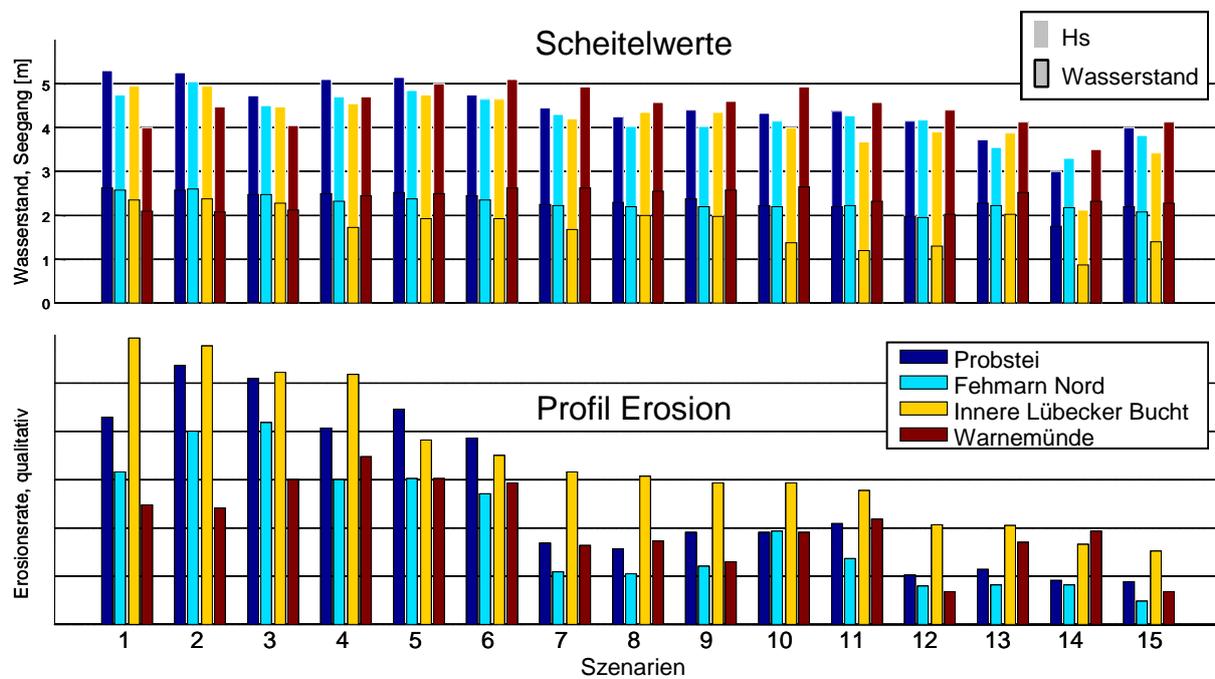


Abbildung 7: Vergleich von Profilerosion und Scheitelwerten für 16 Szenarien an 4 Standorten

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt ein Verfahren vor, die Sicherheit natürlicher Küsten und extreme Belastungen von Küstenschutzanlagen entlang der deutschen Ostseeküste durch numerische Simulationen abzuschätzen und daraus neue Bemessungsgrößen abzuleiten. Ausgehend von überregionalen Berechnungen von Wasserstand und Seegang physikalisch konsistenter Sturmszenarien wurde die räumliche Entwicklung der Parameter mit lokal hochauflösenden Modellen bis in die Strandzone verfolgt. Durch die differenzierte Betrachtung des zeitlichen Ablaufs einzelner Stürme kann die akkumulierte Sturmwirkung, etwa in Form des Energieeintrages auf den betrachteten Strandabschnitt, bestimmt werden. Die erfolgreiche meteorologische Rekonstruktion des historischen Sturmes von 1872 ermöglicht die flächendeckende Bestimmung der Verläufe von Wasserstand und Seegang sowie die daraus resultierenden Küstenbelastungen für dieses Referenzereignis. Dies erlaubt im Rahmen des vorgestellten Verfahrens einen direkten Vergleich mit den verwendeten Szenarien.

Im Unterschied zu bestehenden Bemessungsverfahren, die hauptsächlich auf der Betrachtung von Scheitelwerten basieren, können mit der vorgestellten Methode realistische Küstenbelastungen direkt auf Strand bzw. Schutzbauwerk als Resultat realistischer Sturmverläufe bestimmt werden. Anwendungen können an beliebigen Orten entlang der deutschen Ostseeküste, z.B. zur Bemessung eines Schutzbauwerks gegen Seegang und hohe Wasserstände, erfolgen. In Modellierungsläufen, in denen die Wirkung der als örtlich relevant definierten Sturmszenarien auf das Bauwerk bestimmt wird, kann das Bauwerk iterativ an die Anforderungen von Wasserstand und Wellenauflauf angepasst werden. Die Sicherheit bestehender Küsten kann auf gleiche Weise überprüft werden. Aufgrund der verbleibenden Schwierigkeit, die synthetischen Wetterlagen einzustufen, wird die Möglichkeit einer Zuordnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten derzeit an der Universität Siegen untersucht.

Die Methode SEBOK A ist zunächst nur auf eine starre Gewässersohle bezogen worden. Zur ersten Einschätzung der Rückkopplung einer veränderbaren Strand- und Vorstrandtopografie auf Seegang und Wellenauflauf wurde die im Verlauf des Sturmhochwassers entstehende erosionsbedingte Verstärkung des See-

gangs untersucht. Die auf Profile bezogenen Untersuchungen haben ergeben, dass der Aspekt der „Sturmfluterosion“ bei der Bemessung von Küstenschutzanlagen oder der Sicherheitsüberprüfung der Küste mit einzubeziehen ist. Um die Variabilität natürlicher Küstenverläufe, die bei den Profiluntersuchungen nicht angemessen berücksichtigt werden konnte, besser zu erfassen, bedarf es daher weitergehender mehrdimensionaler Untersuchungen.

Literatur

- MLUR (2001): Generalplan Küstenschutz Schleswig Holstein
- StAUN (1995): Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg Vorpommern
- KFKI (2002): EAK 2002 Empfehlungen für Küstenschutzwerke, Die Küste, Heft 65
- KFKI (2003): Die Wasserstände an der Ostseeküste, Die Küste, Heft 66
- Frank Janssen (2002): Statistische Analyse mehrjähriger Variabilität der Hydrographie in Nord- und Ostsee, Dissertation, Universität Hamburg
- Smith S. D.; Banke E. G. (1975): Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. Quart. J. R. Met. Soc. 101, 665-673
- Komen, G.J, L. Cavaleri, M. Doneland, K. Hasselmann, S. Hasselman and P.A.E.M. Janssen, (1994): Dynamics and modelling of ocean waves, Cambridge University Press, UK, 560 pp
- Madsen, .P.A. and S Ørensen, O.R. (1992): A New Form of the Boussinesq Equations with Improved Linear Dispersion Characteristics, Part 2: A Slowly-varying Bathymetry. Coastal Eng.,18, 183-204

Deigaard, R. and Fredsøe, J. (1989): Shear stress distribution in dissipative water waves. Coastal Engineering, ASCE, vol. 13, pp. 357-378

Fredsøe, J. and Deigaard, R. (1992): Mechanics of Coastal Sediment Transport. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 3, World Scientific.

Isobe and Horikawa (1982): Study on water particle velocities of shoaling and breaking waves, Coast. Eng. in Japan, Vol.25, pp.109-123

Van Rijn, L.C., Walstra, D.J.R., Grasmeijer, B., Sutherland, J., Pan, S. and Sierra, J.P. (2003): The predictability of a cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. Coastal Eng.,47, 295-327