

Seegangmodellierung der Ostsee für Extremereignisse und Rekonstruktion des Sturmes von 1872

Von NESTOR JIMENEZ, GERD BRUSS, HARTMUT EIBEN und ROBERTO MAYERLE

Z u s a m m e n f a s s u n g

Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse der Entwicklung und Anwendung eines Seegangsmodells zur Abschätzung von Wellenhöhen in der deutschen Ostsee vor. Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen des vom Bundesminister für Bildung und Forschung finanzierten Projekts SEBOK-A. Auf Grundlage eines vom Danish Hydraulic Institute entwickelten Modellsystems sind gekoppelte Strömungs- und Seegangmodelle der Ostsee verwendet worden. Die Gegenüberstellung von Naturmessungen und Simulationsergebnissen an mehreren Lokalitäten und über mehrere Zeitperioden weisen eine gute Übereinstimmung auf. Für die gesamte deutsche Ostseeküste werden die Ergebnisse der Simulationen für mehrere Extremereignisse, einschließlich der Sturmflut von 1872, vorgestellt. An den exponierten Küstenlinien im Norden von Fehmarn und Rügen wurden an der NN-10 m Tiefenlinie signifikante Wellenhöhen von maximal ca. 5 m und in den südlichen Buchten und Förden Höhen von unter 3 m berechnet. Das hier entwickelte Modell und die zugehörigen Ergebnisse können zur Erweiterung des bestehenden Datenkollektivs für Extremereignisse sowie zur Verbesserung bestehender Kriterien für die Bemessung von Küstenschutzwerken verwendet werden.

S c h l a g w ö r t e r

Sturmflut, Seegang, Ostsee, numerisches Modell

S u m m a r y

This paper summarizes results of the development and application of a wave model for prediction of wave heights along the German Baltic Sea. The investigations have been carried out in the framework of the Project SEBOK-A funded by the German Ministry of Education and Research. A coupled flow and wave model implemented on the basis of the modelling system developed by the Danish Hydraulics Institute in Denmark is used. Comparisons of model results and measurements at several locations covering several periods showed good agreement. Results of the model application for several extreme events including the 1872 storm are provided throughout the entire coastline. Maximum significant wave heights of up to about 5 m and 3 m resulted respectively along the more exposed north-eastern coastlines of the islands Fehmarn and Rügen and in the more protected southern bays and fjords. The model developed here and the results obtained may be used for enhancing the existing fundamental criteria in the design of structures of coastal protection as well as for the extension of existing databases of extreme events.

K e y w o r d s

Storm surge, waves, Baltic Sea, numerical model

I n h a l t

1. Einleitung	192
2. Beschreibung des Seegangmodells	192
3. Verifikation	194
4. Rekonstruktion des Seegangs des historischen Sturmes von 1872	197
5. Anwendung des Seegangmodells in SEBOK-A	198
5.1 Maximale Wellenhöhen entlang der deutschen Ostseeküste	198
5.2 Räumliche Verteilung des Seegangs	201
6. Vergleich der Modellergebnisse der Rekonstruktion von 1872 mit beobachteten Zerstörungen	202
7. Schlussfolgerungen	204
8. Schriftenverzeichnis	205

1. E i n l e i t u n g

An der deutschen Ostseeküste verursachte die Sturmflut von 1872 die höchsten jemals aufgezeichneten Wasserstände. Infolgedessen wurde und wird diese Sturmflut auch immer dann zur Bemessung von Küstenschutzanlagen herangezogen, wenn die Anlagen den größtmöglichen Schutz für die Bevölkerung bieten sollen. Die Wasserstände dieser Sturmflut wurden noch vergleichsweise gut aufgezeichnet. Deren konkrete räumliche Verteilung ist dagegen nicht überall an der Ostseeküste ausreichend darstellbar und muss für Orte, für die keine Aufzeichnungen vorliegen, durch Interpolation abgeschätzt werden. Auch konnte meistens nur ein zeitlich kleinerer Teil des Sturmflutverlaufes aufgezeichnet werden. Konkrete Angaben über Seegang während des Sturmes gab es nicht. Die räumliche Verteilung des Seegangsverlaufes bei extremen Sturmfluten wurde bisher für die gesamte deutsche Ostseeküste noch nicht differenziert dargestellt. Lediglich lokale Ereignisse von meist geringerer Wirkung wurden aufgezeichnet. Die Sturmflut von 1872 konnte somit, insbesondere hinsichtlich der Gefährdung der Küstenschutzwerke, bisher nicht konkret genug eingeschätzt und demzufolge nicht mit anderen Stürmen verglichen werden.

Ziel dieses Beitrages ist es, mit Hilfe der Rekonstruktion der Seegangsbedingungen des Sturmes von 1872, auch im Vergleich mit den Seegangssimulationen der im Rahmen von MUSTOK erzeugten extremen Stürme, eine bessere Einschätzung der Größenordnung sowie der räumlichen Verteilung extremer Seegangshöhen entlang der deutschen Ostseeküste zu erlangen. Ferner werden die hydrodynamischen Bedingungen zu den beim Sturm von 1872 verursachten Schäden in Beziehung gesetzt und die Sturmflut hinsichtlich der Gefährdung der Küstenschutzwerke besser eingeordnet.

2. B e s c h r e i b u n g d e s S e e g a n g s m o d e l l s

Das am Forschungs- und Technologiezentrum Büsum (FTZ) im Rahmen von SEBOK-A verwendete Seegangmodell basiert auf dem am Danish Hydraulic Institute (DHI) entwickelten phasenmittelnden spektralen Seegangmodell dritter Generation (MIKE21-SW). Das Modell löst die spektrale Wellenenergiebilanzgleichung im FiniteVolumenVerfahren auf einem flexiblen Dreiecksgitter. Dabei wird das Seegangsfeld an jedem Gitterelement durch ein diskretes zweidimensionales Dichtespektrum der Wellenenergie repräsentiert. Die zeitliche Integration wird anhand eines instationären fraktionellen Zeitschrittes in expliziter „Multisequenz-Methode“ durchgeführt.

Im Seegangmodell werden folgende physikalische Prozesse erfasst: Windgeneriertes Wellenwachstum, nichtlineare Wellen-Wellen-Interaktion, Dissipation durch Schaumkronenbrechen, tiefeninduziertes Wellenbrechen und Bodenreibung sowie durch Tiefenvariationen verursachte Refraktion und Shoaling. Zudem wird die Interaktion zwischen Seegang und Strömung sowie der Einfluss einer zeitlich veränderlichen Wassertiefe berücksichtigt. Die grundlegende Formulierung der Wellenenergiebilanzgleichung im obengenannten numerischen Modell entspricht dem ursprünglich von KOMEN et al. (1994) und YOUNG (1999) entwickelten Ansatz, der im ersten operationellen Seegangmodells des Atlantiks, dem „WAVE prediction Model“ (WAM), implementiert worden ist. Damit ist MIKE21-SW anderen spektralen Seegangmodellen, wie z.B. dem von Delft Hydraulics entwickelten „Simulating WAVes Nearshore“ Modell (SWAN), die ebenfalls auf dem Ansatz von WAM basieren, im Grundansatz ähnlich. Unterschiede bestehen hauptsächlich in der Konzeptionierung der Quellterme von Wind-Wellen-Interaktion und Wellenbrechen sowie in der numerischen Implementierung.

Das überregionale Seegangmodell in SEBOK-A deckt die gesamte Ostsee inklusive Kattegat ab. Die offene Grenze des Modells verläuft entlang des neunten Längengrades im Skagerrak (siehe Abb. 1). Das Modell basiert auf einem flexiblen Dreiecksgitter, dessen Auflösung zwischen 25 km in küstenfernen Gebieten der zentralen Ostsee und 900 m in der südwestlichen Ostsee variiert. Im Rahmen von SEBOK-A wurde zur Bestimmung überregionaler Wasserstände und Strömungen für die hier untersuchten Stürme ein dreidimensionales Strömungsmodell der Ostsee mit einer vertikalen Auflösung von 2 m eingesetzt (BRUSS et al., 2009). Sowohl Strömungs- als auch Seegangmodell sind Ausschnitte von Nord-Ostseemodellen, die am DHI operationell betrieben werden (www.waterforecast.com).

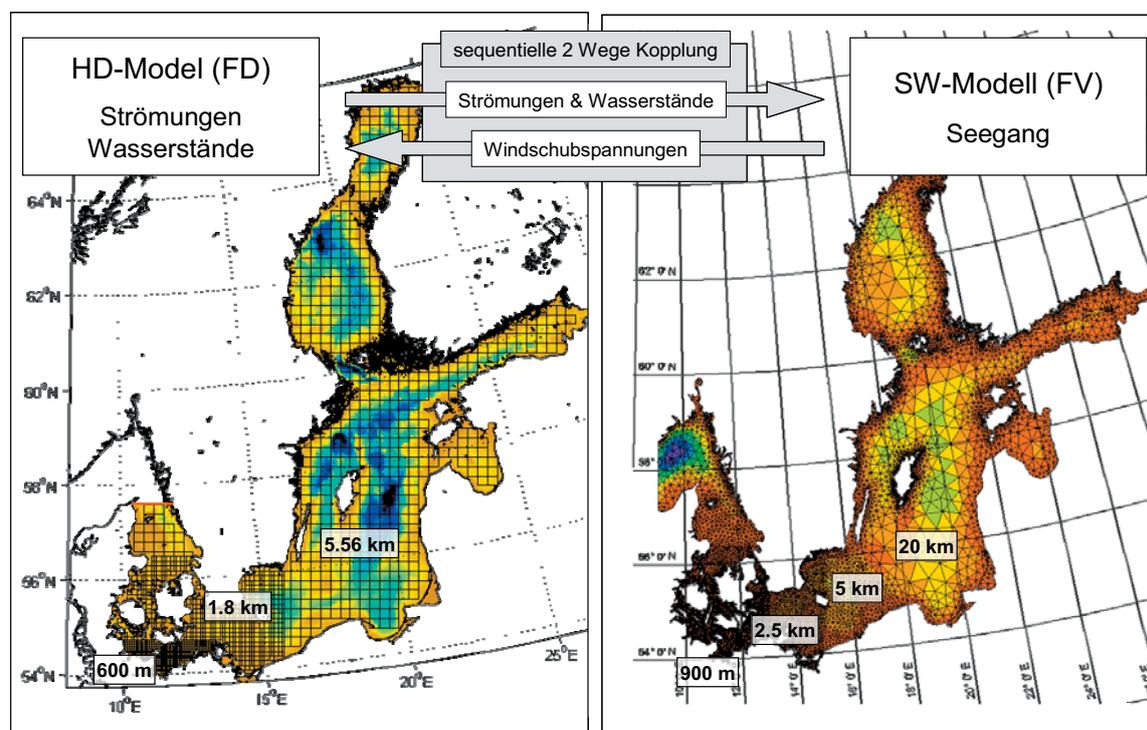


Abb. 1: Überregionales Modellsystem des FTZ und Kopplungsstrategie

Abb. 1 zeigt in einer Übersicht die beiden Modelltopographien mit den jeweils verwendeten Gittern in schematischer Auflösung sowie das Schema der verwendeten Kopplungsstrategie. Die Kopplung erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Gitter sequenziell, wobei Wasserstände und Strömungen vom Strömungsmodell an das Seegangmodell weitergegeben werden. In umgekehrter Richtung wurden die Ergebnisse des Seegangmodells als Antrieb für das Strömungsmodell verwendet, um die Unsicherheit empirischer Windschubansätze bei hohen Windgeschwindigkeiten zu vermeiden. Dazu wurden die Windschubspannungen, die im spektralen Seegangmodell des DHI ähnlich der im WAM Cycle 4 implementierten „wind-over-waves coupling theory“ nach JANSSEN (1989, 1991) iterativ bestimmt werden, im Strömungsmodell direkt als Randbedingung an der freien Oberfläche eingesetzt (BRUSS u. MAYERLE, 2009).

3. Verifikation

In Abb. 2 sind von West nach Ost vier Seegangsmessstationen, die für die Validierung des Seegangmodells verwendet wurden, aufgeführt. Ferner sind für jede Station die Validierungszeiträume angegeben. Station M1 liegt im ufernahen Bereich vor Niendorf. Sie repräsentiert die Position eines ADCP aus einer Gruppe von insgesamt drei ADCP-Einheiten, die vom FTZ Büsum in der inneren Lübecker Bucht ausgelegt wurden. Vor Niendorf sind Seegangparameter (signifikante Wellenhöhe, Wellenperiode, Wellenrichtung), Wasserstände und Strömungen seit Oktober 2006 aufgezeichnet worden. Die Messdaten an den Stationen M2, M3 und M4 wurden vom Staatlichen Amt für Natur und Umwelt (StAUN) Rostock durch induktive Strömungsmessgeräte und Seegangmessbojen (ISM-2000 Series) aufgenommen.



	Station	Quelle	Zeitraum der Validierung
M1	Niendorf	FTZ-Büsum	Nov-2006
M2	Boltenhagen	StAUN	Nov-2006
M3	Ahrenshoop	StAUN	Feb-2002
M4	Varnkevitze	StAUN	Nov-2006

Abb. 2: Seegangsmessstationen zur Validierung

In SEBOK-A wurde das Seegangmodell zur Simulation extremer Sturmverläufe verwendet. Für die Verifizierung wurden daher die Sturmperioden vom Februar 2002 und November 2006, für welche Seegangsaufzeichnungen vorlagen (vgl. Tab. in Abb. 2), untersucht. Für die erste Sturmperiode am 21. Februar 2002 sind in Abb. 3 die signifikanten Wellenhöhen aus Modellergebnissen den gemessenen Wellendaten am Standort Ahrenshoop gegenübergestellt. Das Maximum der aufgezeichneten signifikanten Wellenhöhen lag bei ca. 1,50 m. Der zeitliche Verlauf der modellierten Wellenhöhen folgt den Messdaten zufriedenstellend, wobei das Maximum am 21.02. leicht unterschätzt wird.

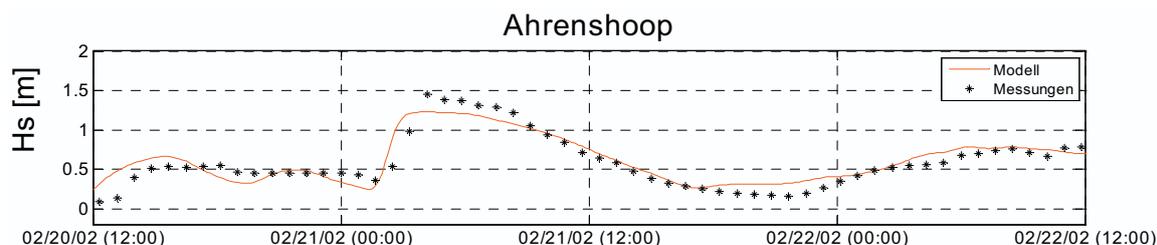


Abb. 3: Vergleich signifikanter Wellenhöhe Februar 2002

Für den Sturm am 1. November 2006 wurden die drei Stationen Niendorf, Boltenhagen und Varnkevitze zur Verifizierung verwendet. Bei den Gegenüberstellungen in Abb. 4 ist zunächst erkennbar, dass der Trendverlauf der vor Varnkevitze und Boltenhagen gemessenen und modellierten signifikanten Wellenhöhen ähnlich verläuft.

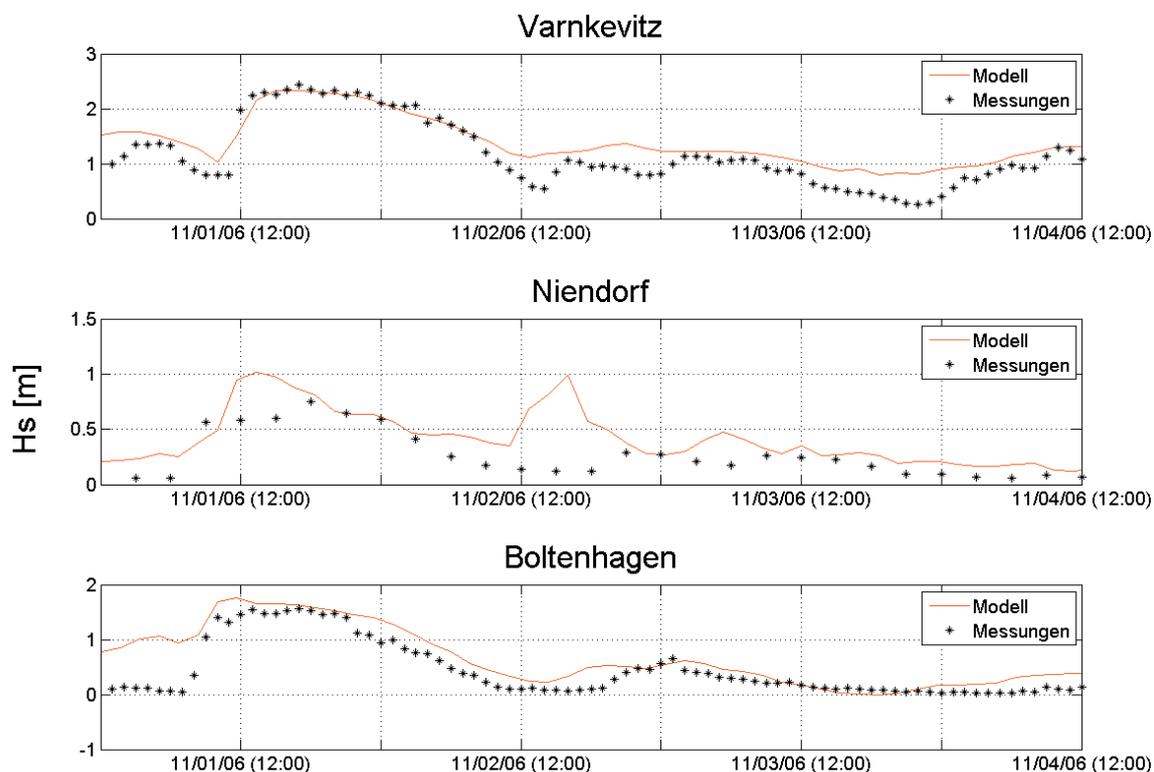


Abb. 4: Gegenüberstellung signifikanter Wellenhöhen vor Varnkevitze, Niendorf und Boltenhagen für die Sturmperiode im November 2006

Differenzierter betrachtet werden die Wellenhöhen der Simulationen bei niedrigen Windgeschwindigkeiten tendenziell überschätzt. Die für die Fragestellung im Projekt relevanten Spitzen werden durch das Modell jedoch gut wiedergegeben. An der küstennahen Station vor Niendorf wurden die Seegangsmessungen in geringeren Wassertiefen durchgeführt. Die Auflösung des großräumigen Seegangmodells führt hier zeitweise zur Überschätzung der Wellenhöhen.

In Abb. 5 erfolgt eine Gegenüberstellung des modellierten und gemessenen Seegangs in Streudiagrammen mit Angabe des relativen mittleren absoluten Fehlers (RMAE). Die beste Übereinstimmung von Modellierung und Messung besteht an den Stationen Varnkevitz und Ahrenshoop mit einem RMAE von 0,09 bzw. 0,096. Gemäß statistischen Qualifizierungen von VAN RIJN (2002) ist das benutzte Modell danach als „gut“ einzustufen. Nach gleicher Qualifizierung sind die Modellergebnisse der Stationen Niendorf und Boltenhagen als „angemessen“ zu bewerten. Die Verifizierung der Wellenperiode ergab RMAE-Werte von 0,04, 0,2 und 0,18 für die Stationen Varnkevitz, Boltenhagen und Ahrenshoop. Für Niendorf ergab sich, mit einem RMAE-Werte von 0,5 auch bei der Periode eine größere Abweichung zu den Messdaten. Dies wird ebenfalls auf die Auflösung des großräumigen Modells in direkter Küstennähe insbesondere vor Niendorf zurückgeführt.

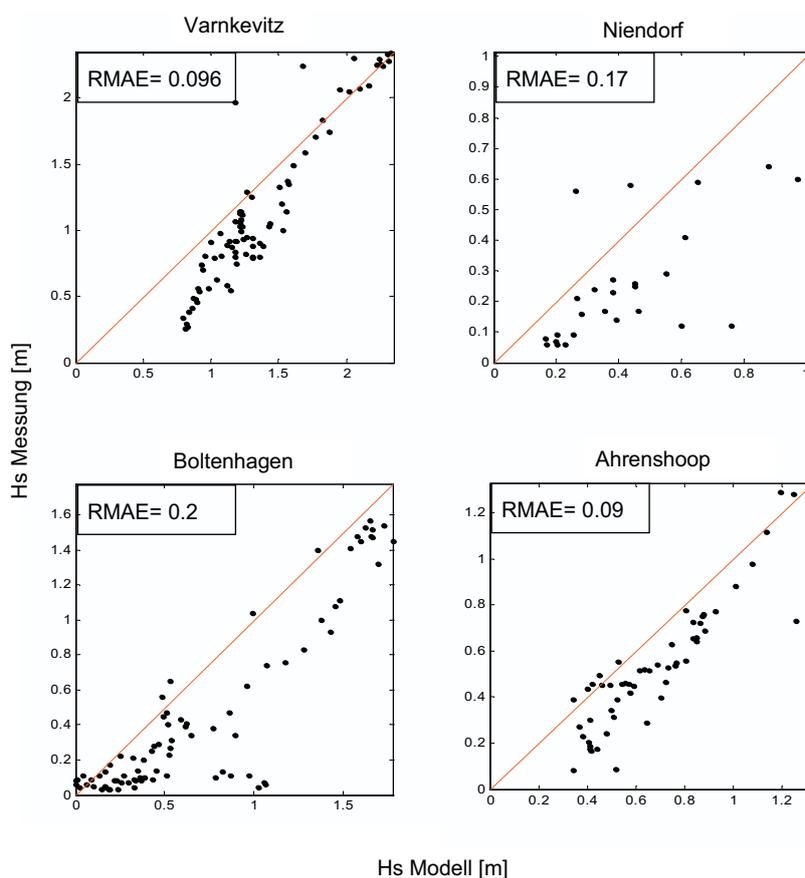


Abb. 5: Streudiagramme für simulierte und gemessene signifikante Wellenhöhen an den betrachteten vier Stationen im Bereich der südwestlichen Ostsee

Da für die im Weiteren vorgestellten Ergebnisse stets Orte im tiefen Wasser (an der 10-m-Tiefenlinie) betrachtet werden, haben die Ungenauigkeiten im lokalen küstennahen Flachwasserbereich der inneren Lübecker Bucht keinen Einfluss auf die getroffenen Aussagen. Für

Untersuchungen im Küstennahbereich (BRUSS et al., 2009) wurden kleinräumige lokale Modelle mit deutlich höherer Auflösung in das hier betrachtete Modell der gesamten Ostsee integriert.

4. Rekonstruktion des Seegangs des historischen Sturmes von 1872

Die Sturmflut von 1872 ist als das extremste an der deutschen Ostseeküste beobachtete Sturmereignis eingestuft. Dessen höchste Wasserstände werden auch künftig bei der Bemessung von Deichen mit höchster Schutzwirkung herangezogen werden (Generalplan Küstenschutz in Schleswig-Holstein, MLR 2001). Am Seewetteramt des DWD in Hamburg wurde eine Rekonstruktion der Luftdruck- und Windfelder, die zu dem extremen Hochwasserereignis im November 1872 geführt haben, auf Grundlage historischer Daten vorgenommen (ROSENHAGEN u. BORK, 2008, 2009). Anhand der Windfelder konnten in dieser Studie erstmals die Seegangsverhältnisse des historischen Ereignisses rekonstruiert werden. Das FTZ Büsum modellierte auf Basis dieser Wind- und Luftdruckdaten sowohl die Wasserstandsentwicklung (BRUSS et al., 2009) als auch den räumlichen und zeitlichen Ablauf des Seeganges dieser Sturmflut.

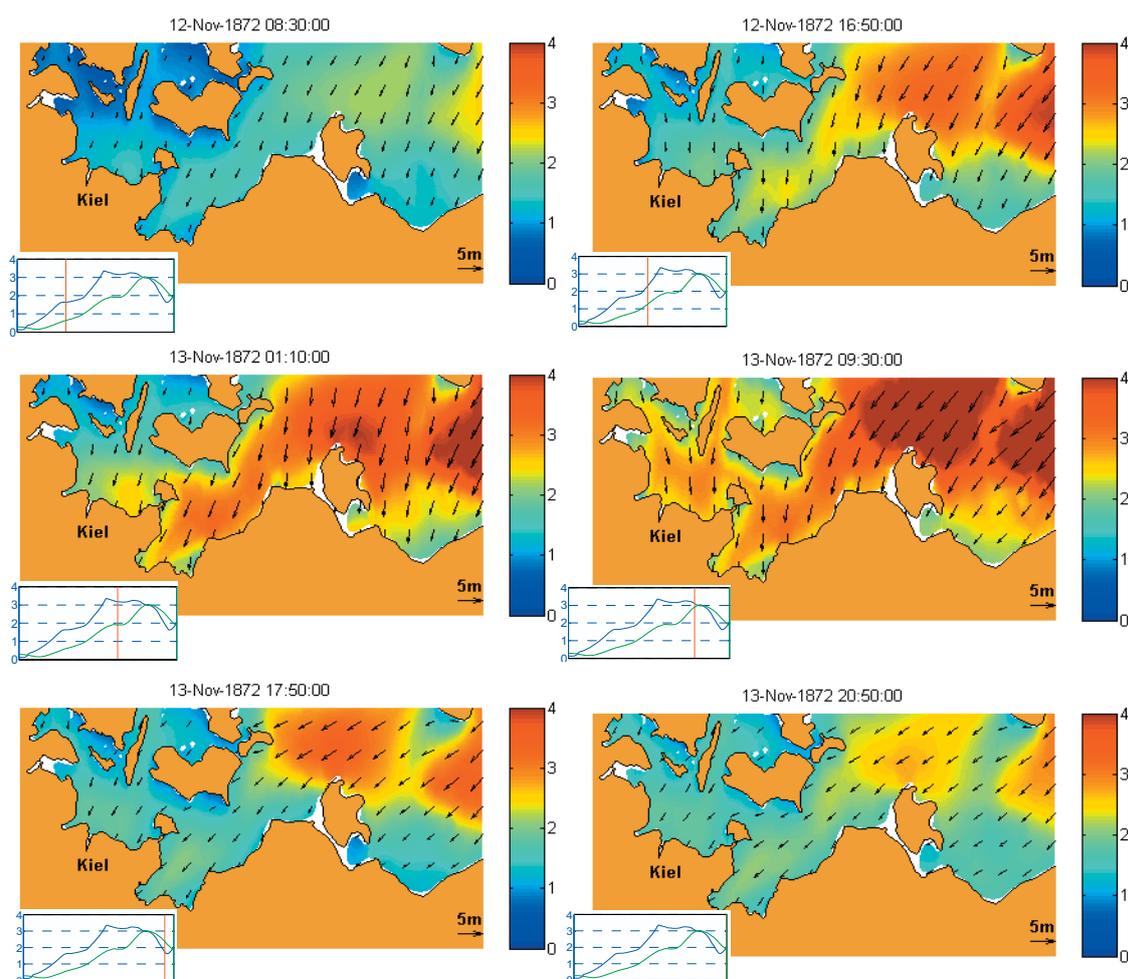


Abb. 6: Zeitliche und räumliche Entwicklung des Seegangs während des Sturmes vom November 1872, dargestellt anhand der signifikanten Wellenhöhe (Konturen [m] und Vektoren). Zeitreihen von Wasserstand [mNN] und signifikanter Wellenhöhe [m] (grüne und blaue Linie) vor Warnemünde

Abb. 6 zeigt die Ergebnisse aus der Seegangmodellierung der Rekonstruktion für den Bereich der südwestlichen Ostsee in 6 Zeitschritten, und zwar vor, während und nach dem Auftreten der maximalen signifikanten Wellenhöhen in Warnemünde am 13. November um ca. 17 Uhr. In der Kieler und Mecklenburger Bucht ist das Richtungsfeld des Seegangs während des Sturms vorwiegend in südlicher Richtung, in der Pommerschen Bucht eher nach Südwesten orientiert. Hoher Seegang mit ca. 3,5 m Wellenhöhe tritt zuerst in der Mecklenburger Bucht auf. In der Kieler Bucht erreicht der Seegang etwa 6 Stunden später ein etwas geringeres Maximum von ca. 3 m. In der südlichen Pommerschen Bucht ist die seegangsreduzierende Wirkung der geringen örtlichen Wassertiefen erkennbar. Vor Warnemünde blieb die signifikante Wellenhöhe nach dem Maximum von 3,3 m am 12. November um 17 Uhr bis zum 13. November um ca. 13 Uhr, also für ca. 20 Stunden, kontinuierlich über 3,1 m. Ungefähr 2 Stunden vor Erreichen des Scheitelwasserstandes von 3 m beginnt das zügige Abfallen des Seegangs, der um 18 Uhr bereits wieder um 1,6 m liegt. Der hohe Wasserstand von ca. 3 m hält im Vergleich zum Seegang nur relativ kurz an und fällt dann bis 19 Uhr ebenfalls schnell auf 2 m ab. Die rekonstruierte Sturmflut von 1872 bestätigt sich vor allem in der räumlichen Ausdehnung ihres hohen Seegangs entlang der deutschen Ostseeküste als eine maßgebende Sturmflut, die auch im Bereich der Kieler Bucht signifikante Wellenhöhen von etwa 2,5 m hervorrief. Die höchsten signifikanten Wellenhöhen an der 10-m-Tiefenlinie von ca. 4,5 m traten an der Nordseite Rügens auf, jedoch in Verbindung mit lokal relativ geringen Wasserständen von unter NN + 2 m.

5. Anwendung des Seegangsmodells in SEBOK - A

Bei der Entwicklung von Methoden zur Bemessung von Küstenschutzanlagen an der deutschen Ostseeküste wurden im Rahmen von SEBOK-A am FTZ numerische Modelle für Seegang und Wasserstand gekoppelt und mit den 61 Sturmszenarien aus MUSE Ostsee sowie dem rekonstruierten Windfeld des Sturmes von 1872 angetrieben (vgl. BRUSS et al., 2009). Bei den 61 untersuchten Sturmszenarien handelt es sich um physikalisch konsistente, also um mögliche Wetterlagen, die bisher jedoch so nicht aufgetreten sind oder beobachtet wurden. Die Wetterszenarien wurden im Rahmen des MUSTOK-Teilprojektes MUSE Ostsee am DWD mit dem Ensemble Prediction System des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF, 2001) berechnet (SCHMITZ, 2007, 2009).

5.1 Maximale Wellenhöhen entlang der deutschen Ostseeküste

Die Topographie der südwestlichen Ostsee ist stark strukturiert und weist damit eine hohe Komplexität in der Land-Seeverteilung auf. Im deutschen Teil der südwestlichen Ostsee lassen sich drei Buchten unterscheiden: Kieler Bucht, Mecklenburger Bucht und Pommersche Bucht. Diese werden durch den Fehmarn Belt bei Marienleuchte und durch die Darsser Schwelle zwischen Rügen (Varnkevitze) und Falster getrennt. Die vertikalen weißen Linien in Abb. 8 markieren diese Grenzen. Zur Analyse der Ergebnisse werden 18 Stationen entlang der deutschen Ostseeküste in West-Ost-Richtung betrachtet. Die Positionen der einzelnen Stationen können der Karte in Abb. 7 entnommen werden. Die Positionen wurden an repräsentativen Stellen entlang der 10-m-Tiefenlinie angeordnet, wodurch der Einfluss der lokalen Strandtopographie und eines variablen mittleren Wasserstandes auf die hier vorgestellten Ergebnisse gering bleibt.

In Abb. 8 oben ist die im Verlauf der Stürme maximal aufgetretene signifikante Wellenhöhe für die Szenarien und die Rekonstruktion des Sturmes von 1872 farbcodiert dargestellt. Jede Zeile entspricht einem Sturm, jede Spalte einer Station. In der unteren Grafik von Abb. 8 sind zur besseren Veranschaulichung der Tendenz der räumlichen Verteilung dieselben Werte in einem zweidimensionalen Diagramm dargestellt. Die höchsten Wellenhöhen treten an Orten mit relativ zur Sturmflutwirksamen Windrichtung exponierter Lage auf. Da sich die maßgebende Windrichtung bei den meisten Stürmen zwischen 0° (Nord) und 90° (Ost) bewegt, ist der Seegang jeweils an der Nordseite der Inseln Rügen und Fehmarn am höchsten. An den im Vergleich deutlich höchsten Wellenhöhen von über 5 m in der Region um Nord-Rügen ist zudem der Einfluss großer Streichlängen in Nordost-Richtung erkennbar. An Orten nahe erhöhter Landabdeckung, wie z.B. vor Timmendorf, erzeugten auch die stärksten Stürme nur einen vergleichsweise geringen Seegang. Die tendenziell geringeren Wellenhöhen der westlichen Kieler Bucht sind Folge der eher geringen Streichlängen für nordöstliche Winde. Zudem sind hier die Windgeschwindigkeiten durch die erhöhte Rauheit über Land reduziert. Der geringe Seegang der südlichen Pommerschen Bucht (Thiessow und Koserow) ist hingegen hauptsächlich auf die geringen örtlichen Wassertiefen zurückzuführen. Dieser generellen räumlichen Verteilung des Seegangs, die durch die blaue Linie der Mittelwerte im unteren Diagramm von Abb. 8 repräsentiert wird, ist die Konzentration hohen Seegangs auf einzelne Buchten, abhängig vom individuellen Sturmablauf, überlagert.

In der Verteilung der maximalen signifikanten Wellenhöhen der Rekonstruktion von 1872, die als rote Markierungen im unteren Diagramm von Abb. 8 dargestellt ist, ist das oben beschriebene Grundmuster ebenfalls erkennbar. Dabei fallen bei der Rekonstruktion von 1872 die im Vergleich zu den Szenarien vor allem in Teilen der Mecklenburger und Kieler Bucht hohen Wellenhöhen auf. Im Westen wird der Seegang der Rekonstruktion, vor allem im Norden Fehmarns, durch einige Szenarien übertroffen. Die durch die aufgezeichneten Wasserstände bekannte, vor allem westliche Ausrichtung des Referenzereignisses ist in der Seegangsrekonstruktion ebenfalls erkennbar.

Dabei ist zu bemerken, dass in der Rekonstruktion des Wasserstandes die historischen Scheitelwerte in der Mecklenburger Bucht etwas überschätzt werden (BRUSS et al., 2009, ROSENHAGEN u. BORK, 2009). Dies lässt auf möglicherweise lokal überhöhte Windgeschwindigkeiten im rekonstruierten Windfeld schließen. Damit könnte der rekonstruierte Seegang hier ebenfalls etwas zu hoch liegen. Im Osten liegen die Wellenhöhen der Rekonstruktion, mit einer ähnlichen Verteilung wie das Mittel der Szenarien zwar am oberen Rand, jedoch nicht deutlich über den Werten aus den Szenarien.

Die über die 61 untersuchten Stürme gemittelte Verteilung des jeweils maximalen Seegangs (blaue Linie Abb. 8) ist der Tendenz der über die gleichen 61 Stürme gemittelten Verteilung der Scheitelwasserstände (BRUSS et al. 2009) entgegengesetzt. Durch die komplexe Topographie in der Kieler und Lübecker Bucht und durch die geringen Wassertiefen der südlichen Pommerschen Bucht tritt hier im Vergleich zu den exponierten Küsten an der Nordseite von Fehmarn und Rügen geringerer Seegang auf. Der Wasserstand bei Sturm wird hingegen speziell in den schmalen Förden, in der Lübecker Bucht und in der flachen südlichen Pommerschen Bucht hoch aufgestaut und bleibt an der Nordseite der Inseln eher gering. Die seegangsverstärkende Wirkung der hohen Wasserstände spielt vor allem in den schmalen Förden eine untergeordnete Rolle. Dies ist aus Sicht des Küstenschutzes positiv zu bewerten. Zudem ist das zeitliche Zusammentreffen von hohem Wasserstand und Seegang innerhalb eines Sturmes zu berücksichtigen.

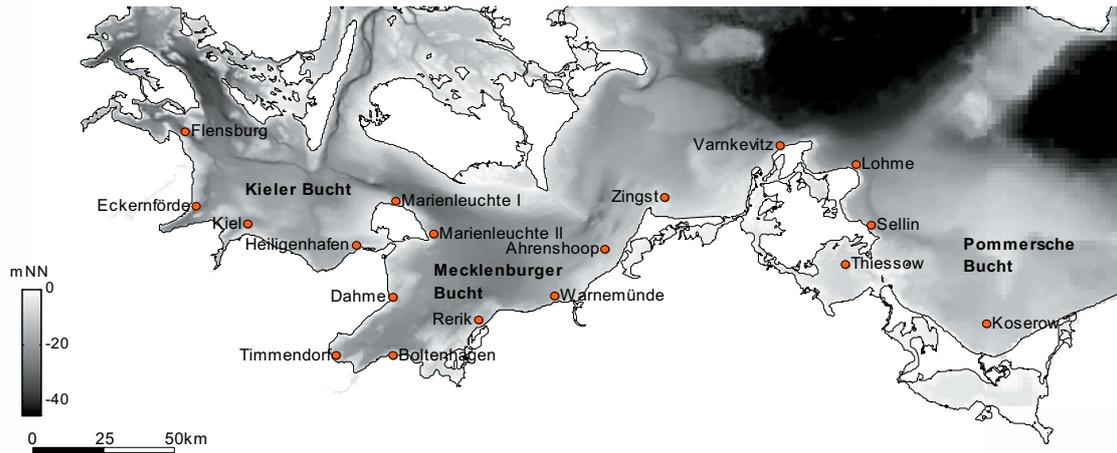


Abb. 7: Positionen entlang der deutschen Ostseeküste, für die die Ergebnisse des Seegangmodells in Abb. 8 und Abb. 9 dargestellt sind

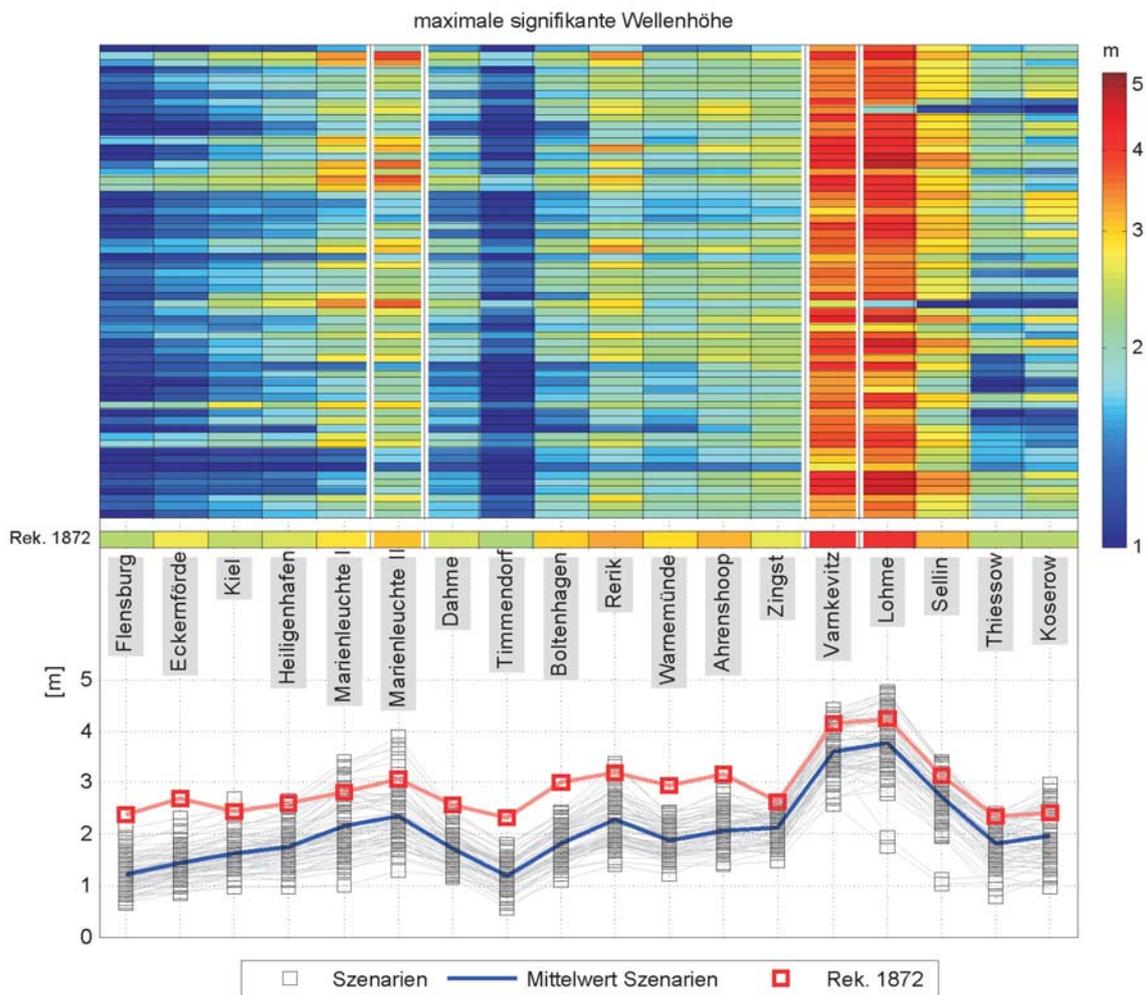


Abb. 8: Maximale signifikante Wellenhöhen an den 18 Stationen aus Abb. 7 für alle 61 Szenarien und die Rekonstruktion des Sturmes von 1872. Oben: farbcodierte Darstellung; unten: zweidimensionale Darstellung zur Verdeutlichung der Tendenz in der räumlichen Verteilung

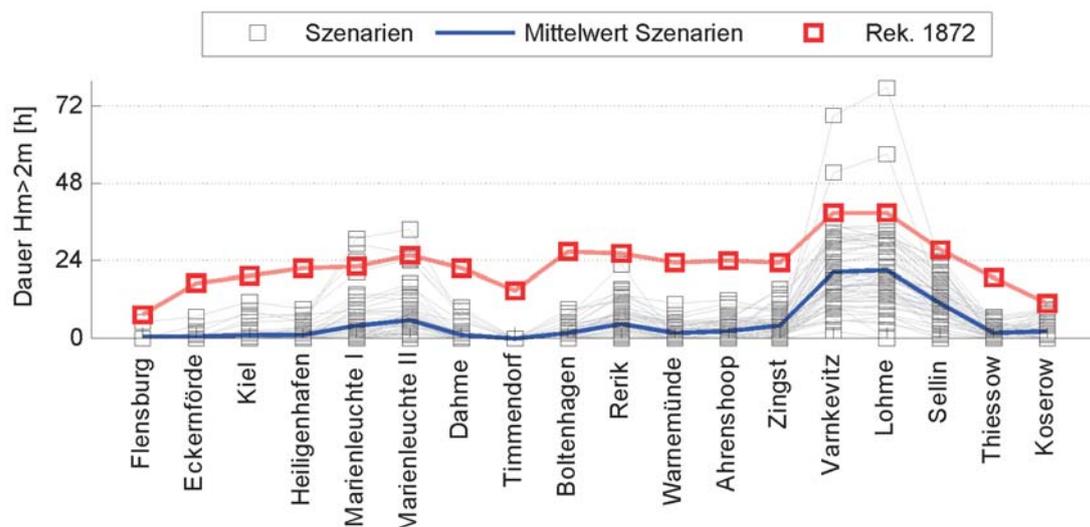


Abb. 9: Verweildauer signifikanter Wellenhöhen über 2 m an den 18 Stationen aus Abb. 7 für alle 61 Szenarien und die Rekonstruktion des Sturmes von 1872

Die in Abb. 8 dargestellten Werte repräsentieren den im Verlauf der Stürme maximal aufgetretenen Seegang. Der Seegang, der zeitgleich mit dem Scheitelwassertand auftritt, fällt meist geringer aus (BRUSS et al., 2009). In Abb. 9 ist für die untersuchten Stürme und die Rekonstruktion von 1872 jeweils die Dauer hohen Seegangs ($H_s > 2$ m) an den 18 Stationen dargestellt.

Die Mittelwerte der Szenarien sind erneut in einer blauen Linie verbunden, die Werte der Rekonstruktion sind rot markiert. In dieser Darstellung wird der singuläre Charakter des Sturmes von 1872 im Vergleich zu den untersuchten Szenarien erneut deutlich. In der Rekonstruktion trat zwischen Kiel und Thiessow, also nahezu entlang der gesamten deutschen Ostseeküste, im Durchschnitt 24 Stunden lang ein Seegang von über 2 m Wellenhöhe auf. Lediglich im Süden der Mecklenburger Bucht, in Timmendorf sowie im äußersten Westen und Osten war die Dauer des hohen Seegangs kürzer. Die lange Dauer hohen Seegangs bei der Rekonstruktion wird nur nördlich Rügens und Fehmarns durch zwei der Szenarien übertroffen. Angesichts der in der Rekonstruktion von 1872 im Vergleich zu den Szenarien vor allem im Westen außergewöhnlich hohen Wasserstände wird die hohe zerstörerische Kraft dieses Sturmes deutlich.

5.2 Räumliche Verteilung des Seegangs

Abb. 10 zeigt Windfelder und Seegangsbedingungen der 9 Szenarien mit den stärksten Auswirkungen im Bereich der Probstei sowie der Rekonstruktion des Sturmes von 1872 jeweils zum Zeitpunkt des maximalen Seegangs. Während des Sturmes von 1872 waren zur Sturmmitzpe nördliche Winde dominant, während bei den 9 übrigen Extremszenarien eher westliche bis nordwestliche Winde vorherrschten. Die höchsten signifikanten Wellenhöhen der Szenarien in Kieler und Mecklenburger Bucht von über 3 m treten bei den beiden obersten Stürmen mit ausgeprägt westlichen Windrichtungen auf.

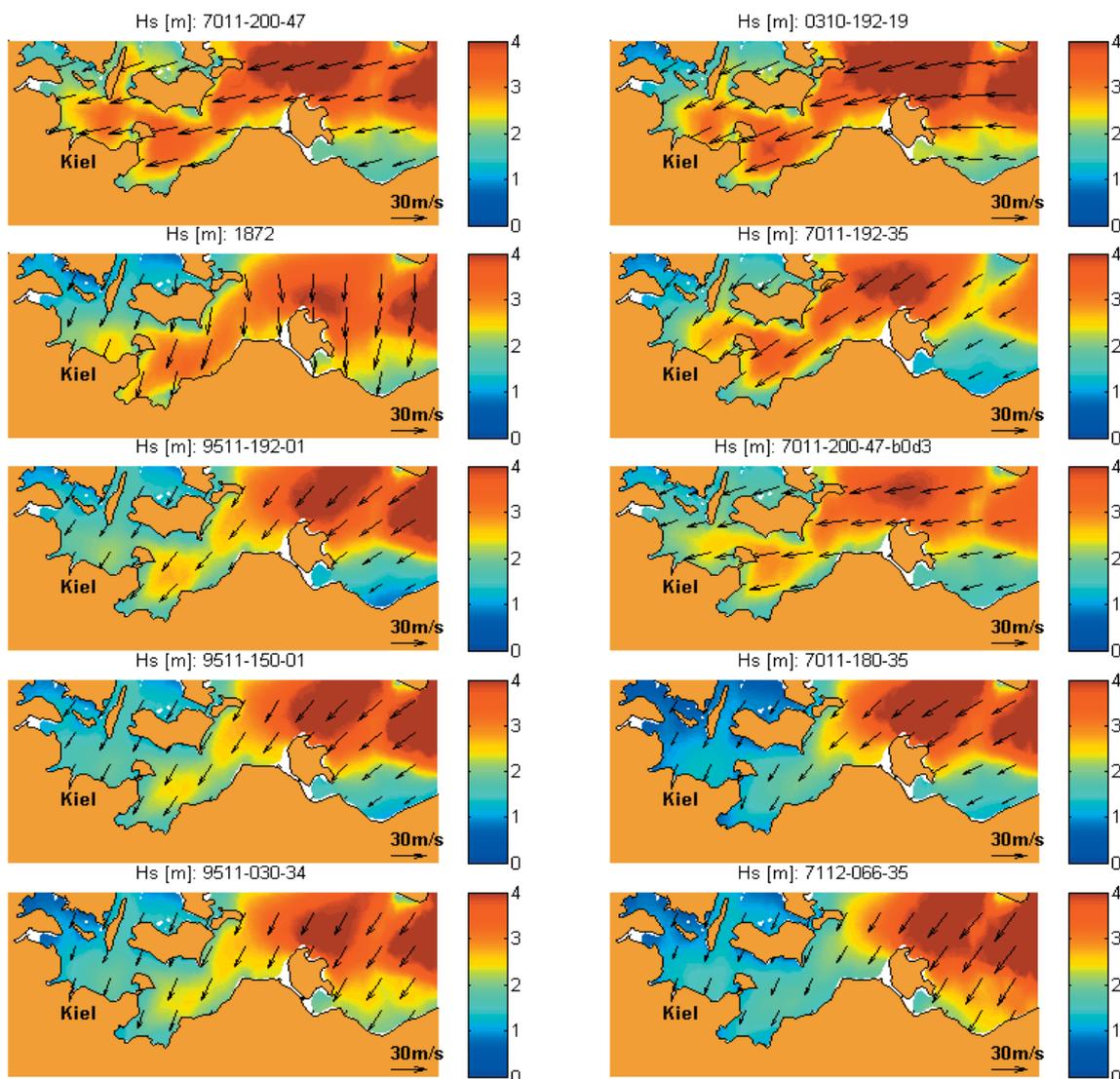


Abb. 10: Signifikante Wellenhöhen (Konturen) und Windgeschwindigkeit (Vektoren) zu den 10 extremsten Sturmszenarien

6. Vergleich der Modellergebnisse der Rekonstruktion von 1872 mit beobachteten Zerstörungen

In diese Untersuchung wurde eine vergleichende Analyse zwischen durch den Sturm vom November 1872 verursachten Zerstörungen und dem rekonstruierten Seegang eingeschlossen. Die von KIEKSEE (1972) gesammelten und beschriebenen Informationen über die Sturmschäden werfen ein Licht auf die wahre Größenordnung der Sturmsauswirkungen im Beobachtungsbereich. Um die Modellierungsergebnisse mit diesen Informationen zu vergleichen, wurde eine einfache Bewertungsskala in Abhängigkeit von der Schwere und Größenordnung der Sturmschäden eingesetzt. Zunächst werden 3 Schweregrade durch eine Farbskala wie folgt vorgegeben: gelb bezeichnet Bereiche, in denen nur morphologische Strand-, Strandwall- und Dünenveränderungen erfolgten; orange zeigt die Bereiche mit Schäden an Küstenschutzanlagen und Häfen an; rot zeigt die Bereiche an, in denen die Bevölkerung an der Küste direkt betroffen wurde. Zusätzlich zur farblichen Differenzierung

des Schweregrades der Schäden wird durch die Radien der Kreise in Abb. 11 und Abb. 12 proportional die Anzahl des Auftretens einer Beschädigung/Zerstörung der folgenden Sachwerte/Strukturen ausgedrückt: Schiff, Hafenanlage, Deich, Brücke, Schiene, Straße, Promenade, Haus, Strand, Düne, Kliff.

Abb. 11 und Abb. 12 zeigen die Orte, an denen Informationen über Zerstörungen gesammelt wurden (farbige Kreise) und geben die örtlichen Maximalwerte der Modellergebnisse zur Sturmflut von 1872 in Bezug auf Wasserstand und signifikanter Wellenhöhe wieder, wobei zu beachten ist, dass die beiden Größen nicht überall zeitgleich aufgetreten sind.

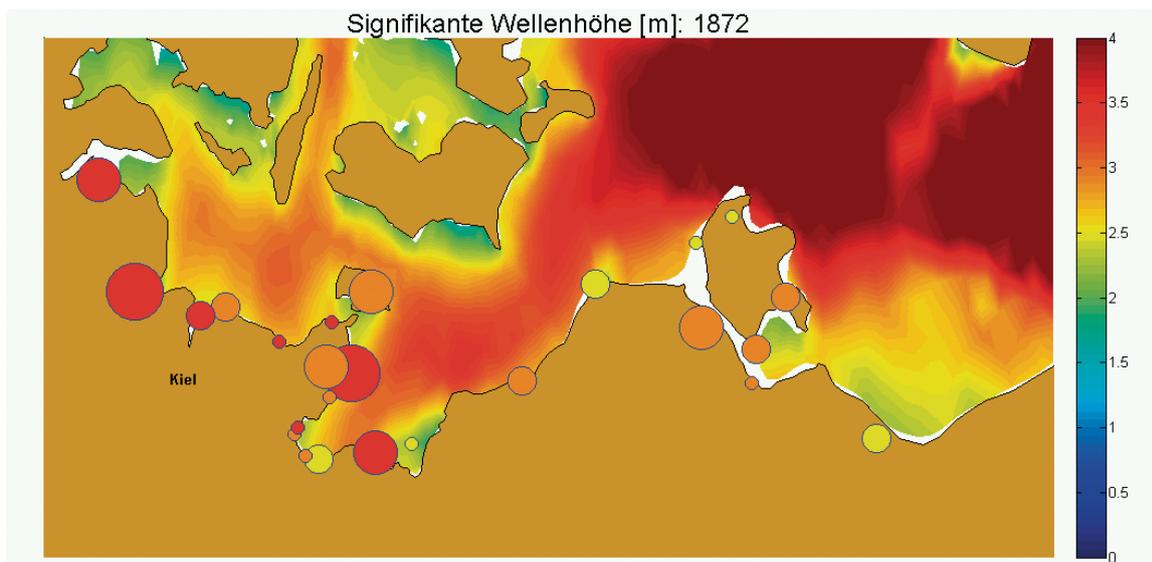


Abb. 11: Beobachtete Schäden an der deutschen Ostseeküste und rekonstruierter maximaler Seegang

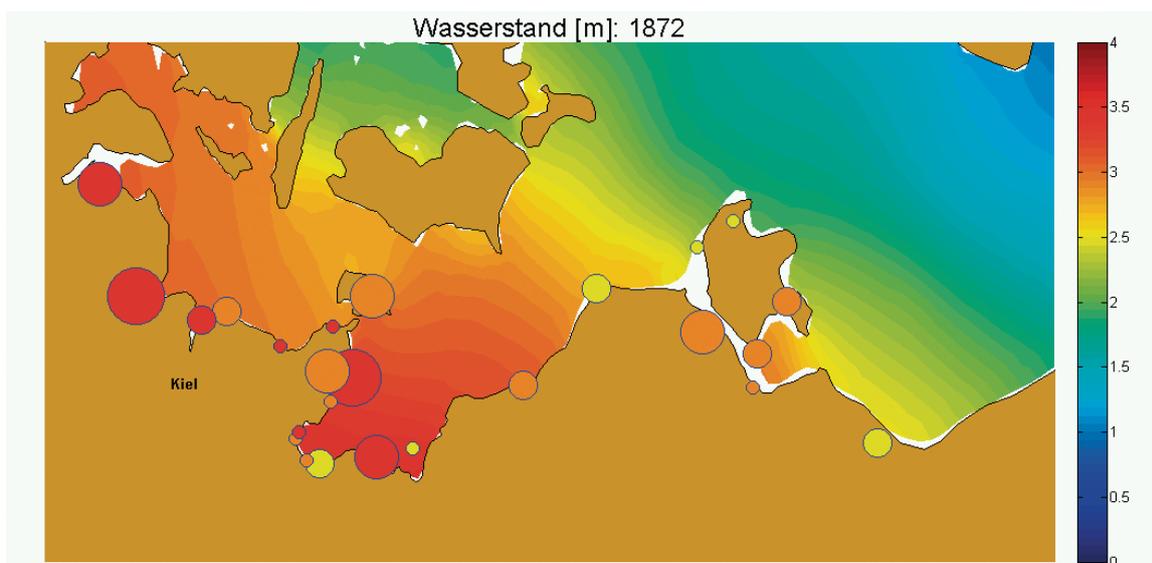


Abb. 12: Beobachtete Schäden an der deutschen Ostseeküste und rekonstruierter maximaler Wasserstand

Die angegebenen Schadensgrößen für Flensburg und Eckernförde beziehen sich beispielsweise auf gebrochene Deiche, Strandwälle und überflutete Stadtbereiche, was sich mit den Modellergebnissen zu Wasserstand (ca. 3 m) und Seegang (ca. 2,5 m Wellenhöhe) deckt. In der Kieler Bucht lagen die höchsten Wasserstände bei etwa 3 m, die maximale signifikante Wellenhöhe bei 3 m und mehr. Im Westen der Mecklenburger Bucht waren die Schäden vergleichbar mit denen an der Kieler Bucht. Die maximalen Wellenhöhen liefen ebenfalls bis über 3 m auf, während die Wasserstände als höchste Werte in der Rekonstruktion etwa 3,5 m erreichten, wobei die historischen Wasserstände in diesem Bereich durch die Rekonstruktion etwas überschätzt werden (BRUSS et al., 2009). Die berichteten Schäden in den inneren Bereichen der Mecklenburger Bucht (Innere Lübecker Bucht) setzen sich aus Schäden an Küstenschutzanlagen und morphologischen Veränderungen zusammen.

In der östlichen Mecklenburger Bucht sind die Schäden, im Gegensatz zur Kieler, Lübecker und der westlichen Mecklenburger Bucht geringer. In der Pommerschen Bucht decken sich die Ergebnisse aus den Modellierungen in ähnlicher Weise wie in den anderen Bereichen (Schadensbeschreibung Usedom) mit den registrierten Schäden. Hier waren die geringsten Werte für Wasserstand und Seegang festzustellen. Im nördlichen und östlichen Bereich der Insel Rügen trat im tiefen Wasser an der steil abfallenden Küste nach den Modellergebnissen zwar der höchste Seegang auf, jedoch bei eher geringem Wasserstand, so dass die zerstörerische Kraft des Seegangs nicht hoch an die Küste getragen wurde.

Trotz Einschränkungen in der Beurteilung, die hinsichtlich uneinheitlicher Bemessungsgrundlagen und der jeweiligen Unterhaltungszustände der zerstörten/beschädigten Küstenschutzbauwerke zu machen sind, verdeutlichen Abb. 11 und Abb. 12 insgesamt recht eindrucksvoll die Schadensursachen aus Seegang und Wasserstand. In den entsprechenden Schadenspositionen vor der Küste läuft ein Seegang um 3 m Wellenhöhe auf, der in Verbindung mit den Scheitelwasserständen von ebenfalls etwa 3 m NN eine unmittelbare Einwirkung auf Strandwall-, Dünen- und Deichstrukturen bewirkte und zu den berichteten Schäden führte.

7. Schlussfolgerungen

Die hydrodynamische Rekonstruktion der Sturmflut von 1872 auf Basis der Wettermodellierung des DWD nach historischen Wetterdaten konnte mit Erfolg vollzogen werden. Die vom FTZ auf Basis dieser Wettermodellierung durchgeführte Sturmflutmodellierung liefert flächendeckend eine realistische Größenordnung der Ganglinien des Sturmflutwasserstandes und des Sturmflutseegangs vom November 1872.

Mit der vorgenommenen Bestimmung des Seeganges an der 10-m-Tiefenlinie sind die Voraussetzungen weiterführender, vergleichender Modellierungen für den Bemessungsfall 1872 gegeben.

Aus der Seegangsimulation der 61 untersuchten Sturmszenarien konnte die Größenordnung und die räumliche Verteilung der Seegangsbedingungen bei extremen Ereignissen bestimmt werden. Damit können bislang gebräuchliche, stochastisch extrapolierte Seegangsgrößen überprüft und das Datenkollektiv ergänzt werden.

Die in der Rekonstruktion ermittelten Belastungsgrößen sind im Hinblick auf die historisch beschriebenen Schadensgrößen plausibel. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass bei aller Ortstreue der Darstellungen aus KIEKSEE (1972) nur sehr selten genaue Größenangaben über Schäden vorgenommen wurden. Aus den zugehörigen historischen Bildern lässt sich allerdings ein ungefähres Schadensbild ableiten.

Die Sturmflut von 1872 kann besonders im Hinblick auf die zeitliche Entwicklung von Wasserstand und Seegang vor allem im westlichen Teil der deutschen Ostsee im Vergleich zu den Szenarien als singuläres Ereignis eingeordnet werden. In Bezug auf die Dauer der Energieeinwirkung kann im Vergleich mit den anderen extremen Szenarien die Schadenswirkung des Sturmes von 1872 vor allem im Osten durchaus übertroffen werden. Als vergleichendes Ereignis sollte der Sturm von 1872 jedoch nach wie vor in Bemessungen für Küstenschutzanlagen einbezogen werden, wenn an der deutschen Ostseeküste die höchste Schutzwirkung erreicht werden soll.

8. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- BRUSS, G. and MAYERLE, R.: Investigations on the influence of the wind drag coefficient in storm surge models. In Proceedings of the 3. International Conference in Ocean Engineering, Madras, 325–332, 2009.
- BRUSS, G.; JIMENEZ, N. und MAYERLE, R.: Bestimmung von Bemessungsparametern für Küstenschutzanlagen an der Deutschen Ostseeküste aufbauend auf Szenariosimulationen. Die Küste, Heft 75, 2009.
- ECMWF: The new 80-km High-Resolution ECMWF EPS. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Newsletter No. 90, 2001.
- JANSSEN, P. A. E. M.: Wave induced stress and the drag of airflow over sea waves. J. Phys. Oceanogr., 19, 745–754, 1989.
- JANSSEN, P. A. E. M.: Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting. J. Phys. Oceanogr., 21, 1631–1642, 1991.
- KIECKSEE, H. und THRAN, P.: Die Ostsee-Sturmflut 1872. Schriften des Deutschen Schiffahrtsmuseums Bremerhaven, 1972.
- KOMEN, G. J.; CAVALERI, L.; DONELAND, M.; HASSELMANN, K.; HASSELMANN S. and JANSSEN, P. A. E. M.: Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, UK, 560 pp, 1994.
- MLR-SCHLESWIG-HOLSTEIN: Generalplan Küstenschutz, Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein. Kiel, Germany. Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein, 2001.
- ROSENHAGEN, G. und BORK, I.: Rekonstruktion der Sturmflutwetterlage vom 13. November 1872. In Proceedings of the MUSTOK-Workshop 2008 Sturmflutgefährdung der Ostseeküste, 2008.
- ROSENHAGEN, G. and BORK, I.: Rekonstruktion des Sturmflutwetterlage vom 13. November 1872. Die Küste, Heft 75, 2009.
- SCHMITZ, R.: Vorhersage von historisch aufgetretenen Stürmen über der Ostsee mithilfe des Ensemble Prediction System und COSMO. Abschlussbericht des Projekts MUSTOK, 2007.
- StAUN: Online Broschüre Internes Messnetz Küste Mecklenburg-Vorpommern. URL: <http://www.um.mv-regierung.de/kuestenschutz/bmessnetz/index.htm>, Rostock.
- VAN RIJN, L.; WALSTRA, D.; GRASMEIJER, B.; SUTHERLAND, J.; PAN, S. and SIERRA, J.: Simulation of Nearshore Hydrodynamics and Morphodynamics on the Time Scale of Storms and Seasons Using Process-Based Profile Models. In Van Rijn, L. C, B. G. Ruessink and J. P. M. Mulder (ed.), The Behaviour of a Straight Sandy Coast on the Time Scale of Storms and Seasons: Process Knowledge and Guidelines for Coastal Management: End Document March 2002. EC MAST Project, MAS3 – CT97-0086 COAST3D – EGMOND, 2002.
- WATERFORCAST: Tailor-made forecast for people at sea. URL: www.waterforecast.com.
- YOUNG, I. R.: Wind generated ocean waves, in Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Eds. R. Bhattacharyya and M. E. McCormick, Elsevier, 1999.