

# Schlussfolgerungen und Empfehlungen aus dem Verbundprojekt MUSTOK und zukünftiger Forschungsbedarf

Von JÜRGEN JENSEN, PETER FRÖHLE, ROBERTO MAYERLE,  
SYLVIN MÜLLER-NAVARRA und HANS VON STORCH

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

Im Rahmen des Forschungsverbundprojektes MUSTOK wurden umfangreiche Studien zu Küstenbelastungen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten durchgeführt. Dazu zählen Sturmflutwasserstände ebenso wie Seegang, Wellenauflauf oder resultierende morphologische Auswirkungen. Das Projekt MUSTOK hat zu einem besseren Verständnis zur Genese von extremen Sturmflutwasserständen an der deutschen Ostseeküste geführt und es konnten regionale Besonderheiten bei der Modellierung der Küstenbelastungen berücksichtigt werden. Die erzielten Ergebnisse werden in dem vorliegenden Beitrag zusammenfassend bewertet und es werden Empfehlungen für den zukünftigen Forschungsbedarf gegeben.

## S c h l a g w ö r t e r

Ostsee, Sturmfluten, Bemessung, Küstenschutz, Forschungsbedarf

## S u m m a r y

*Within the framework of the research project MUSTOK intensive studies on coastal loads and probabilities have been carried out. These loads are extreme water levels as well as swell, wave run-up and morphological impacts. The project yields a better understanding of the genesis of extreme storm surges in southern Baltic Sea. Moreover, regional characteristics of the coastline have been taken into consideration in the hydrodynamic models. In this paper, the results are discussed and some recommendations are given for further research.*

## K e y w o r d s

Baltic Sea, storm surges, design, coastal protection, research needs

## I n h a l t

1. Einleitung . . . . .	256
2. Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Forschungsbedarf . . . . .	257
2.1 Allgemeines . . . . .	257
2.2 Meteorologie und Modellierung von Starkwindfeldern . . . . .	257
2.3 Modellierung von Sturmflutwasserständen . . . . .	257
2.4 Verfahren zur Sicherheitsüberprüfung und Bemessung von Küstenschutzanlagen an der deutschen Ostseeküste (SEBOK A) . . . . .	260
2.5 Verfahren zur Sicherheitsüberprüfung und Bemessung von Küstenschutzanlagen an der deutschen Ostseeküste (SEBOK B) . . . . .	262
2.6 Statistische Analysen von Wasserständen und Seegang . . . . .	263
3. Schriftenverzeichnis . . . . .	264

## 1. Einleitung

Extreme Sturmflutereignisse gefährden sowohl die deutsche Nordsee- als auch die Ostseeküste. Dabei sind die Küstengebiete aufgrund der intensiven Nutzung in der Regel sehr vulnerabel gegenüber solchen Ereignissen. Die Länge der Außenküste Mecklenburg-Vorpommerns beträgt insgesamt 354 km, wovon 226 km Flachküste und 128 km Steilküste sind. 70 % der mecklenburg-vorpommernschen Küstenlinie befinden sich in einem stetigen Ab-rasionsprozess (MBLU-MV, 2009). Die Länge der Ostseeküste in Schleswig-Holstein be-trägt etwa 637 km, wovon 491 km Flachküsten sind (MLR, 2001). Der Küstenschutz ori-entiert sich maßgeblich an extremen Ereignissen, wobei zum einen ein möglichst hohes Schutz-niveau erreicht werden soll, zum anderen jedoch auch ökologische, ökonomische und touristische Ansprüche berücksichtigt werden müssen (JENSEN et al., 2007). Ein Schutz der Küsten gegen jede erdenklich hohe Sturmflut ist nicht möglich, womit bei allen Maßnahmen zugleich ein Restrisiko verbleibt, welches quantifiziert werden muss. Dies kann unter ande-rem durch die detaillierte Analyse der Sturmflutereignisse und Zuordnung von Eintritts-wahrscheinlichkeiten erfolgen (MUDERSBACH u. JENSEN, 2008). Für die Bemessung von Küstenschutzbauwerken sind jedoch nicht in jedem Fall nur die extremsten Wasserstände von Bedeutung. Für vielfältige Bemessungsaufgaben ist die Kombination von Wasserstand und Seegang von besonderer Bedeutung.

Für den Küstenschutz maßgebende extreme Sturmflutereignisse sind an der deutschen Ostseeküste nur schwer zu definieren, weil neben der jeweils bedeutsamen regionalen Aus-prägung derartiger Ereignisse auch die Ereignisse selbst wegen ihrer sehr geringen Eintritts-wahrscheinlichkeit schwer fassbar sind. Für die Bemessung von Küstenschutzanlagen be-steht das Problem in der Festlegung eines für die gesamte Ostseeküste gültigen Verfahrens zur Bestimmung von Bemessungsgrößen, bei dem die regionalen Gegebenheiten mit berück-sichtigt werden. Für die Bestimmung regionaler Bemessungsgrößen müssen als Grundlage überregionale Bemessungsparameter bestimmt werden, die gleichzeitig Aussagen über Ein-trittswahrscheinlichkeiten zulassen. Zur Bearbeitung dieser Fragestellungen wurde das KFKI-Verbundprojekt

### **Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)**

genehmigt.

Das KFKI-Verbundvorhaben MUSTOK wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Fördernummern 03KIS052 (MUSE Ostsee), 03KIS053 (SEBOK A) und 03KIS054 (SEBOK B) von 07/2005 bis 12/2008 gefördert. Die fachliche Begleitung erfolgte durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI-Fördernummern 84–86).

Das KFKI-Verbundprojekt gliederte sich in die drei folgenden Teilvorhaben:

- [1] **Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmhochwasserständen mit sehr gerin-gen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Ostseeküste (MUSE Ost-see)**
- [2] **Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der Ostsee – Projektgebiet: Küste Schleswig-Holstein (SEBOK A)**
- [3] **Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der Ostsee – Projektgebiet: Küste Mecklenburg-Vorpommern (SEBOK B)**

## 2. Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Forschungsbedarf

### 2.1 Allgemeines

Für die im Verbundprojekt MUSTOK gestellte Forschungsaufgabe musste ein transdisziplinärer Ansatz gewählt werden. Den Ausgangspunkt der Analysen bildeten meteorologische Simulationen zur Erzeugung sturmflutrelevanter Wetterlagen. Daran anschließend wurden Wasserstands- und Seegangsimulationen durchgeführt. Die Ergebnisse der Modellsimulationen wurden zusammen mit beobachteten Wasserstands- oder Seegangsdaten statistisch analysiert, um Sicherheitsüberprüfungen bestehender Küstenschutzanlagen und Aussagen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten vornehmen zu können. Für die Forschungsfelder

- Meteorologie und Modellierung von Starkwindfeldern
- Modellierung von Sturmflutwasserständen und Seegang
- Sicherheitsüberprüfungen bestehender Küstenschutzanlagen
- Statistische Analysen von Wasserständen und Seegang

werden im Folgenden Synthesen der erzielten Ergebnisse dargestellt und Empfehlungen, sowie der zukünftige Forschungsbedarf abgeleitet.

### 2.2 Meteorologie und Modellierung von Starkwindfeldern

Eine der Fragen des Projektes war, inwieweit geringfügige, physikalisch denkbare Modifikationen der Eigenschaften des auslösenden Sturmes, insbesondere im Hinblick auf die Zuggeschwindigkeit der Tiefdruckgebiete, zu Veränderungen in den Sturmfluthöhen führen können. Dazu wurden mit einem globalen Vorhersagemodell erzeugte Sturmlagen mithilfe des regionalen Atmosphärenmodells COSMO-CLM herunterskaliert und durch eine spezielle Steuerung etwas verlangsamt, in der Annahme, dass die damit einhergehende erhöhte Wirkzeit auch zu höheren Wasserständen in der südwestliche Ostsee führen würde. Diese Modifikation wurde durch die „Anbindung“ („spectral nudging“) der simulierten dreidimensionalen, großskaligen Struktur an die zeitlich manipulierte vorgegebene globale Entwicklung der Modelldaten erreicht. Eine Verlangsamung der Verlagerung des Tiefdrucksystems um 6 Stunden binnen 18 Stunden bewirkte tatsächlich eine erhöhte Wirkzeit und damit höhere Sturmfluthöhen in der südwestlichen Ostsee als in der Simulation ohne Verlangsamung. Die Wirkung war aber mit 5–10 cm in der südwestlichen Ostsee im Wesentlichen vernachlässigbar (BENKEL et al., 2009). Damit ist die ursprüngliche Hypothese zwar grundsätzlich positiv beantwortet worden, aber der Effekt muss für den Fall der Ostsee als weniger gravierend, oder nur von 2. Ordnung, bezeichnet werden.

### 2.3 Modellierung von Sturmflutwasserständen

Ziele der Arbeiten am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (BORK u. MÜLLER-NAVARRA, 2009) im Rahmen von MUSE Ostsee waren Modellberechnungen extrem hoher Wasserstände als Beitrag zur Datenbasis der statistischen Analyse des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt (fwu) (MUDERSBACH u. JENSEN, 2009) und die Analyse großräumiger und lokaler Einflüsse auf diese Wasserstände. Im DWD-Teilprojekt (SCHMITZ, 2009) wurden

aus 31.800 Realisationen lediglich 21 gewonnen, die extreme Sturmhochwasser für große Teile der deutschen Ostseeküste oder regional für die Kieler Bucht, die Mecklenburger Bucht und die Pommersche Bucht generierten. Trotz der enormen Fallzahl meteorologischer Wetterentwicklungen übertrafen die extremen Wasserstände bei diesen Simulationen nur in der Pommerschen Bucht die im November 1872 aufgetretenen. Daher wurde das Projekt MUSTOK um eine Rekonstruktion und Analyse des Sturmhochwassers von 1872 erweitert (ROSENHAGEN u. BORK, 2009).

Mathematisch betrachtet ist die Modellierung von Sturmhochwassern der Ostsee die numerische Behandlung eines Anfangs-Randwertproblems der Hydrodynamik. Damit ist auch klar, dass die Wahl der Anfangs- und Randwerte besonders in Extremfällen – und um solche geht es hier – sorgfältig zu bedenken ist.

Die meteorologischen Randwerte an der Meeresoberfläche werden aus den Atmosphärenmodellen eingespeist. Der laterale, offene Rand ist im BSH-Modellsystem weit weg vom Untersuchungsgebiet an den Nordrand der Nordsee bzw. an den Westrand des Englischen Kanals gelegt. Damit ist gewährleistet, dass Austauschprozesse durch Belte und Sund auch bei z. B. meteorologisch bedingten, extremen Wasserstandsunterschieden zwischen Kattegat und westlicher Ostsee realistisch abgebildet werden. Den Wasseraustausch beeinflussen auch die Gezeiten, die über den Großen Belt in der Kieler Bucht bei Sturmhochwassern Wirkung zeigen, während weiter östlich deren Einfluss stark abnimmt. Ein wesentlich vereinfachtes zweidimensionales Modell des Nordostatlantiks ist dem dreidimensionalen Modell der Nord- und Ostsee vorgeschaltet, so dass auch Fernwellen aus dem Nordostatlantik berücksichtigt werden können

Bei der Wahl der Anfangswerte wurde bei den Simulationen eine Vorlaufzeit von mindestens 12 Tagen realisiert, um realistische Anfangsbedingungen für die zum Teil sehr kurzen EPS-Läufe (Ensemble Prediction System) zu schaffen, insbesondere auch um die „Vorfüllung“ abzubilden, deren Bedeutung in der vorliegenden Literatur viel diskutiert wird, ebenso wie eine postulierte Schrägstellung der Wasseroberfläche als Ausgangslage für Ausgleichsprozesse.

Die hier benutzten, numerischen Modelle sind Basis der operationellen Wasserstandsvorhersage des BSH für Nord- und Ostsee und berücksichtigen alle in der Literatur diskutierten potentiellen Ursachen für extreme Sturmfluten bzw. Sturmhochwasser: lokaler und überregionaler Wind, statischer Luftdruck, Füllungsgrad der Ostsee, andere Wechselwirkungen mit der Nordsee, Ausgleichsprozesse und Gezeiten.

Insgesamt konnte mit dem hier beschriebenen Modellkonzept des BSH unter Verwendung der modellierten Starkwindfelder das Kollektiv extremer Sturmhochwasser für die deutsche Ostseeküste zwar erweitert werden, höhere als bisher schon erreichte Wasserstände wurden jedoch nur für die Pommersche Bucht gefunden. Dabei wurde mit einer Simulation in Greifswald der bisher höchste, gemessene Wasserstand um 0,55 m überschritten. In Travemünde blieb der maximale Wasserstand aller betrachteten Realisationen um 0,61 m unter dem von 1872 (Tab. 1). Damit stellte sich besonders für die Mecklenburger und Kieler Bucht die Frage, was das Sturmhochwasser von 1872 gegenüber den extremen Realisationen ausgezeichnet haben könnte.

Bei der Betrachtung nicht-lokaler Einflüsse auf Sturmhochwasser ist zu unterscheiden zwischen einem tatsächlichen Massentransport in die Westliche Ostsee hinein, dem Auflaufen winderzeugter, langer Oberflächenwellen z. B. aus der südlichen Ostsee und etwaigen Eigenschwingungen des vielzitierten Systems Westliche Ostsee/zentrale Ostsee/Finnischer Meerbusen. Zu diesen Themenbereichen wurden eine Reihe von numerischen Experimenten durchgeführt. Einmal wurde z. B. die Ostsee mit einer festgehaltenen Einstrom-Wetterlage

„vorgefüllt“. Darauf unmittelbar aufsetzende Sturmhochwasser-Simulationen zeigten dann die relativ kleine Bedeutung dieser manipulierten Anfangsbedingungen für die Scheitelwasserstände. In einem anderen Experiment mit einem hohen Wasserstand in St. Petersburg wurde nach dem Eintreten des dortigen Scheitelwasserstandes der meteorologische Antrieb abgeschaltet. Während der Ausgleichsprozesse traten zwar Schwingungen auf, waren aber ohne Einfluss auf den Scheitelwasserstand in der westlichen Ostsee. In der südlichen und zentralen Ostsee durch Wind und Luftdruck erzeugte, lange Oberflächenwellen, deren Wirkungen sich erst nach etwa 4–8 h an den Küsten der westlichen Ostsee zeigen, sind hingegen von großer Bedeutung für die Wasserstände.

Durch die Untersuchungen im MUSE-Ostsee-Projekt existiert nun eine klarere Vorstellung darüber, welchen atmosphärischen Antrieb Sturmhochwasser in der Westlichen Ostsee benötigen, damit dort extrem hohe Scheitelwerte auftreten können. Die Westliche Ostsee ist ein Gebiet mit komplexer, kleinräumiger Land-Wasser-Verteilung, und es gibt räumlich sehr unterschiedliche Wetterlagen und Windrichtungen mit Potential für Sturmhochwasser. Aus diesem Grunde sind empirische Verfahren zur Wasserstandsvorhersage nur sehr eingeschränkt nutzbar, weshalb in der Praxis eine Kombination aus Empirie und numerischen Vorhersagemodellen verwendet wird.

Als Erkenntnisse aus dem Projekt können angeführt werden, dass

- Sturmhochwasserstände sehr von der Ausdehnung und zeitlichen Entwicklung der Starkwindfelder abhängen,
- die Bandbreite optimaler Starkwindfelder für die Mecklenburger Bucht und besonders für die Kieler Bucht gering ist,
- die Bandbreite optimaler Starkwindfelder für Sturmhochwasser in der Pommerschen Bucht relativ groß ist,
- extrem hohe Scheitelwasserstände wenig von der jeweiligen Vorgeschichte abhängen,
- in der Rekonstruktion des Sturmhochwassers im November 1872 die Ostsee nicht extrem angefüllt war und
- dass die Scheitelwasserstände beim Sturmhochwasser am 13. 11. 1872 nicht von dem Sturm am Vortage abhingen.

Bestätigt wurden vereinzelt in der Literatur geäußerte Vermutungen über die Genese von Ostsee-Sturmhochwassern, z. B.

- dass in der Kieler Bucht die Gezeitenphase zu Beginn einer Simulation die Höchstwasserstände bei Sturmhochwassern beeinflusst und ein Abfließen des Wassers durch den Großen Belt durch Windstau im südlichen Kattegat zusätzlich behindert sein kann.

Kontrovers diskutiert und nun durch MUSE-Ostsee bestätigt wurde,

- dass Ablauf und Entwicklung extremer Sturmhochwasser der westlichen Ostsee nicht mit den einfachen physikalischen Konzepten „Vorfüllung“ und „Eigenschwingungen“ der Ostsee kompatibel oder gar erklärbar sind.

Anders als bei MUSE-Nordsee waren im Projekt MUSE Ostsee bisher eingetretene Sturmhochwasser-Wetterlagen kaum hilfreich für das Auffinden extremer noch nicht eingetretener Sturmhochwasser. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die festgestellte, besondere Sensibilität der Scheitelwasserstände bei Sturmhochwassern in der Kieler und Mecklenburger Bucht gegenüber kleinen Abweichungen von den „optimalen“ Sturmhochwasser-Wetterlagen. Deshalb sind hier die Simulationsergebnisse aus dem BSH-Teilprojekt, erzielt mit dem atmosphärischen Antrieb aus dem „Ensemble Prediction System“ (EPS) tabellarisch den bisher höchsten gemessenen Wasserständen gegenübergestellt (Tab. 1).

Tab. 1: MUSE Ostsee und MUSE Nordsee (JENSEN et al., 2006); Vergleich der Höhe simulierter Höchstwasserstände (hHW\_EPS) mit gemessenen (HW1872 bzw. hHW)

Westliche Ostsee				Deutsche Bucht			
	HW1872	hHW_EPS	hHW_EPS minus HW1872		hHW	hHW_EPS	hHW_EPS minus hHW
Flensburg	3,08	2,84	- 0,24	Borkum	3,82	4,99	1,17
Eckernförde	3,15	2,63	- 0,52	Emden	4,76	6,09	1,33
Kiel-Holtenau	2,97	2,62	- 0,35	Wilhelmshaven	5,22	6,40	1,18
Travemünde	3,16	2,55	- 0,61	Bremerhaven	5,35	6,74	1,39
Wismar	2,80	2,54	- 0,26	Cuxhaven	5,10	6,51	1,41
Warnemünde	2,43	2,35	- 0,08	Büsum	5,14	6,35	1,21
Stralsund	2,39	2,33	- 0,06	Husum	5,66	6,69	1,03
Greifswald	2,79	3,34	+ 0,55	Wittdün	4,14	5,20	1,06

#### 2.4 Verfahren zur Sicherheitsüberprüfung und Bemessung von Küstenschutzanlagen an der deutschen Ostseeküste (SEBOK A)

Derzeit basiert die Bemessung und Sicherheitsüberprüfung des Küstenschutzes an der deutschen Ostseeküste weitgehend auf dem Extremereignis des Sturmhochwassers vom November 1872 (MLR, 2001; MBLUV-MV, 2009). Die Bestimmung des Bemessungswasserstandes orientiert sich an den Aufzeichnungen der Scheitelwasserstände dieses Ereignisses, die nur für vereinzelte Standorte vorliegen. Verlässliche Aufzeichnungen des Seegangs sind für den Bemessungssturm und generell für Extremereignisse nicht verfügbar. Der Bemessungsseegang wird stochastisch bestimmt; Dauer und relatives zeitliches Eintreten von Hochwasser und hohem Seegang sind dabei nicht angemessen berücksichtigt. Auch wird ein prognostizierter Anstieg des mittleren Meeresspiegels dem Bemessungswasserstand bislang ohne Berücksichtigung nichtlinearer Wechselwirkungen rein additiv überlagert. Andere Aspekte, wie die Beschaffenheit des Meeresgrundes und im Speziellen die langfristige Sedimentverfügbarkeit im Küstenvorfeld werden bei Bemessungsaufgaben gewöhnlich ebenfalls nicht berücksichtigt.

Im Rahmen dieses Teilprojektes wurde ein Verfahren zur Sicherheitsüberprüfung und Bemessung von Küstenschutzanlagen an der deutschen Ostseeküste entwickelt, das dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik entspricht (BRUSS et al., 2009). Das Verfahren verbindet Sturmweatherlagen, die mit einem meteorologischen Ensemble Prediction System erzeugt wurden (SCHMITZ, 2009), und die rekonstruierten Windfelder des Referenzereignisses von 1872 (ROSENHAGEN u. BORK, 2009) mit hydrodynamisch- und morphodynamisch-numerischen Simulationen. Bei den 61 am DWD ausgewählten Ensemble-Szenarien handelt es sich um physikalisch konsistente, also um mögliche Wetterlagen, die jedoch in dieser Form bisher nicht aufgetreten oder beobachtet worden sind. Die am Forschungs- und

Technologiezentrum (FTZ) Büsum entwickelten hydrodynamischen und morphodynamischen Modelle wurden mit Hilfe von Messdaten kalibriert und verifiziert. Die Simulationsergebnisse weisen gute Übereinstimmung mit Naturdaten auf (BRUSS et al., 2009; JIMENEZ et al., 2009).

Im Wesentlichen impliziert das Verfahren zwei Schritte: Zunächst wird die Höhe der Küstenschutzanlage (z. B. Deich) auf Grundlage der extremen Belastungsszenarien unter Berücksichtigung der lokalen Topographie und der geplanten oder vorhandenen Geometrie des Bauwerkes definiert oder überprüft. Hierzu werden hochauflösende Strömungs- und Seegangmodelle des jeweiligen Küstenabschnittes verwendet. Für jeden Sturm wird der zeitliche Verlauf des Wellenauflaufes auf das Bauwerk gemäß dem EUROTOP-MANUAL (2007) bestimmt, wobei Wasserstand und Seegangparameter am Deichfuß mit den lokalen Modellen ermittelt werden. Deichquerschnitte können auf diese Weise anhand unterschiedlicher Belastungsfälle optimiert werden. Die Topographie wird in diesem Schritt als unveränderlich angenommen.

Um den ungünstigsten Fall der Sturm-Gesamtbelastung auf die Küste abschließend bestimmen zu können, werden danach in einem zweiten Schritt die morphodynamischen Reaktionen des Strandes und Vorstrandes sowie ihr interaktiver Einfluss auf die Seegangsentwicklung während des Sturmereignisses mit berücksichtigt. Zu diesem Zweck werden morphodynamische Modellsimulationen in Verbindung mit den meteorologischen Sturm-szenarien und der Rekonstruktion des Sturmes von 1872 verwendet. Durch diese differenzierte Betrachtung des zeitlichen Ablaufes einzelner Stürme können sowohl akkumulierte Sturmwirkungen, etwa in Form des Energieeintrages auf den betrachteten Strandabschnitt, als auch die zeitliche Entwicklung von Wasserstand und Wellenauflauf, und damit die Dauer der Belastung, berücksichtigt werden. Danach werden die Simulationen im Küstenvorfeld mit morphodynamischen Modellen über längere Zeitperioden von 5 bis 10 Jahren unter Einbeziehung der Beschaffenheit des Meeresgrundes und einer Abschätzung der langfristigen Sedimentverfügbarkeit durchgeführt. Dies erlaubt eine optimierte Bemessung der Küstenschutzanlagen, bei der die dauerhafte Standfestigkeit in der Strandzone gewährleistet werden kann.

Für das Sturmhochwasser von 1872 wurde erstmals die flächendeckende Entwicklung von Wasserstand und Seegang rekonstruiert (BRUSS et al., 2009; JIMENEZ et al., 2009). Der Vergleich der ausgewählten Sturmszenarien mit dem Ereignis von 1872 führt zu den örtlich jeweils höchsten Belastungen. Aus der Analyse der resultierenden Scheitelwasserstände und des Seegangs konnten die folgenden Erkenntnisse für die deutsche Ostseeküste gewonnen werden: An der Außenküste der Pommerschen Bucht wurde der bislang maßgebende Sturm von 1872 durch einige der Szenarien sowohl in den Scheitelwerten als auch in den Verweildauern deutlich übertroffen. Daraus lässt sich hier auf ein erhöhtes Gefährdungspotential für die Deichsicherheit schließen. Für den Nordwesten der deutschen Ostsee, z. B. für den Bereich um Flensburg, haben die Szenarien mit dem Ereignis von 1872 vergleichbare, in der Mecklenburger Bucht dagegen etwas niedrigere Scheitelwasserstände ergeben. Damit wird für die Kieler und die Mecklenburger Bucht der Sturm von 1872 als maßgebendes Ereignis für den Bemessungswasserstand bestätigt. In den Szenarien sind dennoch für die meisten Strandabschnitte der Außenküste mehrere Sturmereignisse mit Scheitelwasserständen über 2,5 m NN enthalten, die gemäß der Klassifikation nach MEINKE (1999) als sehr schwere Sturmfluten einzustufen sind. Aus der Seegangsimulation der untersuchten Stürme wurde zudem die Größenordnung und räumliche Verteilung der Seegangsbedingungen entlang der gesamten deutschen Ostseeküste bei extremen Ereignissen bestimmt. Maximale signifikante Wellenhöhen an der 10-m-Tiefenlinie liegen in den geschützteren Bereichen der Außenküste

zwischen 2 und 3 m und an exponierten Küstenabschnitten von Rügen und Fehmarn um ca. 4 bis 5 m.

Bei der Sicherheitsüberprüfung des Landesschutzdeiches der Probstei zeigen die Ergebnisse, dass der Sturm von 1872 hier mit einem Wasserstand von 2,95 m NN und einer signifikanten Wellenhöhe von ca. 1 m am Deichfuß zum höchsten rechnerischen Bestick führt. Die Unterschiede zum maximalen Bestick der vier höchsten Szenarien liegen zwischen 18 cm und 34 cm. Der Vergleich der aktuellen Deichkronenhöhe von 4,5 m NN mit dem aus der Methode bestimmten maximalen rechnerischen Bestick von 3,85 m NN lässt in der Probstei auf eine Reserve von ca. 65 cm für die künftige Entwicklung des mittleren Wasserstandes und anderer sturmflutverstärkender Faktoren schließen. Beim Vergleich der Erosionsraten führen in der Probstei aufgrund unterschiedlicher Sturmverläufe zwei der Szenarien zu einem höheren Gesamtenergieeintrag als das Ereignis von 1872.

Die am FTZ Büsum entwickelte hydrodynamische und morphodynamische Modellfamilie bildet in Verbindung mit den meteorologischen Sturmszenarien und der Rekonstruktion des Sturmes von 1872 ein integriertes System, das für verschiedene Fragestellungen des konstruktiven Küstenschutzes entlang der gesamten deutschen Ostseeküste angewendet werden kann. Aufgrund der großen Bandbreite in den zeitlichen Abläufen der Szenarien mit unterschiedlichen Verweildauern von hohem Wasserstand und Seegang ist nun eine Vielfalt unterschiedlicher und extremer Küstenbelastungsszenarien verfügbar. Die Kopplung von hydrodynamischen und morphodynamischen Modellen erlaubt die Überprüfung der Standicherheit von Küstenschutzanlagen sowohl für Extremereignisse als auch für mittelfristige Zeiträume. Zudem wird mit fortschreitender Entwicklung auf diesem Gebiet auch die Einschätzung längerfristiger morphologischer Entwicklungen für Bemessungsaufgaben möglich. Beispiele möglicher Anwendungen sind die direkte Bemessung künftiger Küstenschutzanlagen, die Sicherheitseinschätzung bestehender Strukturen oder die Untersuchung der lokalen Auswirkung eines Meeresspiegelanstiegs auf die Hydrodynamik extremer Sturmergebnisse. Daraus können Prioritäten zur Verbesserung der Sicherheitslage definiert werden.

## 2.5 Verfahren zur Sicherheitsüberprüfung und Bemessung von Küstenschutzanlagen an der deutschen Ostseeküste (SEBOK B)

Im Teilvorhaben SEBOK B wurden zwei numerische Modelle zur Langzeit-Simulation von Seegang in der Ostsee (WODLM und SOHIP) auf der Grundlage des numerischen Modells SWAN als Basis für die Ableitung von Seegangseingangsgrößen für die Bemessung von Küstenschutzwerken entwickelt, mit verfügbaren Seegangsmessungen (Messungen Universität Rostock und GKSS) verifiziert und angewendet. Daneben wurde ein bekanntes statistisches Verfahren zur Ermittlung von Seengangsdaten auf der Grundlage von Messungen genutzt. Im Ergebnis liegen Ergebnisse aus Seegangssimulationen für einen Zeitraum von maximal 57 Jahren (1948–2005) für die gesamte deutsche Ostseeküste vor, die in Kombination mit verfügbaren Wasserstandsinformationen aus Messungen und Modellrechnungen die Grundlage für die statistischen Analysen sind.

Insgesamt wurde im Rahmen der Verifikation festgestellt, dass die zu erwartende Genauigkeit der Ergebnisse numerischer Seegangmodelle sehr stark von der Qualität und Genauigkeit der Eingangs-Windfelder abhängt. Die mit dem WODLM ermittelten Seegangparameter (Wellenhöhe, Wellenperiode und Wellenanlaufriechungen sowie das Wellenspektrum) waren bei der Betrachtung einzelner Ereignisse um eine Größenordnung genauer im

Vergleich zu Wellenmessungen als die mit dem SOHIP-Modell ermittelten Seegangparameter. Im Mittel stimmten jedoch die simulierten und die gemessenen Werte vergleichsweise gut überein. Die in WODLM verwendeten Windfelder stammen aus dem aktuellen Windmodell des DWD (LM-Modell/COSMO-EU-Modell, räumliche Auflösung ca. 7 km × 7 km) und basieren auf Beobachtungen. Demgegenüber sind die in dem SOHIP-Modell verwendeten HIPOCAS-Windfelder deutlich geringer aufgelöst (33 km × 56 km). Es ist zu vermuten, dass die räumliche Auflösung der Windfelder bei der Vorhersage/Nachhersage von Seegangsinformation eine große Rolle spielt. Leider stand für systematische Untersuchungen des Einflusses der Auflösung auf die Vorhersageergebnisse im MUSTOK-Projekt nicht ausreichend Zeit zur Verfügung. Hier wird weiteres Untersuchungspotential für die Zukunft gesehen.

Demgegenüber spielte die räumliche Auflösung des Wellenmodells selbst – zumindest für die ausgewählten Vorhersagepunkte in Wassertiefen von etwa 10 m – keine so entscheidende Rolle. Für Auflösungen von 500 m × 500 m, 1 km × 1 km und 2 km × 2 km wurden für die ausgewählten Vorhersagepunkte praktisch die gleichen Ergebnisse ermittelt.

Bei der Verifikation der Langzeit-Seegangssimulationen wurden erneut die Unsicherheiten des Modells SWAN bei der Ermittlung von Wellenperioden insbesondere im Seegangsvorhersagemodus deutlich (siehe auch SCHLAMKOW u. FRÖHLE, 2008). Die Wellenperioden werden praktisch immer deutlich unterschätzt. Dieses Problem wird derzeit von der Universität Rostock intensiv bearbeitet. Für die Arbeiten im Projekt MUSTOK wurden die Wellenperioden auf der Grundlage von Messungen aus Korrelationsrechnungen ermittelt.

## 2.6 Statistische Analysen von Wasserständen und Seegang

Die bisherigen Ergebnisse zu Eintrittswahrscheinlichkeiten von extremen Wasserständen zeigten, dass dringender Forschungsbedarf vorhanden war; dieser Forschungsbedarf leitete sich vorwiegend aus dem Sturmflutereignis von 1872 ab, da dieses Ereignis auf der einen Seite maßgebend für den aktuellen Küstenschutz ist, auf der anderen Seite aber große Defizite bei der statistischen Einordnung dieses Ereignisses vorhanden waren. Im Rahmen des Verbundprojektes MUSTOK wurde ein Ansatz gewählt, der es ermöglichte, neben den beobachteten Wasserständen auch historische Ereignisse und modellierte Extremwerte in die Analysen zu integrieren (MUDERSBACH u. JENSEN, 2009). Dabei zeigte sich, dass die zusätzliche Einbeziehung von historischen Wasserstandsereignissen zu einem besseren Verständnis und zu einer belastbareren Schätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten führt. Gleichzeitig muss jedoch beachtet werden, dass historische Ereignisse oft mit sehr großen Unsicherheiten versehen sind. Wenn die Unsicherheiten zu groß sind, können diese den Mehrgewinn wiederum kompensieren oder sogar überkompensieren. Der wesentliche Arbeitsaufwand liegt bei der Verwendung von historischen Zusatzinformationen somit weniger in der methodischen Anwendung, sondern vielmehr in der Datenrecherche und der Datenaufbereitung, um eine fundierte Beurteilung der Unsicherheiten vornehmen zu können. Ein Forschungsbedarf ergibt sich hierbei bei der unterschiedlichen Gewichtung mehrerer historischer Hochwasserereignisse. Wenn beispielsweise mehrere historische Sturmfluten bekannt sind, so können einige mit größeren Unsicherheiten behaftet sein als andere. Diese Unterschiede können zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht in der Extremwertstatistik berücksichtigt werden.

Die Einbeziehung von modellierten Extremwerten hat, zusätzlich zur Verwendung von historischen Ereignissen, zu einer Verbesserung der Extremwertstatistik geführt. Mit Hilfe von modellierten Extremwerten kann die Extrapolation der Verteilungsfunktionen in den

Bereich der sehr kleinen Überschreitungswahrscheinlichkeiten physikalisch begründet werden. Mit dieser Methodik ist es möglich, Aussagen über sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeiten zu treffen. Auch bei diesem Ansatz ist jedoch ein weiterer Optimierungsbedarf vorhanden. Für die extremwertstatistischen Analysen wurden den modellierten Extremereignissen Wahrscheinlichkeiten aus der Anzahl der meteorologischen Simulationsstunden zugeordnet. Diese Methodik stellt lediglich eine Näherungslösung dar, da ein entsprechend großes Datenkollektiv von extremen Wasserständen nicht zur Verfügung steht. Des Weiteren ist nicht abschließend geklärt, wie stark die modellierten Extremwerte im Vergleich zu den beobachteten Wasserständen zu gewichten sind.

Abschließend sind aus Sicht der Autoren die Datengrundlagen für statistische Extremwertanalysen an der deutschen Ostseeküste mit dem vorliegenden Verbundprojekt deutlich verbessert worden. Die angewendeten Methoden führen ebenso zu einer verbesserten Beurteilung der Eintrittswahrscheinlichkeiten extremer Wasserstände. Bei allen extremwertstatistischen Methoden muss jedoch beachtet werden, dass eine Verifikation der statistischen Ergebnisse immer schwierig ist.

Neben den statistischen Untersuchungen zu extremen Wasserständen wurden auch Analysen zu Häufigkeiten von Seegang und zur Eintrittswahrscheinlichkeit von extremen Seegangereignissen, sowie zur Dauer von extremen Ereignissen und zur kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeit von Wasserständen und Seegang durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Detail dem Beitrag von SCHLAMKOW und FRÖHLE (2009) in diesem Sonderheft der KÜSTE bzw. dem Abschlussbericht zu entnehmen. Insgesamt liegen als Ergebnis des MUSTOK-Vorhabens mittlere Verteilungen des Seegangs für die gesamte deutsche Ostseeküste vor. Daneben wurde für ausgewählte Punkte die gemeinsame Eintrittswahrscheinlichkeit von Wasserständen und Seegang sowie von Wasserständen und der Dauer einzelner Ereignisse ermittelt. Hier zeigte sich, dass insbesondere für die Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit extrem seltener Ereignisse die Datengrundlage derzeit noch etwas dürftig ist und dass dementsprechend die Unsicherheiten der Ergebnisse der statistischen Auswertungen noch vergleichsweise groß sind. Für die Zukunft könnten diese Unsicherheiten verringert werden, einerseits durch eine Verbesserung der Datengrundlage und andererseits durch eine direkte Kopplung der statistisch abhängigen Größen Wasserstand und Seegang (bzw. Wasserstand und Dauer) mit einer entsprechend direkten Ermittlung der gemeinsamen Eintrittswahrscheinlichkeiten auf der Grundlage kombinierter, bivariater Verteilungsfunktionen.

Die statistischen Auswertungen der Seegangsdaten sowie der kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen und Wellenhöhen sowie Wasserständen und Sturmdauern können direkt für praktische Bemessungsprobleme aufbereitet werden. Beispiele hierfür sind in den o. a. Veröffentlichungen angegeben.

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

- BENKEL, A. und MEINKE, I.: Variation von sturmfluterzeugenden Tiefdruckgebieten oder Sturmflutwetterlagen, Abschlussbericht 1.2 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Geesthacht, 2008.
- BORK, I. und MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Modellierung von extremen Sturmhochwassern an der deutschen Ostseeküste. Die Küste, Heft 75, 2009.
- BRUSS, G.; JIMENEZ, N.; EIBEN, H. und MAYERLE, R.: Bestimmung von Bemessungsparametern für Küstenschutzanlagen an der deutschen Ostseeküste aufbauend auf Szenariosimulationen, Die Küste, Heft 75, 2009.

- BRUSS, G.; JIMENEZ, N. und MAYERLE, R.: Bestimmung von Bemessungsparametern für Küstenschutzanlagen an der deutschen Ostseeküste aufbauend auf Szenariosimulationen. Abschlussbericht 2.2 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Kiel, 2009.
- EUROTOP: European Overtopping Manual, Ed. Pullen, T. [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com), 2007.
- JENSEN, J.; MUDERSBACH, Ch.; MÜLLER-NAVARRA, S.; BORK, I.; KOZIAR, Ch. und RENNER, V.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. *Die Küste*, Heft 71, 123–167, 2006.
- JENSEN, J.; FRÖHLE, P.; HOFSTEDE, J.; GÖNNERT, G.; MUDERSBACH, Ch.; MÜLLER-NAVARRA, S.; OUMERACI, H.; ROSENHAGEN, G.; RUDOLPH, E.; THORENZ, F. und WEISSE, R.: A1 – Sturmflutwasserstände und Seegang – Mögliche Extremereignisse und Klimaänderungen. *HANSA International Maritime Journal*, Nr. 4, 144. Jahrgang, Hamburg, 2007.
- JIMENEZ, N.; BRUSS, G.; EIBEN, H. und MAYERLE, R.: Seegangsmodellierung der Ostsee für Extremereignisse und Rekonstruktion des Sturmes von 1872, *Die Küste*, Heft 75, 2009.
- MBLU-MV: Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern. Schwerin, Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt des Landes Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.), 2009.
- MEINKE, I.: Sturmfluten in der südwestlichen Ostsee dargestellt am Beispiel des Pegels Warnemünde. *Marburger Geographische Schriften*, 134: 1–23, 1999.
- MLR: Generalplan Küstenschutz – Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein, Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein, Kiel, 2001.
- MUDERSBACH, Ch. und JENSEN, J.: Zur Risikoermittlung in Küstenregionen mit probabilistischen Methoden – Ein Beitrag zur Beschreibung und Bewertung, *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 1. Jahrgang, Nr. 5, GFA – Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V., Hennef, S. 260-266, DOI: 10.3243/kwe2008.05.004, 2008.
- MUDERSBACH, Ch. und JENSEN, J.: Extremwertstatistische Analyse von historischen, beobachteten und modellierten Wasserständen an der deutschen Ostseeküste, *Die Küste*, Heft 75, 2009.
- ROSENHAGEN, G. und BORK, I.: Rekonstruktion der Sturmflutwetterlage vom 13. November 1872, *Die Küste*, Heft 75, 2009.
- SCHLAMKOW, C. und FRÖHLE, P.: Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der Ostsee, *Die Küste*, Heft 75, 2009.
- SCHLAMKOW, C. and FRÖHLE, P.: Wave period forecasting and hindcasting : Investigations for the improvement of numerical models. In: Galappatti et al.; PIANC (Hrsg.): PIANC-COPEDEC VII, DubaiProceedings. , 2008.
- SCHMITZ, R.: Modellierung von historisch aufgetretenen Sturmereignissen über der Ostsee mithilfe von Vorhersagen eines Ensemblesystems und eines Regionalmodells, *Die Küste*, Heft 75, 2009.