

Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der Ostsee

Von CHRISTIAN SCHLAMKOW und PETER FRÖHLE

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

Die Definition und Ermittlung von Eingangsdaten für den Entwurf und die Bemessung von Bauwerken des Küsten- und Hochwasserschutzes kann immer nur problemabhängig, d.h. abhängig von den geplanten Bauwerken und ortsabhängig erfolgen. Daneben spielt auch das gewählte Bemessungsverfahren (probabilistisch, deterministisch, Modellversuche, etc.) eine wesentliche Rolle.

In diesem Zusammenhang war es das Ziel des Forschungsvorhabens SEBOK B, Methoden zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer Größen als Grundlage für die Bemessung von Küstenschutzanlagen an der deutschen Ostsee zu entwickeln. Im Projekt SEBOK B wurde hierzu ein Ansatz entwickelt, der auf Grundlage von statistischen Analysen möglichst umfassender Zeitserien aus Messungen, statistischen sowie physikalisch-numerischen Modellen basiert. Als Grundlage wurden zunächst vorhandene Messdaten der ozeanographischen und hydrodynamischen Größen wie Wasserstände, Seegang und Wind zusammengestellt, plausibilisiert und – sofern erforderlich – im statistischen Sinne homogenisiert.

Die verfügbaren Seegangsinformationen aus Messungen waren – wie erwartet – für die statistische Analyse der Seegangsverhältnisse nicht ausreichend. Eine wesentliche Aufgabe war es daher, Zeitserien der Seegangparameter auf der Grundlage von Modellen aus den verfügbaren meteorologischen und ozeanographischen Daten abzuleiten. Hierzu wurden Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen für mehrere Lokationen an der deutschen Ostseeküste durchgeführt. Daneben wurden zwei unterschiedliche numerische Langzeit-Seegangmodelle (SOHIP und WODLM) für die deutsche Ostseeküste entwickelt, verifiziert und angewendet. Im Ergebnis liegen Zeitserien von Seegangsinformationen für einen Zeitraum von 57 Jahren für die gesamte deutsche Ostseeküste vor.

Die Zeitserien der Wasserstände und des Seegangs wurden mit statistischen und extremwertstatistischen Methoden analysiert. Für die Parameter Wasserstand, Dauer von Extremereignissen und Wellenhöhe wurden jeweils mit univariaten Verfahren die Verteilung extremer Ereignisse mit zugehöriger Verteilungsfunktion bestimmt und zu erwartende extreme Ereignisse mit entsprechend geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten als Grundlage für die Bemessung abgeleitet. Für die Parameter Wasserstand und Wellenhöhe wurde im Projekt eine Methode zur Ermittlung von kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten für zwei im statistischen Sinne nicht unabhängige Variablen erfolgreich angewendet. Die Unsicherheiten bei der Ermittlung der kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten sind derzeit insbesondere wegen der begrenzten Datenlage noch vergleichsweise groß. Hier besteht noch Raum für weitere Untersuchungen und Forschungsarbeiten.

Um Bemessungsgrößen konkret festlegen zu können, wurden im Forschungsvorhaben 24 übergeordnete Küstenabschnitte (13 für Mecklenburg-Vorpommern, 11 für Schleswig-Holstein) definiert. In einem weiteren Schritt wurde die Homogenität der Bemessungsparameter für die Abschnitte überprüft.

Für Warnemünde wurden aus den Ergebnissen der statistischen Analysen Bemessungsgrößen für ausgewählte Bauwerke exemplarisch festgelegt und für konkrete Bemessungsaufgaben bis direkt an die Küstenlinie transformiert.

Für die Bemessung von Bauwerken an der deutschen Ostseeküste stehen als Ergebnis des Projekts SEBOK B Methoden zur Verfügung zur flächenhaften Bestimmung:

- der mittleren Häufigkeitsverteilungen für Wasserstände und Seegang
- von univariaten Verteilungsfunktionen der Wasserstände, Wellenhöhen und Dauern von Sturmhochwassern
- von bivariaten Verteilungsfunktionen für Wasserstände und Wellenhöhen sowie Wasserstände und Dauern von Sturmhochwassern.

Diese können abhängig von der Bemessungsaufgabe und der gewählten Methodik (probabilistisch, deterministisch, modellbasiert) direkt für eine Vielzahl von Bauwerken (Deiche, Dünen, Strandersatz, etc.) eingesetzt werden.

S c h l a g w ö r t e r

Hydrodynamische Bemessungsparameter, Ostsee, Langzeit-Seegangssimulation, Messdaten, Statistik, Extremwertstatistik, Sturmhochwasser

S u m m a r y

Input data for the design and dimensioning of coastal- and flood-protection measures has to be defined problem oriented, i.e. depending on the planned structures and the actual location. Besides this, the selected design method (probabilistic, deterministic, hydraulic modeling, etc.) plays an important role.

The aim of the research project SEBOK B was to develop methods for the determination of oceanographic and hydrodynamic conditions for the design and dimensioning of coastal protection structures at the German part of the Baltic Sea coast. The basic approach of SEBOK B is based on statistical analyses of comprehensive long-term time series of the oceanographic and hydrodynamic conditions. The long-term time series are based on measurements and statistical as well as numerical models.

In a first step, the available measurement data (water level, waves and wind) have been compiled, reviewed and in a statistical sense homogenized. As expected, the available period of measured wave data was not satisfactory. Hence, additional wave information have been determined using statistical and numerical models, e.g. wind-wave-correlations and numerical long-term simulations. Two different long-term wave models for the Baltic Sea have been developed, verified and applied. As a result, wave conditions in the Baltic Sea have been determined covering a period of 57 year.

The time series of water levels and sea state parameters have been analysed using statistical methods as well as extreme value statistics. For the parameters water levels and wave conditions the distribution function have been determined, respectively, and extreme values (with low probability) have been estimated. For the parameters water level and wave height, a method for the calculation of combined, bivariate probability of occurrence was successful applied. The uncertainties in the calculation of the combined probability of occurrence are comparatively high at present, mainly since the available data is limited. In this field we see a strong demand for more detailed research.

As a result of the project, methods for determination of design parameters for coastal and flood protection structures at the German part of the Baltic coast are available. This includes the estimation of:

- *the average frequency distribution of water levels and wave information (heights, periods and directions),*
- *the univariate frequency distribution of water levels, wave heights and the durations of flood events and*
- *the bivariate frequency distribution of water levels and wave heights as well as water levels and durations of storm events.*

These information can be directly applied for the design of constructions as for example dykes, dunes and beach replenishments and cover a wide range of design methods (probabilistic, deterministic, hydraulic models).

Key words

Hydrodynamic design parameters, Baltic Sea, long term simulation of sea state, measured data, statistics, extreme value statistics, storm surge

Inhalt

1. Einleitung	209
2. Forschungsansatz	209
3. Ermittlung der Datengrundlage	210
3.1 Messdaten	210
3.2 Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen	211
3.3 Langzeit-Seegangssimulationen	213
3.3.1 WODLM	213
3.3.2 SOHIP	216
4. Definition von Bemessungsdaten	220
5. Statistische Analyse der Eingangsdaten	222
5.1 Wasserstand	222
5.2 Dauer	225
5.3 Seegang	225
5.4 Kombination Wasserstand – Wellenhöhe	227
6. Danksagung	228
7. Schriftenverzeichnis	228

1. Einleitung und Zielsetzung

Eingangsdaten für den Entwurf und die Bemessung von Bauwerken des Küsten- und Hochwasserschutzes können immer nur problemabhängig und ortsabhängig definiert werden. Zu ihrer Ermittlung werden beispielsweise die Lage des zu schützenden Küstenabschnittes sowie die relevanten und ereignisbezogenen Wind- und Wasserstandsverhältnisse als Funktion des zeitlichen Verlaufes maßgebend. Dies gilt für Hochwasserschutzaufgaben und Bauwerke zur Beeinflussung der Sedimentbewegung in gleicher Weise. Letztendlich kann die Festlegung der Bemessungsgrößen nur auf der Grundlage statistischer Untersuchungen in Kombination mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und der Abschätzung des örtlich zu definierenden Risikos für ein Versagen (Funktion, Konstruktion) und daraus abzuleitender technisch-administrativer Schritte. Die gemeinsame, zum Teil statistisch abhängige Wirkung hydrodynamischer Größen muss weiterhin berücksichtigt werden.

Ziel der Untersuchungen im Vorhaben SEBOK B ist die Entwicklung, Verifikation und Anwendung einer Methodik zur Ermittlung maßgebender hydrodynamischer Eingangsdaten als Grundlage für den Entwurf und die Bemessung von Küsten- und Hochwasserschutzbauwerken im Bereich der deutschen Ostseeküste auf der Grundlage statistischer Untersuchungen der Eingangsdaten (Seegang und Wasserstände).

2. Forschungsansatz

Grundsätzlich kommen für die Ermittlung der hydrodynamischen Bemessungsgrößen mehrere methodische Herangehensweisen in Frage. Im Rahmen des Forschungsvorhabens SEBOK B wurden die Eingangsdaten für die Bemessung auf der Grundlage möglichst umfassender Zeitserien der hydrodynamischen Parameter bestimmt. Als Eingangsdaten für die Ableitung der Bemessungsgrößen wurden Seegangs-, Wasserstands- und Strömungsdaten aus verfügbaren Messungen und aus statistischen und numerischen Modellen verwendet (Kap. 3).

Für die Wasserstände stehen vergleichsweise umfangreiche Zeitserien aus Pegelmessungen für mehrere Lokationen an der deutschen Ostseeküste zur Verfügung. Seegangsmessungen über vergleichbar lange Zeiträume sind an der deutschen Ostseeküste nicht verfügbar (vgl. 3.1.3). Die benötigten Seegangsdaten wurden daher mittels Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen (Kap. 3.2) sowie Langzeit-Seegangssimulationen (Kap. 3.3) ermittelt.

Aufbauend auf ein kurz gehaltenes Kapitel zum Themenkomplex Eingangsdaten für die Bemessung sowie Sicherheit von Bauwerken (Kap. 4) werden die statistischen Analysen und Bewertungen in Kap. 5 zusammenfassend dargestellt. Hierbei wurden die hydrodynamischen Größen zunächst einzeln (univariat) behandelt (Kap. 5.1–5.3). Die gemeinsame Berücksichtigung von wechselnden Wasserständen und örtlichem Seegang – die weder statisch unabhängig voneinander sind noch einen funktionalen Zusammenhang aufweisen – erfolgt durch die Ermittlung kombinierter (bivariater) Eintrittswahrscheinlichkeiten für Seegang und Wasserstand. Im Kontext des Forschungsvorhabens SEBOK B wurde dazu die kombinierte univariate Methode benutzt. Abschließend wurden die statistischen Beziehungen zwischen der Dauer und dem Maximalwasserstand des jeweiligen Ereignisses ermittelt.

3. Ermittlung der Datengrundlage

Zur Ableitung von Bemessungsgrößen für ausgewählte Lokationen wie sie in SEBOK B angestrebt werden sind hydrodynamische (Mess-)daten als Datengrundlage erforderlich. Der Ermittlung der Datengrundlage mittels numerischer Simulationsrechnungen wurde, insbesondere wegen der vergleichsweise schlechten Datenlage bei Seegangsinformationen, ein maßgebender Anteil der Forschungsarbeit gewidmet. Im Ergebnis dieses Prozesses stehen jetzt für den Bereich der deutschen Ostseeküste verbesserte Seegangsdaten als Grundlage für eine Vielzahl von Bemessungsaufgaben zur Verfügung.

3.1 Messdaten

Im Fachgebiet Küstenwasserbau der Universität Rostock wurden schon im Vorfeld der Projektbearbeitung hydrodynamische und meteorologische Messdaten gesammelt, vereinheitlicht, homogenisiert und verifiziert. Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden diese Arbeiten intensiviert und auf die für das Projekt verwendbaren Daten konzentriert. Im Projektergebnis bilden Messdaten eine Grundlage für die weiteren Untersuchungen, insbesondere beruhen die statistischen Untersuchungen der Wasserstände vollständig auf gemessenen Daten.

Wasserstände

Im Bereich der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns werden Wasserstandsdaten u.a. vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), den Wasser- und Schifffahrtsämtern (WSA) in Stralsund und Lübeck und vom Staatlichen Amt für Umwelt und Natur (StAUN) in Rostock erhoben. Das Fachgebiet Küstenwasserbau hat für das StAUN Rostock in den vergangenen Jahren eine Datenbank aufgebaut, die hydrographische Daten im Land Mecklenburg-Vorpommern zentral zusammenfasst. Der Inhalt dieser Datenbank ist für das Forschungsvorhaben verfügbar und wurde – soweit verfügbar – um Wasserstandsdaten aus Schleswig-Holstein erweitert.

Die im Projekt verfügbaren Pegelstandorte wurden in Bezug auf Vollständigkeit und Messumfang analysiert mit dem Ergebnis, dass die längsten Zeitserien für die Pegelstandorte Warnemünde, Wismar und Greifswald mit einem zeitlichen Umfang von 51, 49 und 44 Jahren vorhanden sind.

Wind

Die im Projekt verfügbaren Winddaten (Windgeschwindigkeit [U] und Windrichtung [$\Delta\Theta$]) wurden insbesondere für die Seegangsermittlung mittels Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen benutzt. Die Messungen wurden/werden vom StAUN (IMK-Messnetz) und vom Deutschen Wetterdienst (DWD) durchgeführt. Besonders lange Zeitserien sind für Boltenhagen, Arkona und Ueckermünde sowie insbesondere an der Station Warnemünde (>50 Jahre) vorhanden.

Seegang

Im Projekt waren Seegangsdaten aus eigenen Messkampagnen, aus dem Internen Messnetz Küste (IMK) des StAUN Rostock und Messungen des BSH (Station Arkona) verfügbar. Der zeitliche Umfang der Seegangsdaten ist für direkte extremwertstatistische Analysen vergleichsweise gering. Direkte Extrapolationen auf geringe Eintrittswahrscheinlichkeiten sind daher mit großen Unsicherheiten verbunden. Um die Datengrundlage zu verbessern und somit die Unsicherheiten bei der statistischen Analyse zu verringern, wurden im Rahmen des Vorhabens mittels Langzeit-Simulationen mit dem numerischen Modell SWAN sowie Wind-Wellen-Korrelationen möglichst umfassende Ganglinien der Seegangsparameter ermittelt.

3.2 Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen

Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen sind eine Methode zur Berechnung des nicht-linearen Zusammenhangs zwischen Windfeld und dem daraus resultierenden Wellenfeld (WITTE et al., 1999). Dabei werden statistische Korrelationsverfahren zur Berechnung des Zusammenhangs zwischen der örtlich gemessenen Windgeschwindigkeit (z.B. Winddaten aus Windmessstationen) und den gemessenen Wellenhöhen benutzt. Die Wellenanlaufrichtungen werden mittels Korrelation von Windrichtung und den gemessenen Wellenanlaufrichtungen berechnet. Die Wellenperioden werden zweckmäßigerweise aus der Korrelation der gemessenen Wellenhöhen mit den gemessenen Wellenperioden berechnet. Abb. 1 verdeutlicht die Vorgehensweise.

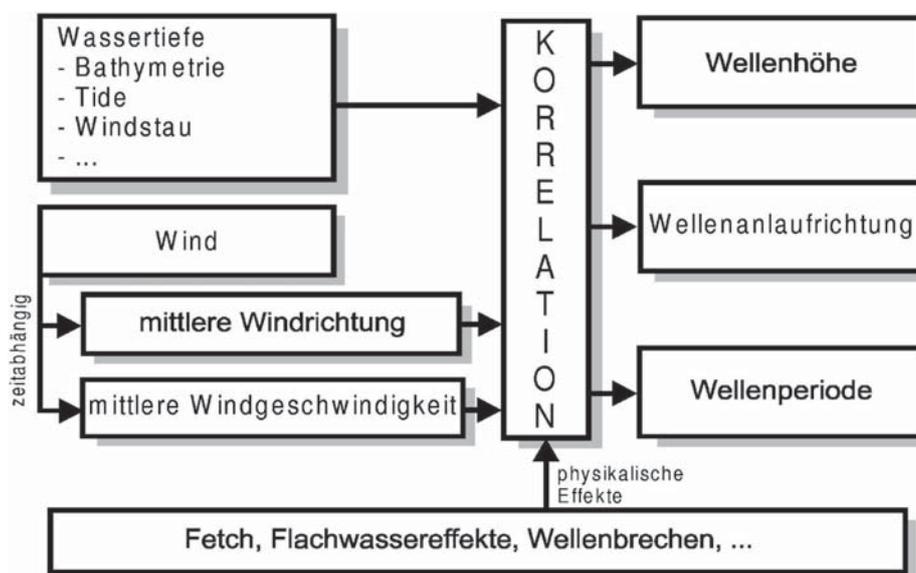


Abb. 1: Wind-Wellen-Korrelationsrechnung, Schema (nach WITTE et al., 1999)

Nachteilig der Wind-Wellen-Korrelationen gegenüber anderen Verfahren wie beispielsweise der numerischen Simulation oder theoretischen Vorhersageverfahren ist, dass für die Anwendung dieser Methode Seegangs-Messdaten und gemessene Windinformationen im Untersuchungsgebiet vorhanden sein müssen.

Von der Universität Rostock wurden Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen für mehrere Lokationen an der deutschen Ostseeküste (Warnemünde, Schönhagen, Brodten und Heiligenhafen) durchgeführt. Der zeitliche Umfang der korrelierten Seegangsdaten unterscheidet sich je nach Lokation und ist offensichtlich direkt von den verfügbaren Winddaten abhängig. Für Warnemünde steht beispielsweise eine Zeitserie von 1954 bis 2007 zur Verfügung.

Die Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen wurden nicht nur auf Basis der für ihre Erstellung verwendeten Seegangsdaten validiert, sondern auch durch fortgeschriebene Messungen immer wieder verifiziert. Die Extrapolation der Daten über die beobachteten Windgeschwindigkeiten hinaus ist begrenzt (FRÖHLE u. FITTSCHEN, 1999).

Abbildung 2 zeigt ein XY-Diagramm von gemessenen und korrelierten Wellenhöhen an der Station Warnemünde. Abb. 2 zeigt, dass die gemessenen und berechneten Werte eine sehr gute Übereinstimmung aufweisen. Es gibt praktisch keine systematischen Abweichungen, d.h. die Steigung der Ausgleichsgeraden beträgt nahezu $m = 1$, und die durchschnittliche mittlere Abweichung ist mit 21 cm vergleichsweise sehr gering.

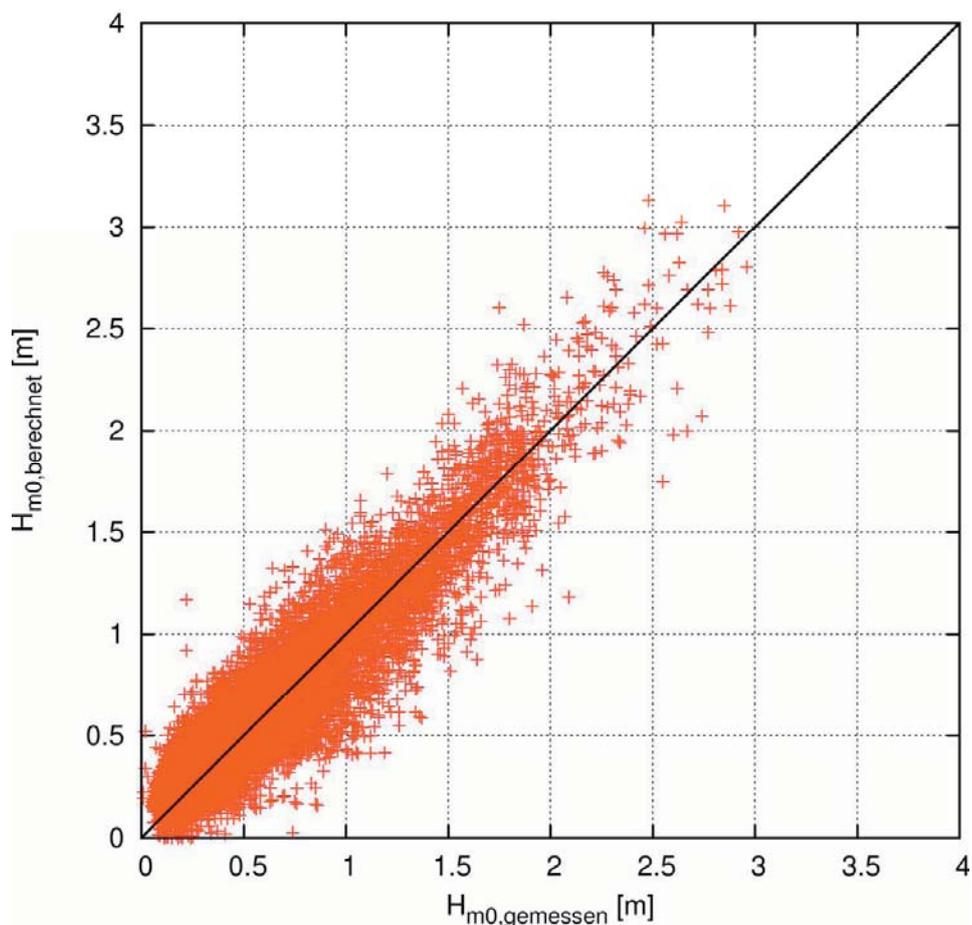


Abb. 2: Vergleich gemessener und korrelierter Wellenhöhen H_{m0} an der Station Warnemünde

Der Vergleich der gemessenen und berechneten Wellenperioden zeigt, dass die Wellenperioden ebenfalls sehr gut wiedergegeben werden. Lediglich für ausgeprägte Dünungsereignisse werden deutliche Abweichungen festgestellt. Dies gilt auch für die berechneten und gemessenen Wellenanaufrichtungen, insbesondere wenn Ereignisse, bei denen die Wellenhöhe $H_{m0} < 0,5$ m ist, vernachlässigt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass für Ereignisse mit geringen Wellenhöhen die Wellenanaufrichtungen stark von zufälligen Ereignissen (Schiffahrt, Fernwellen) beeinflusst sein können. Auf die zugehörigen Vergleichsdarstellungen für Wellenperioden und -anaufrichtungen wird aus Platzgründen verzichtet.

3.3 Langzeit-Seegangssimulationen

Der zeitliche Umfang von gemessenen Seegangdaten ist für eine direkte extremwertstatistische Analyse zu gering. Daher sind direkte statistische Extrapolationsrechnungen mit großen Unsicherheiten verbunden. Lange Ganglinien der Seegangparameter können mittels Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen erzeugt werden, wenn die Datengrundlage im Berechnungsgebiet ausreichend ist (vgl. Kap. 3.2). Für viele Abschnitte der deutschen Ostseeküste gibt es keine oder keine ausreichend umfassenden Seegangsmessungen, um Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen durchführen zu können.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden daher zwei Langzeit-Seegangssimulationen, basierend auf dem numerischen Seegangmodell SWAN (BOOIJ et al., 2001), entwickelt und betrieben.

Für das erste Langzeitmodell wurde der Name „WODLM“ (Westliche Ostsee, angetrieben durch DWD LM-Modell Windfelder) gewählt. Das Modell wurde auf der Grundlage einer Bathymetrie mit der Auflösung $\Delta x \approx \Delta y \approx 1$ km und Winddaten aus dem LM-Modell des DWD aufgebaut. Es wird detaillierter in Kap. 3.3.1 vorgestellt.

Der zeitliche Umfang der hoch aufgelösten Windfelder die durch den Deutsche Wetterdienst aus dem LM-Modell zur Verfügung gestellt werden konnten ist vergleichsweise begrenzt (1998–2006), daher wurde ein weiteres instationäres Seegangmodell entwickelt. Grundlage des zweiten Modells sind eine Bathymetrie mit der Auflösung $\Delta x \approx \Delta y \approx 2$ km und Windfelder die im Rahmen des HIPOCAS-Projektes von der GKSS (WEISSE et al., 2003) berechnet wurden. Diese Windfelder stehen über einen relativ langen Zeitraum (1948–2006) zur Verfügung. Für dieses Seegangmodell wurde der interne Name „SOHIP“ (Südliche Ostsee, Angetrieben durch HIPOCAS-Wind) gewählt. Das Modell wird in Kap. 3.3.2 detaillierter vorgestellt.

3.3.1 W O D L M

Datengrundlage

Das WODLM-Modell wurde auf der Grundlage einer Bathymetrie der Ostsee (SEIFERT et al., 2001) in der Auflösung $\Delta x \approx \Delta y \approx 1$ km. aufgebaut. In Abb. 3 sind die Wassertiefen im Simulationsgebiet dargestellt. Das Simulationsgebiet umfasst den gesamten dargestellten Abschnitt der westlichen Ostsee bis Bornholm. Es umfasst ein Gebiet von rd. 400 km x 350 km. Das heißt es wurden insgesamt 133.200 Rechengitterpunkte im Modell berücksichtigt.

Die als Antrieb für das Seegangmodell erforderlichen Winddaten wurden vom Deutschen Wetterdienst beschafft. Es wurde der Modellwind des sog. LM-Modells (heute

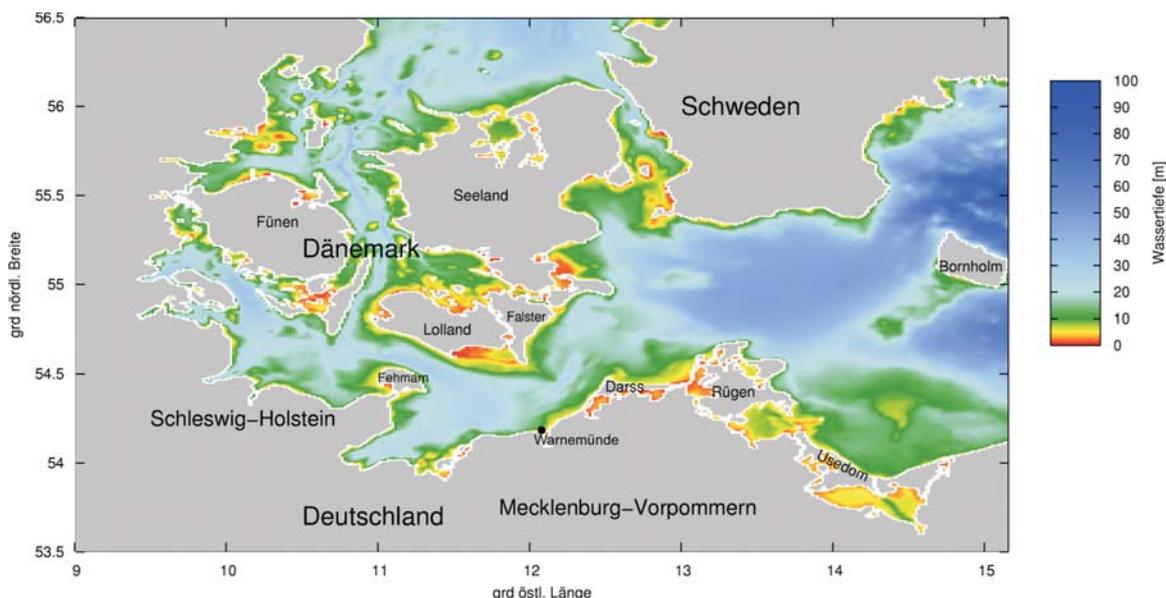


Abb. 3: Bathymetrie des numerischen Modells „WODLM“

COSMO-EU) mit einer zeitlichen Auflösung von $\Delta t = 1$ h und einer räumlichen Auflösung von $\Delta x \approx \Delta y \approx 7$ km für einen Zeitraum von 7 Jahren (1998–2006) geliefert und in das Seegangmodell integriert. Dabei wurden für die Seegangssimulation die Ergebnisse des so genannten „Reanalyselaufes“ verwendet, bei dem Messungen der Klimabeobachtung in die Modellierung integriert werden.

Simulationsparameter

Um das numerische Modell aufzubauen, wurden umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss verschiedener Längen der Zeitschritte (Δt), die Anzahl der zugelassenen Iterationen je Zeitschritt, die Frequenz- und Richtungsauflösung für die Abbildung des Seegangs (Δf , $\Delta \Theta$) und die Auflösung der Bathymetrie umfassend untersucht. Als Ergebnis wurde festgelegt, dass Zeitschritte von $\Delta t = 1$ h ausreichend sind, wenn dabei wenigstens 20 Iterationen zugelassen werden. Die Seegangsspektren werden mit 41 Frequenzen von $f_{\min} = 0,02$ Hz bis $f_{\max} = 1$ Hz über $\Delta \Theta = 10^\circ$ aufgelöst. Für die Auflösung der Bathymetrie wurden die Originalwerte der Ausgangsbathymetrie ($\Delta x \approx \Delta y \approx 1$ km) von SEIFERT et al. (2001) beibehalten.

Berechnungen

Die Durchführung von Langzeit(-Seegangs)simulationen benötigt relativ viel Rechenzeit. Die Erfahrung zeigt, dass der Betrieb der Modelle und der entsprechenden Rechner nicht immer vollkommen störungsfrei verläuft, daher ist es sinnvoll während der Berechnung Zwischenergebnisse abzuspeichern, um im Falle eines Rechnerausfalls die Simulation weiterlaufen lassen zu können. Das numerische Modell SWAN bietet einen solchen Mechanismus selbst nicht an. Um die Langzeit-Seegangssimulationen trotzdem durchführen zu können wurde ein System erarbeitet, dass die Unterbrechung und Wiederaufnahme des Simulationslaufs ermöglicht und dabei den Anfangszustand der Berechnung sichert. Die Ausführung der Simulation wurde weitgehend optimiert.

Die reine Rechenzeit von WODLM betrug etwa 9 Monate (2 x XEON, 3 Ghz-Prozessor).

Um die bei der Simulation entstehenden Datenmengen handhabbar zu machen, wurde ein Datenspeichersystem auf Basis des NetCDF-Formates (network Common Data Form) entwickelt. Dadurch konnten signifikante Seegangparameter für alle Berechnungspunkte im Simulationsgebiet gespeichert werden und stehen für die weitere Auswertung zur Verfügung.

Verifikation

Das WODLM-Modell wurde vergleichsweise umfangreich validiert. Dabei wurden die berechneten Seegangsdaten mit an verschiedenen Stationen gemessenen Seegangsdaten verglichen. Um die berechneten und gemessenen Daten besser vergleichen zu können wurde dafür statt einer Zeitreihendarstellung eine Darstellung in einem XY-Diagramm gewählt. Dabei wurden die gemessenen Werte auf der Abszisse und der berechnete Wert auf der Ordinate aufgetragen.

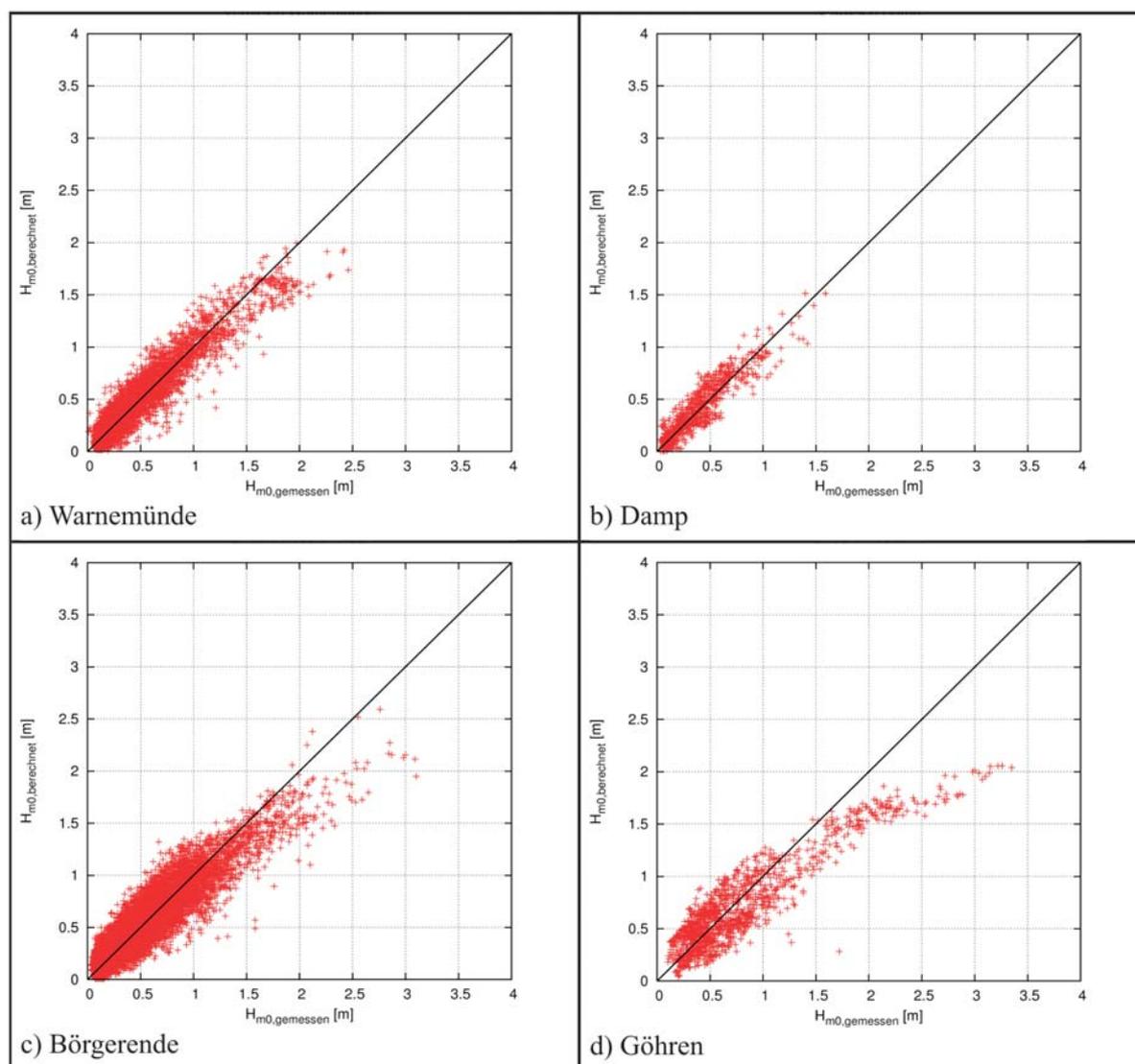


Abb. 4: Vergleich gemessener und mit dem WODLM-Modell berechneter Wellenhöhen H_{m0}

Abb. 4 zeigt dies für die Stationen Warnemünde, Damp, Börgerende und Göhren am Beispiel der Wellenhöhen H_{m0} . Es wird deutlich, dass die Genauigkeit der Simulationsergebnisse für die verschiedenen Lokationen unterschiedlich ist. In Warnemünde, Damp und Börgerende werden die gemessenen Wellenhöhen sehr gut wiedergegeben. Einzelne Ausreißer im Bereich höherer Wellen sind auf Abweichungen im Windfeld zurückzuführen.

An der Lokation Börgerende kommt ein Abschattungseffekt hinzu, der bei Winden aus West auftritt. Dieser Abschattungseffekt wird in der Simulation überschätzt, da die räumliche Diskretisierung der realen Bathymetrie im Bereich der Messlokation zu großer Landabdeckung geführt hat. Die für die spätere Berechnung der Bemessungswerte ausgewählten Punkte haben einen größeren Abstand zur Küste, daher hat diese Überschätzung keinen wesentlichen Einfluss auf die Bemessungswerte.

An der Station Göhren werden hohe Wellen mit dem Modell WODLM systematisch unterschätzt. Grund dafür ist die Lage der Station in der relativen Nähe des Randes des Simulationsgebietes. Dieses Ergebnis überraschte, da Voruntersuchungen in einem stationären Modell auch für den Bereich Usedom und Rügen keinerlei systematische Unterschätzung der Wellenhöhen aufwiesen. Beim Aufbau der SOHIP-Simulation wird auf dieses Problem eingegangen und der Berechnungsrand entsprechend weiter in Richtung Osten verlegt.

Die berechneten und gemessenen Wellenperioden wurden ebenfalls an mehreren Stationen miteinander verglichen, auf eine Darstellung wird hier verzichtet. Die berechneten Wellenperioden sind durchweg zu kurz. Dies gilt auch für die weiteren betrachteten Lokationen. Das Problem ist auch von anderen SWAN-Simulationen bekannt (vgl. auch SCHLAMKOW u. FRÖHLE, 2008 sowie FRÖHLE u. SCHLAMKOW, 2004) und konnte im Rahmen der Projektbearbeitung nicht komplett gelöst werden. Die Wellenperioden die als Grundlage für die Bemessungsparameter benutzt werden sollen, werden auf anderem Wege aus der direkten Korrelation mittels Seegangsmessungen ermittelt.

Die gemessenen und mit WODLM berechneten Wellenanlaufriechungen zeigen eine gute Übereinstimmung, insbesondere wenn wiederum auf den Vergleich bei Wellenhöhen $H_{m0} < 0,5$ m verzichtet wird. Auf die Darstellung dieses Vergleichs wird hier verzichtet.

3.3.2 S O H I P

Datengrundlage

Das SOHIP-Modell wurde auf Grundlage einer Bathymetrie der Ostsee (SEIFERT et. al, 2001) mit der Auflösung $\Delta x \approx \Delta y \approx 2$ km aufgebaut. Die Bathymetrie ist in Abb. 5 dargestellt. Um den Seegang an der Ostküste Rügens besser als im WODLM-Modell abbilden zu können wurde das Simulationsgebiet nach Osten erweitert, damit sichergestellt ist, dass der Einfluss des offenen Randes auf das Gebiet um die Ostküste Rügens gering bleibt. Hierzu wurden Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Fetchlängen auf die Wellenhöhen (mittels des Seegangsvorhersageverfahrens nach SPM84) durchgeführt. Es wurde ermittelt, dass der Einfluss der Fetchlänge auf die Wellenhöhen ab etwa 500 km vernachlässigbar ist. Der Abstand der Ostküste Rügens zum Rand des Simulationsgebietes wurde auf etwa 550 km festgelegt.

Die Windfelder die von der GKSS im Rahmen des HIPOCAS-Projektes berechnet wurden, weisen bei einer zeitlichen Auflösung von $\Delta t = 1$ h eine räumliche Auflösung von etwa $\Delta x \approx 33$ km und $\Delta y \approx 56$ km auf und sind über einen Zeitraum von 1948 bis 2006 verfügbar.

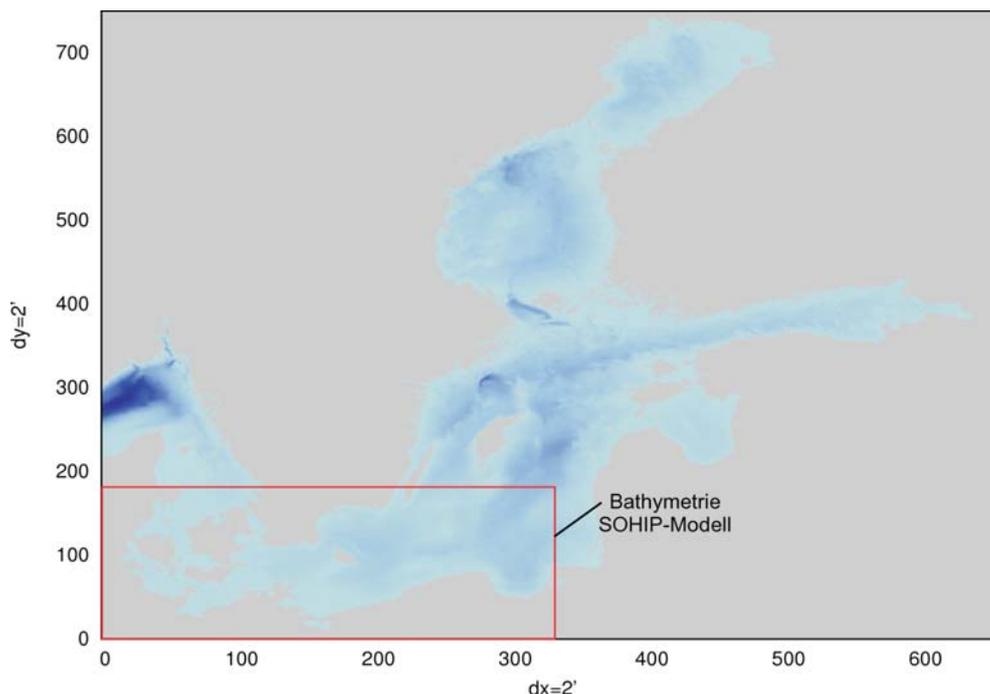


Abb. 5: Bathymetrie der Ostsee und Ausschnitt des numerischen Modells SOHIP

Die Daten wurden von der GKSS in Form von netCDF-Dateien geliefert. Die Daten umfassen ein Gebiet von $9,5^{\circ}\text{W}$ bis 22°W und $53,5^{\circ}\text{N}$ bis 58°N . Zur Integration in das Seegangmodell wurden die Daten in ein von SWAN lesbares Format umgewandelt.

Simulationsparameter

Das SOHIP-Modell wurde mit einer räumlichen Auflösung von $\Delta x = 0,033^{\circ}$ und $\Delta y = 0,0166^{\circ}$ aufgebaut. Das entspricht etwa $\Delta x = 3,7$ km und $\Delta y = 1$ km (bei 55°N) und der Auflösung der verwendeten Bathymetrie. Wie bei WODLM wurde festgelegt, dass Zeitschritte von $\Delta t = 1$ h ausreichend sind, wenn dabei wenigstens 20 Iterationen zugelassen werden. Die Seegangsspektren werden mit 41 Frequenzen von $f_{\min} = 0,02$ Hz bis $f_{\max} = 1$ Hz über $\Delta\Theta = 10^{\circ}$ aufgelöst.

Es wurde die Berücksichtigung sämtlicher relevanter physikalischer Effekte (Schaumkronenbrechen, tiefeninduziertes Wellenbrechen, Bodenreibung, Triad und Quadruplet Wellen-Wellen-Interaktion) im Modell aktiviert.

Die Modellergebnisse wurden als Felder der wichtigsten Seegangparameter (H_{m0} , T_{01} , T_{02} , T_p , Θ_M) für alle Punkte des Berechnungsgebietes ausgegeben. Zusätzlich wurden die vollen zweidimensionalen Seegangsspektren an ausgewählten Punkten ausgegeben.

Berechnungen

Die Berechnung der Langzeit(-Seegangs)simulationen über einen Zeitraum von 58 Jahren konnten nicht mehr in einer einzelnen Simulation durchgeführt werden. Stattdessen wurde für jedes Jahr eine eigene Simulation angelegt. Um den Anfangszustand des vorherigen Jahres so gut wie möglich wiederzugeben, wurde ein Zeitraum von 10 Tagen zum Be-

ginn jeder Simulation überlappend gerechnet. Die 10-tägige zeitliche Überlappung wurde in der Annahme gewählt, dass Seegang über ein Gebiet von etwa 800 km Länge (Ost-West-Ausdehnung des Simulationsgebietes) eine Ausbreitedauer von maximal 5 Tagen besitzt, wie theoretische Vorüberlegungen zeigen.

Die Berechnungen wurden auf mehreren Hochleistungscomputern durchgeführt. Es wurde auf Rechnern des Fachgebietes Küstenwasserbau, auf dem PC-Cluster des Rechenzentrums der Universität Rostock und auf einem Hochleistungsrechner des Marineamtes in Rostock gerechnet. Das Modell wurde für jedes der genannten Systeme angepasst und optimiert. Insgesamt wurde für die Simulationen ein Netto-Rechenzeitaufwand von ca. drei Jahren verbraucht.

Der größte Anteil der Berechnungen wurde im Marineamt Rostock durchgeführt. Dort wurde für die Projektbearbeitung zeitnah und unbürokratisch entsprechende Rechenleistung zur Verfügung gestellt, zudem wurde der Simulationsbetrieb auch durch die Mitarbeiter überwacht und unterstützt.

Die unkomprimierten Simulationsergebnisse benötigen ca. 3,5 Terabyte Speicherplatz. Durch den Einsatz geeigneter Kompressionsprogramme konnte der Speicherplatzbedarf auf 131 Gigabyte gesenkt werden. Zur Auswertung wurden die Berechnungsergebnisse ins NetCDF-Formate (network Common Data Form) überführt. Um das Datenvolumen zu reduzieren wurde hierbei ein Online-Kompressionsmodus verwendet (möglich ab NetCDF4).

Insgesamt wurde mit den Simulationsrechnungen ein Zeitraum von 58 Jahren (1948–2005) simuliert. Leider konnten die Simulationsrechnungen für die Jahre 2000, 2002 und 2003 nicht durchgeführt werden, da die gelieferten Windfelder in diesen Jahren Inkonsistenzen aufweisen. Abb. 6 gibt einen Überblick über die mit den SOHIP-Simulationen ermittelte Zeitserie der Wellenhöhen vor Warnemünde.

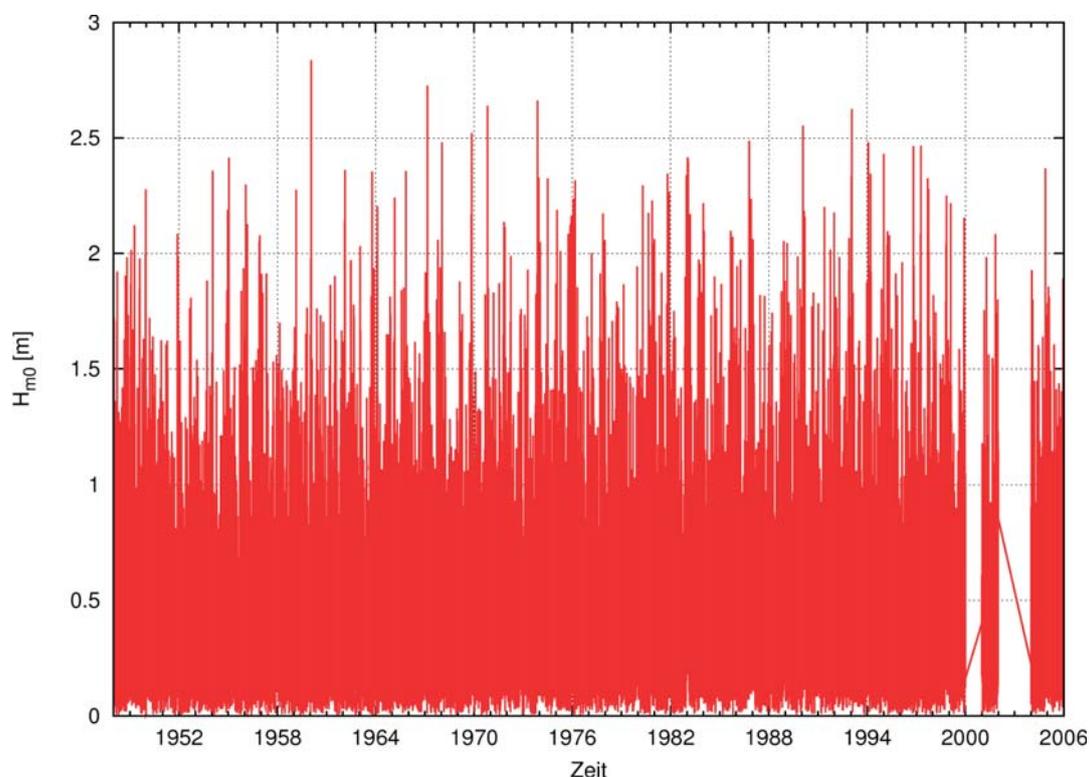


Abb. 6: Zeitserie der Wellenhöhen H_{m0} vor Warnemünde (SOHIP-Simulationen)

Validierung

Das SOHIP-Modell wurde methodisch analog zum WODLM-Modell validiert. Abbildung 7 zeigt XY-Diagramme für die Wellenhöhen an den Stationen Warnemünde, Schönhagen, Heiligenhafen und Göhren. Es wird deutlich, dass SOHIP die Wellenhöhen mit wesentlich größeren Abweichungen zu den gemessenen Wellenhöhen berechnet als das WODLM-Modell. Da der grundsätzliche Modellaufbau ähnlich zum WODLM-Modell ist, kann die Ursache für dieses Ergebnis nur mit Ungenauigkeiten im verwendeten Windfeld begründet liegen. Untersuchungen der GKSS, die beobachtete und gemessene Windgeschwindigkeiten vergleichen (Abb. 8), bestätigen die Streuungen für die Windgeschwindigkeiten. Die simulierten Seegangparameter zeigen an einzelnen Vergleichspunkten vergleichbare Streuungen. Im Rahmen der statistischen Analysen (Kap. 5) wird geprüft, inwiefern diese Streuungen einen Einfluss auf die daraus abgeleiteten Eingangsdaten für die Bemessung von Küstenschutzanlagen haben.

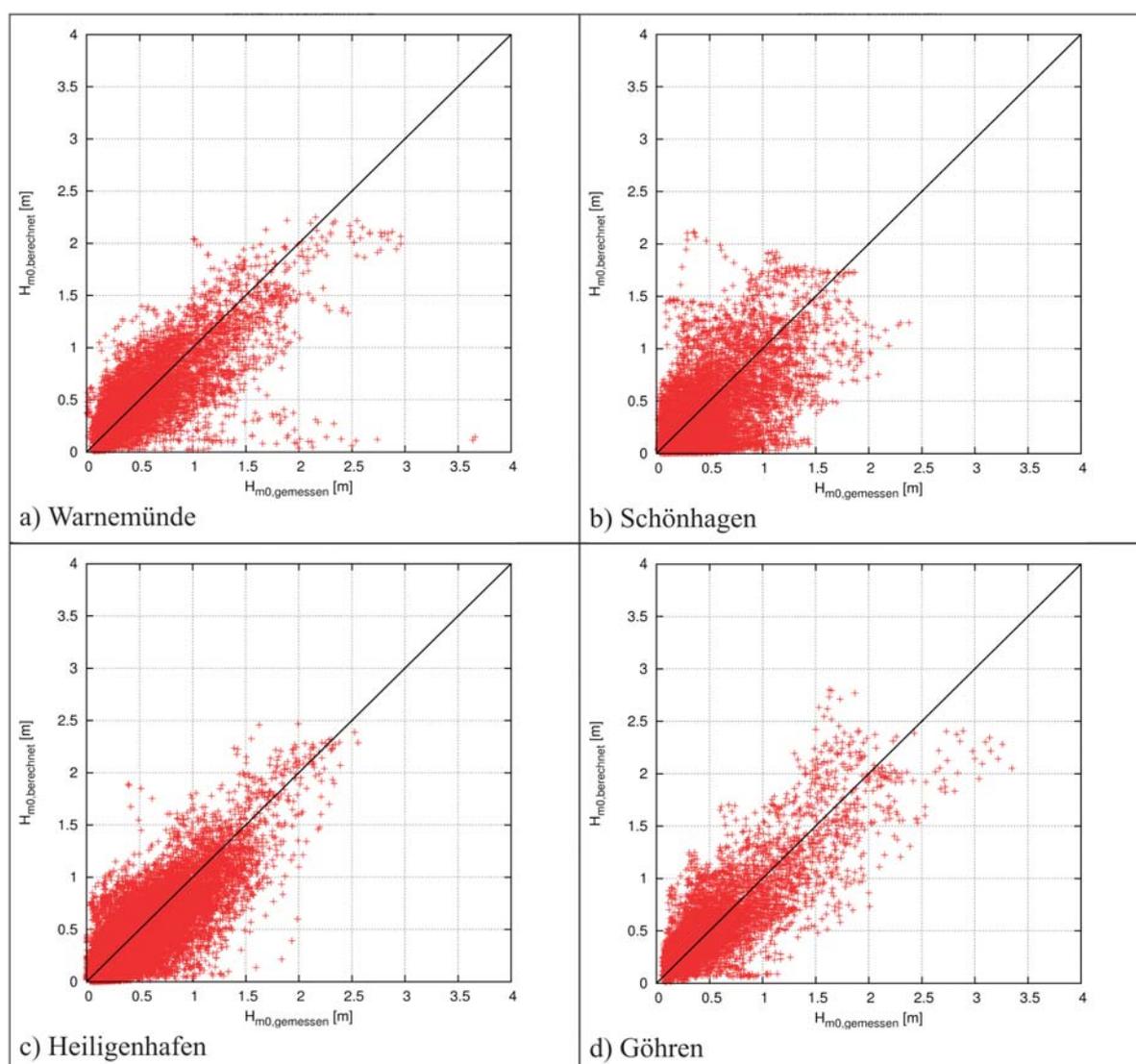


Abb. 7: Vergleich gemessener und mit dem SOHIP-Modell berechneter Wellenhöhen H_{m0} für ausgewählte Stationen in der Ostsee

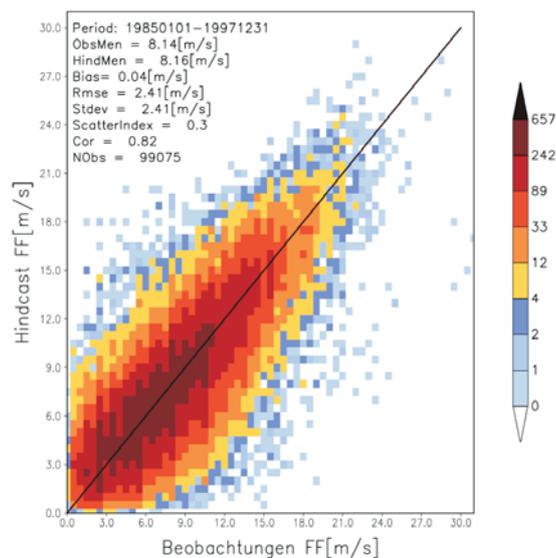


Abb. 8: Beobachtete und modellierte Windgeschwindigkeiten an der Lokation K13 (in der westl. Nordsee) aus: WEISSE et al., 2003

Abb. 7d zeigt, dass im SOHIP-Modell die Wellenhöhen im Bereich „östlich Rügen“ nicht mehr systematisch unterschätzt werden. Die Verlagerung des Modellrandes in Richtung Osten hat hier, wie erwartet, signifikante Verbesserungen bewirkt.

Für die Wellenperioden können für das SOHIP-Modell dieselben Aussagen wie für WODLM getroffen werden. Die berechneten Wellenperioden sind durchweg zu kurz. Die Wellenperioden die als Grundlage für die Bemessungsparameter benutzt werden sollen, werden auf anderem Wege aus der direkten Korrelation mittels Seegangsmessungen ermittelt.

Die Wellenanlaufrichtungen zeigen – wie auch die im WODLM-Modell – eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten Werten.

4. Definition von Bemessungsdaten

Wie bereits einleitend dargestellt, hängt die Festlegung von Bemessungsgrößen für Küstenschutzanlagen wesentlich von der Problemstellung, dem Bauwerk selbst aber auch von der erwarteten Lebenszeit des zu bemessenden Bauwerks ab. Den **einen** Bemessungswasserstand oder die **eine** Bemessungswellenhöhe als eine feste Größe in einem Küstenabschnitt – wie vielfach vom Küstenwasserbauer abgefordert – gibt es nicht.

Zudem werden vielfach unterschiedliche Bemessungsansätze gewählt, aus denen weitere Randbedingungen für die Ableitung von Bemessungsgrößen resultieren. Da eine probabilistische Bemessung von Küstenschutzanlagen vielfach sehr komplex ist und eine Vielzahl von Eingangsgrößen – die oft nicht verfügbar sind – benötigt, wird die Bemessung im Allgemeinen deterministisch durchgeführt. Bei der deterministischen Bemessung wird versucht, die statistische Variabilität der hydrodynamischen Größen durch die Ermittlung der Verteilungsfunktion einzelner Größen zu berücksichtigen. Vielfach ist von 50-jährlichen (mittlere Eintrittswahrscheinlichkeit $p = 0,02$) oder 100-jährlichen (mittlere Eintrittswahrscheinlichkeit $p = 0,01$) Ereignissen die Rede. Es ist festzuhalten, dass diese Größen im statistischen Mittel innerhalb des Wiederholzeitraums einmal auftreten.

Bei realen Abfolgen natürlicher Größen ist es durchaus nicht unmöglich, dass auch deutlich extremere Ereignisse innerhalb der Lebenszeit eines Bauwerks auftreten. Beispielsweise tritt ein Ereignis mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von $p = 0,001$ (1000-jährliches Ereignis) mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 5 % innerhalb der nächsten 50 Jahre mindestens einmal ein.

Vielfach ist es daher zweckmäßig, die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses für einen vorgegebenen Nutzungszeitraum vorzugeben bzw. zu ermitteln (vgl. Abb. 9). Das gewählte Sicherheitsniveau hängt dabei von den zu schützenden Gütern ab.

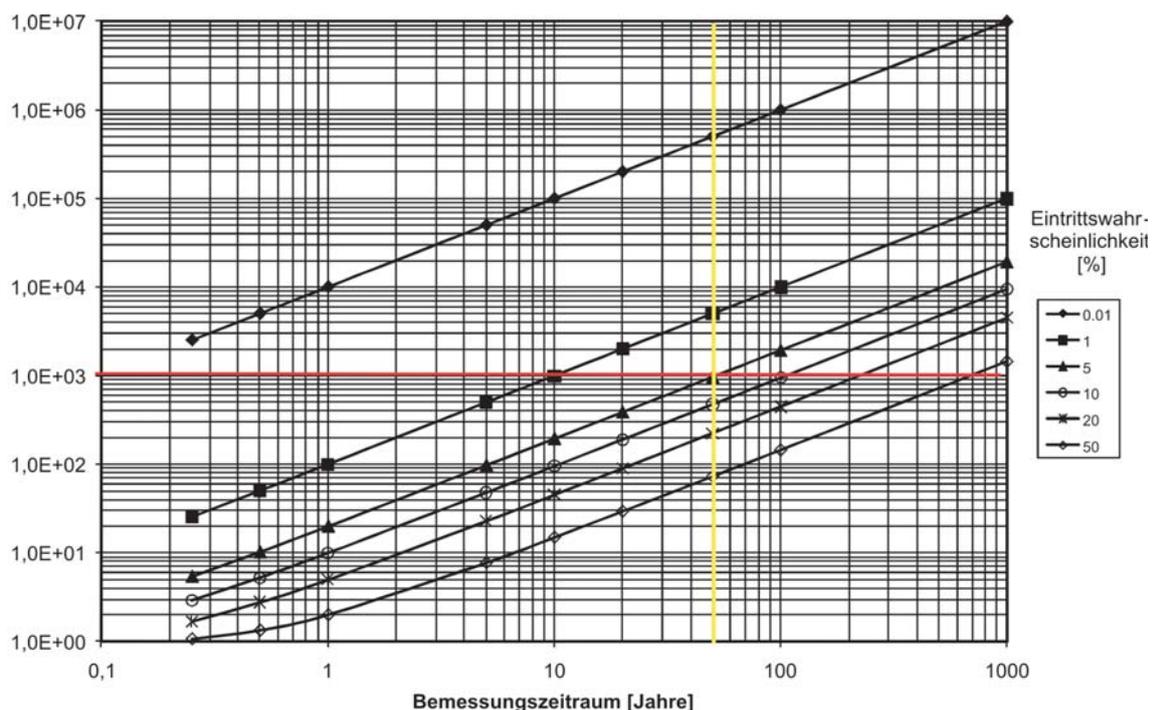


Abb. 9: Statistischer Zusammenhang zwischen Bemessungszeitraum, mittlerem Wiederkehrintervall und Eintrittswahrscheinlichkeit

Für die Bemessung von Küstenschutzanlagen werden in Abhängigkeit von der Fragestellung folgende Eingangsgrößen benötigt:

Grundsätzlich werden für die funktionelle Bemessung von Anlagen zur Beeinflussung des Sedimenttransports mit dem Ziel des Erhalts der Küstenlinie benötigt:

- langfristige mittlere Verteilung von Seegang und Seegangparametern in Kombination mit zugehörigen Wasserständen und deren Eintrittshäufigkeiten

Für die konstruktive Bemessung von Anlagen:

Probabilistische Bemessung

- Extremwertverteilung hydrodynamischer Größen mit zugehöriger Verteilungsfunktion sowie den jeweiligen Konfidenzintervallen
- Kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten statistisch abhängiger hydrodynamischer Größen
- Dauer und Verlauf extremer Ereignisse (ggf. kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten)
- Statistische Verteilung des zeitlichen Abstands zwischen Extremereignissen
- Ansätze zur Verknüpfung statistisch unabhängiger Größen

Deterministische Bemessung (auf Grundlage statistischer Bewertung der Eingangsgrößen):

- Extreme hydrodynamische Einzelereignisse mit definierter Eintrittswahrscheinlichkeit (z.B. Wasserstand mit einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit von 100 Jahren – 100-jährlicher Wasserstand)
- zugehörige statistisch abhängige Größen

Hierbei hängt die gewählte Eintrittswahrscheinlichkeit von den zu schützenden Gütern bzw. von der erforderlichen Sicherheit ab.

Deterministische Bemessung (allgemein):

- Beobachtete oder abgeschätzte Maximalwerte (z.B. Wasserstand 1872)
- Physikalisch begrenzte Maximalwerte (z.B. maximale wassertiefenbegrenzte Wellenhöhe mit ungünstiger Wellenperiode aus ungünstiger Anlaufichtung)

In den folgenden Kapiteln wird die Ableitung der o.g. Größen als Grundlage für die Bemessung beispielhaft für den Küstenabschnitt Warnemünde dargestellt.

5. Statistische Analyse der Eingangsdaten

Um Bemessungswerte für den Bau und die Bemessung von Küstenschutzanlagen zu definieren, müssen mit den in Kap. 3 beschriebenen Eingangsdaten umfangreiche statistische Berechnungen durchgeführt werden. Der dabei verwendete Forschungsansatz unterscheidet sich von der im Teilvorhaben MUSE Ostsee entwickelten Methode, die historische und modellierte Extremwasserstände einbezieht (MUDERSBACH, CH. u. JENSEN, J., 2009). Exemplarisch wurden die Berechnungen im Rahmen des Forschungsvorhabens SEBOK B für die Lokation Warnemünde durchgeführt. Diese Auswahl erfolgte, weil die Datenlage für Warnemünde vergleichsweise sehr gut ist. Grundsätzlich können die beschriebenen Untersuchungen in allen Küstenabschnitten durchgeführt werden (URCE, 2009).

Für die Wasserstände liegen Daten über einen Zeitraum von 49 Jahren (1957–2006) als stündliche Werte vor. Extremwerte liegen grundsätzlich sogar über einen Zeitraum von 383 Jahren (1625–2008) vor, allerdings gibt es in dieser Zeitreihe erhebliche Datenlücken. Zwischen 1625 und etwa 1872 gibt es keinerlei Informationen zu den Wasserständen.

Der Umfang der analysierten Seegangdaten ist ebenfalls vergleichsweise groß. Neben den sehr gut abgesicherten Berechnungen die mittels Wind-Wellen-Korrelationsverfahren berechnet wurden, sind die Daten des WODLM und SOHIP-Modells für Warnemünde verfügbar. Die mittels Wind-Wellen-Korrelation berechneten Seegangdaten sind über einen Zeitraum von 53 Jahren (1954–2007) verfügbar. Die SOHIP-Simulationen sind für einen Zeitraum von 55 Jahren verfügbar (vgl. Kap. 3.3.2).

Wasserstände, Seegang und Dauer der Extremereignisse wurden zunächst einzeln untersucht. Anschließend wurden die kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserstand und Wellenhöhe berechnet.

5.1 Wasserstand

Extremwertstatistische Analysen können grundsätzlich mit unterschiedlichen Stichproben durchgeführt werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden zwei Stichproben aus den verfügbaren Daten für die Analysen verwendet:

- Maximalwerte mit definiertem Zeitabstand (Jahresmaxima, Monatsmaxima, etc.)
- Maximalwerte über einem vorher festgelegten Grenzwert (Peak over Threshold Values)

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden beide Stichproben verwendet und die Ergebnisse verglichen. Dabei wurden unterschiedliche Extremwertfunktionen (Weibullverteilung, Log-Normal-Verteilung, Gumbelverteilung, Generalisierte Extremwertverteilung, Generalisierte Paretoverteilung) an die Stichproben angepasst und damit Extremwerte berechnet und bewertet. Aus Platzgründen kann hier nur die Anpassung einer Stichprobe/Extremwertfunktion dargestellt werden. Hierzu wurde die im Abschlussbericht des Vorhabens empfohlene Generalisierte Extremwertverteilung an die Peak over Threshold (POT)-Werte von 1872 bis 2008 ausgewählt.

Für die Untersuchungen der POT-Werte wurden die amtlichen Extremwerte des BSH benutzt. Diese Extremwerte liegen nicht nur ab 1957 vor (wie die stündlichen Wasserstandsaufzeichnungen), sondern beinhalten auch die Werte historischer Sturmfluten, u.a. auch die Extremsturmflut von 1872 (2,70 m über NMW). Der höchste Wert der Datenreihe wird durch die Sturmflut vom 10. 02. 1625 mit 2,82 m über NN markiert. Der Wert von 1625 wurde für die weiteren Auswertungen ausgeschlossen, da zwischen 1625 und 1872 keine weiteren Extremwerte aufgezeichnet wurden und dieser Einzelwert somit die Ergebnisse zu stark beeinflusst hätte.

Um die Daten trendbereinigt auszuwerten, wurden die Daten mit dem säkularen Meeresspiegelanstieg beschickt. Dabei wurde ein Wert von 1,2 mm/Jahr verwendet (nach DIETRICH u. LIEBSCH, 2000).

Als Grenzwert für die Auswahl der Stichprobe wurde ein Wert von 1,4 m über NN (entspricht 6,4 m PN) verwendet. Der Wert von 6,4 m PN wurde nach Vergleichsrechnungen als günstigster Wert ermittelt. Die Ergebnisse mit benachbarten Grenzwerten (6,3 m ... 6,5 m) sind vergleichbar, und die Maximum-Likelihood-Anpassung liefert noch stabile Ergebnisse. Für den Zeitraum 1872 bis 2008 wurde aus den Daten des BSH mit einem Grenzwert von 6,4 m PN eine Stichprobe von 14 Werten (extreme Hochwasserereignisse) ausgewählt.

Mehrere unterschiedliche Extremwertverteilungen (Weibullverteilung, Log-Normal-Verteilung, Gumbelverteilung, Generalisierte Extremwertverteilung, Generalisierte Paretoverteilung) wurden mittels der Maximum-Likelihood-Methode an die Stichprobe der POT-Werte angepasst.

Da die einfachen Extremwertverteilungen (Weibull-, Log-Normal-, Gumbelverteilung) in Voruntersuchungen durchgängig schlechtere Anpassungen als die generalisierten Extremwertverteilungen aufweisen, wurden die weiteren Auswertungen ausschließlich mit den generalisierten Extremwertverteilungen GEV und GPD durchgeführt.

Im Schrifttum (z.B. SCHÖLZEL, 2009) werden mittels Peak over Threshold gewonnene Stichproben i.a. mit der generalisierten Paretoverteilung (GPD) beschrieben. Von SCHÖLZEL wird die generalisierte Extremwertverteilung (GEV) prinzipiell eher für „Block-maxima“-Stichproben, d.h. Maximalwerte in bestimmten Zeiträumen (z.B. Jahresmaxima) vorgeschlagen. Im Forschungsvorhaben wurden zunächst immer beide generalisierte Verteilungen (GEV und GPD) untersucht. Aufgrund der besseren Anpassungsgüte werden in diesem Zusammenhang lediglich die Anpassungen mit der GEV dargestellt (Abb. 10).

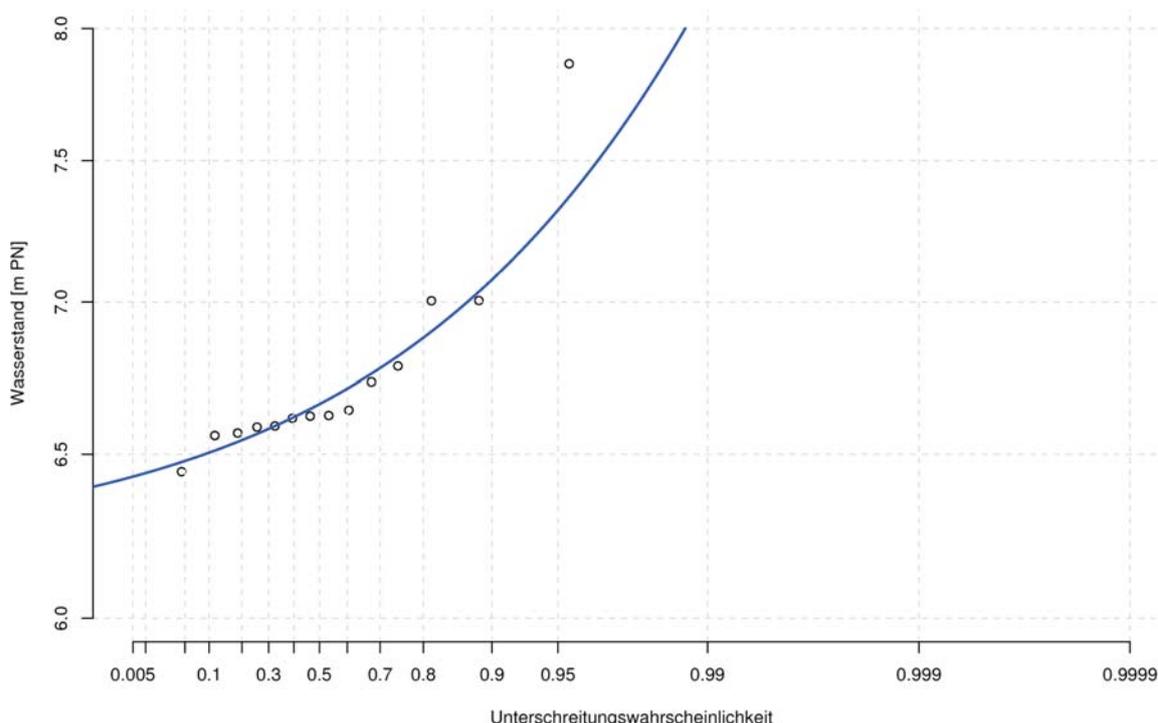


Abb. 10: Anpassung der generalisierten Extremwertverteilung an die Stichprobe der Peak over Threshold-Werte Wasserstände von 1872 bis 2008 in Warnemünde (Plotting Positionen: GOEL and DE, 1993)

Tab. 1 zeigt die für ausgewählte Wiederkehrintervalle berechneten Unterschreitungswahrscheinlichkeiten und zugehörige Extremwasserstände. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten wurden dabei nach dem Konzept von MISES mittels folgender Formel berechnet:

$$P_u = 1 - \frac{B}{n \cdot W} \quad \text{mit}$$

- P_u Unterschreitungswahrscheinlichkeit
- B Beobachtungszeitraum der Stichprobe
- W Wiederholungszeitraum
- N Gesamtzahl der Werte der Stichprobe

Tab. 1: Wasserstände mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten vor Warnemünde (Unterschreitungswahrscheinlichkeiten) Lokation Warnemünde, Datenbasis POT 1872–2008

Unterschreitungswahrscheinlichkeit p_u	Wiederkehrintervall [Jahre]	Wasserstand [m PN]
0,043	10	6,47
0,809	50	6,89
0,904	100	7,09
0,962	250	7,43
0,98	500	7,76
0,990	1000	8,18

Es ist zu beachten, dass Extrapolationen auf sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeiten (größer als der dreifache Zeitraum der Datenerhebung) im Allgemeinen als unzulässig angesehen werden, auch wenn Untersuchungen von FRÖHLE (2000) etwas anderes andeuten und entsprechende Unsicherheiten eher in den Unsicherheiten bei der Bestimmung der Verteilungsfunktionen sehen. Die mutmaßlich unzulässigen Extrapolationswerte sind in Tab. 1 grau hinterlegt.

Die Berechnung der Extremwerte mit unterschiedlichen Stichproben/Verteilungsfunktionen ergab erwartungsgemäß auch unterschiedliche Extremwasserstände. Als Grundlage für die Auswahl von Bemessungsgrößen wird die Verwendung der Extremwerte auf Basis der Stichprobe aller „Peak over Threshold-Werte“ ab 1872 (POT 1872–2008) vorgeschlagen. Als Verteilungsfunktion wird die Generalisierte Extremwertverteilung (GEV) empfohlen. Die gewählte Stichprobe enthält den Extremwert von 1872, der Grundlage für die derzeitige Bemessungspraxis ist. Bei den dargestellten Analysen ergab sich für den Wasserstand von 1872 ein mittleres Wiederkehrintervall von etwa 500 Jahren (vgl. Tab. 1).

5.2 Dauer

Die Belastung von Deichen und Dünen wird neben dem höchsten Wasserstand insbesondere von der Dauer einer Sturmflut bestimmt, entsprechend wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens auch die Dauer von Sturmfluten extremwertstatistisch untersucht. Die Dauer einer Sturmflut wurde dabei als derjenige Zeitraum definiert, während dessen der Wasserstand höher als ein bestimmter Grenzwasserstand W_{Grenz} ist. W_{Grenz} wurde im Rahmen der Projektbearbeitung und in Absprache mit dem StAUN Rostock auf $W_{\text{Grenz}} = 6,0$ m PN festgelegt, da eine signifikante Belastung von Deichen und Dünen in der Ostsee erst für Wasserstände oberhalb dieses Wasserstands zu erwarten ist. Auf eine Darstellung der Ergebnisse dieser Untersuchungen wird hier aus Platzgründen verzichtet. Details hierzu finden sich im Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben (University of Rostock, Coastal Engineering, URCE 2009).

5.3 Seegang

Als Grundlage für die Berechnung extremer Seegangbedingungen sind für die Lokation Warnemünde mehrere Datensätze verfügbar, die sich somit auch für vergleichende Betrachtungen eignen:

- die mittels Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen berechneten Seegangparameter (1954–2006)
- die mit den SOHIP-Simulationen berechneten Seegangparameter (1948–2005) und
- die mit den WODLM-Simulationen berechneten Seegangparameter (10/1998–08/2006)

Im Zuge der Projektbearbeitung wurden extremwertstatistische Berechnungen vergleichend mit Stichproben aus allen drei Datensätzen durchgeführt. Für die Ableitung der Extremwerte wird die Verwendung einer Stichprobe der Jahresmaxima der mittels Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen berechneten Seegangparameter empfohlen. Die generalisierte Extremwertverteilung (GEV) wurde mittels der Maximum-Likelihood-Methode an diese Stichprobe angepasst (Abb. 11). Mit der angepassten GEV wurden darauf aufbauend Extremwerte berechnet (Tab. 2).

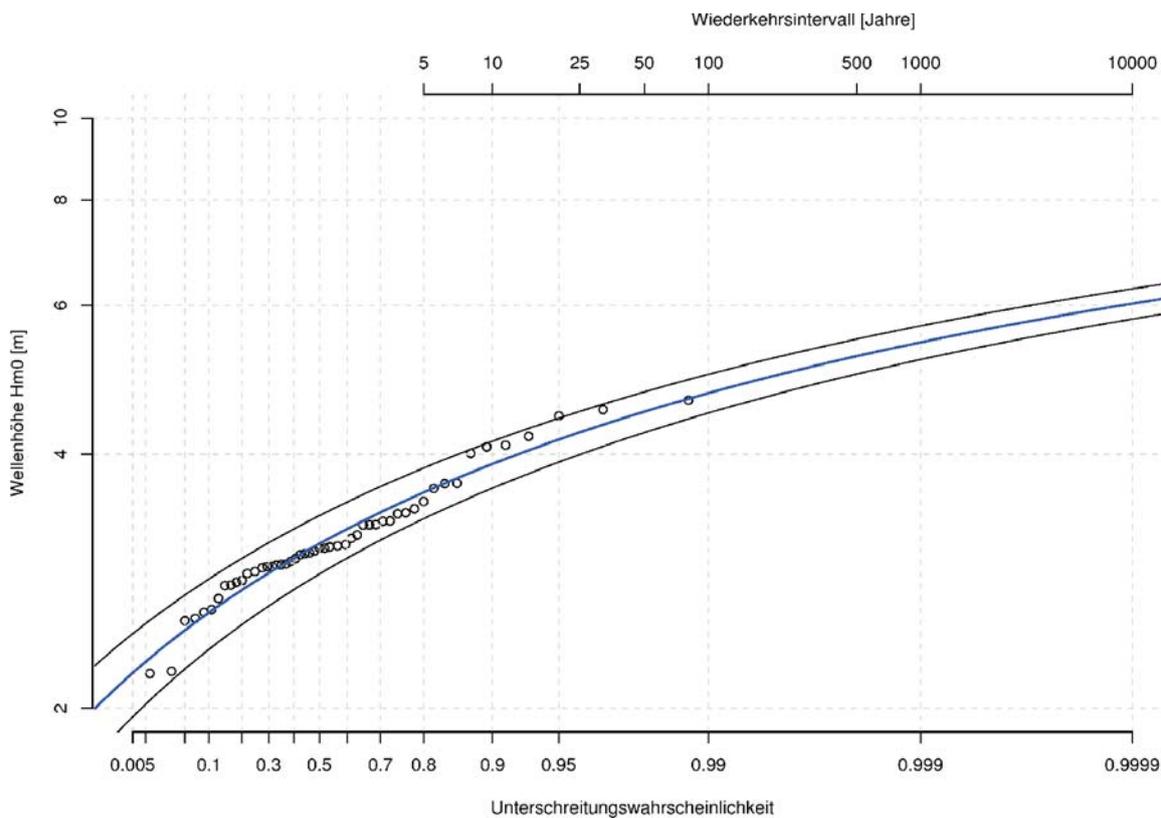


Abb. 11: Anpassung der generalisierten Extremwertverteilung an die Stichprobe der Jahresmaxima der Wellenhöhen vor Warnemünde (Plotting Positionen: GOEL and DE, 1993)

Tab. 2: Extremwerte der signifikanten Wellenhöhe vor Warnemünde (grau hinterlegt: Werte außerhalb des erlaubten Extrapolationszeitraums)

Wiederkehrintervall [Jahre]	Wellenhöhe H_{m0} [m]
2	3,13
5	3,60
10	3,89
50	4,49
100	4,72
250	5,02
500	5,22
1000	5,43

5.4 K o m b i n a t i o n W a s s e r s t a n d – W e l l e n h ö h e

Zur Berechnung von kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten Wasserstand–Wellenhöhe ist zunächst zu klären, ob im statistischen Sinne Abhängigkeiten zwischen den beiden Parametern existieren. Aus den Erfahrungen wird eine solche Abhängigkeit zunächst vermutet, da hohe Wasserstände genau wie hohe Wellen häufig von Starkwindereignissen (Stürmen) ausgelöst werden.

Es konnte gezeigt werden, dass in Warnemünde hohe Wasserstände in Kombination mit praktisch beliebigen Wellenhöhen auftreten. Umgekehrt treten hohe Wellenhöhen auch bei beliebigen Wasserständen auf. Die höchsten gemessenen Wasserstände traten in Kombination mit mittleren Wellenhöhen auf. Umgekehrt traten die höchsten Wellenhöhen in Kombination mit mittleren Wasserständen auf. Ein funktionaler oder annähernd funktionaler Zusammenhang (Korrelation) ist demnach nicht vorhanden.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass sich die statistischen Verteilungen der Wellenhöhen unter der Annahme extrem hoher, extrem niedriger oder mittlerer Wasserstände deutlich unterscheiden. Hieraus wird ein möglicher statistischer Zusammenhang abgeleitet, der aber unbekannt ist. Zudem konnte gezeigt werden, dass sich kein funktionaler oder annähernd funktionaler Zusammenhang (Korrelation) zwischen Wellenhöhen und Wasserständen in Bezug auf einzelne Windrichtungen ergibt.

Für Warnemünde müssen demnach Wasserstände und Wellenhöhen als **statistisch abhängig** Größen betrachtet werden. Dies ist auch für andere Lokationen an der deutschen Ostseeküste zu erwarten, ist jedoch im Einzelfall zu überprüfen. Details zu den durchgeführten vergleichenden Untersuchungen sind dem Abschlussbericht des Forschungsvorhabens (URCE 2009) zu entnehmen.

Um die kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wellenhöhe und Wasserstand zu berechnen, wurde die sog. „kombinierte univariate“ Methode verwendet. Dabei wurde als vorgegebene Zufallsvariable der Wasserstand genutzt. Die Wellenhöhen wurden der Wasserstandsverteilung mit einer Auflösung von $\Delta W_{st} = 0,5$ m zugeordnet. Die berechneten kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden für die graphische Darstellung in einem zweidimensionalen Gitter diskretisiert und für ausgewählte (kombinierte) Eintrittswahrscheinlichkeiten dargestellt. Aus Abb. 12 können die bivariaten Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen und Seegang für weiterführende Analysen ermittelt werden.

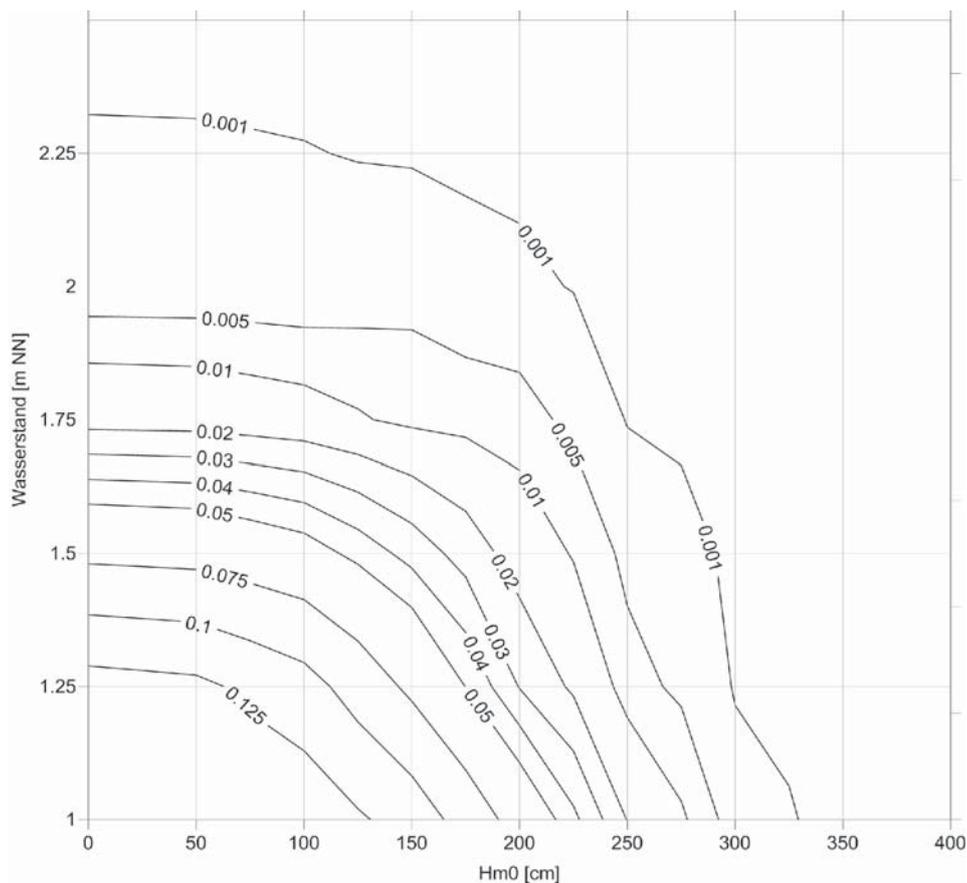


Abb. 12: Kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten Wasserstand/Wellenhöhe

6. D a n k s a g u n g

Das Vorhaben SEBOK B ist ein KFKI Forschungsvorhaben im Verbundprojekt MUSTOK und wurde gefördert vom BMBF (03KIS054). Die Autoren danken dem KFKI und dem BMBF für die finanzielle und administrative Unterstützung der Arbeiten. Daneben danken die Autoren auch allen am Projekt MUSTOK direkt und indirekt beteiligten Kollegen für die gute Zusammenarbeit und die produktiven fachlichen Diskussionen.

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

- BOOIJ, N.; HOLTHUIJSEN, L. and BATTJES, J.: "Ocean to Near-Shore Wave Modelling with SWAN", Delft University of Technology, 2001.
- CERC: U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (HRSG.): "Coastal Engineering Manual part II: Coastal Hydrodynamics". Coastal Engineering Research Center, Washington D.C., U.S.A., 2003.
- DIETRICH, R. und LIEBSCH, G.: Zur Variabilität des Meeresspiegels an der Küste von Mecklenburg-Vorpommern, Zeitschrift für geologische Wissenschaften, 2000, Bd. 28, Heft 6, 615–623.
- EAK 2002: Empfehlungen für Küstenschutzwerke, erschienen in: Die Küste, Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostseeküste, Heft 65, 2002.

- FRÖHLE, P.: Messung und statistische Analyse von Seegang als Eingangsgröße für den Entwurf und die Bemessung von Bauwerken des Küstenwasserbaus. In: Rostocker Berichte: Fachbereich Bauingenieurwesen. Heft 2. Rostock, 2000. – ISBN ISSN 1438-7638, 1–164.
- FRÖHLE, P. and FITTSCHEN, T.: Analysis of Short – Term Directional Wave Measurements with respect to Long – Term Statistical Assessment. In: COPEDEC V: Fifth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries. Cape Town, South Africa, 1999.
- FRÖHLE, P. and SCHLAMKOW, C.: High Resolution Numerical Wave Simulations Compared to Wave Measurements and Wave Hindcast Methods. In: Proc. Second Sino-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering: Beitrag. Hohai University, Nanjing, China, 2004.
- GOEL, N. K. and DE, M.: Development of unbiased plotting position formula for General Extreme Value distribution, in: Stochastic Hydrology and Hydraulics, Springer-Verlag, 1993.
- HOLTHUIJSEN, L. H.; BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HAAGSMA, IJ. G.; KIEFTENBURG, A. T. M. M.; KRIEZI, E. E. M. and ZIJLEMA: “SWAN Cycle III version 40.20 – User Manual”, <http://fluidmechanics.tudelft.nl/swan/>, 2003.
- MUDERSBACH, C. und JENSEN, J.: Extremstatistische Analyse von historischen, beobachteten und modellierten Wasserständen an der Deutschen Ostseeküste, 2009.
- SCHLAMKOW, C. and FRÖHLE, P.: Wave period forecasting and hindcasting: Investigations for the improvement of numerical models. In: Galappatti et al. ; PIANC (Hrsg.): PICANC-COPEDEC VII, Proceedings, 2008.
- SCHLAMKOW, C. und FRÖHLE, P.: Entwicklung einer Methode zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der Ostsee: SEBOK B. In: Hafentechnische Gesellschaft e.V.: Tagungsband HTG-Kongress 2007.
- SCHLAMKOW, C. und FRÖHLE, P.: Numerische Simulation von Seegang im Vergleich zu Seegangsmessungen und Vorhersageverfahren. In: HTG-Kongress: Tagungsband. Bremen, 2005.
- SCHLAMKOW, C. und FRÖHLE, P.: Gegenüberstellung ausgewählter Verfahren der Seegangsvorhersage. In: Institut für Bauingenieurwesen: Rostocker Berichte aus dem Institut für Bauingenieurwesen, Heft 13, Rostock, 2004.
- SCHLAMKOW, C.; FRÖHLE, P.; RADOMSKI, J.; KOHLHASE, S.; CHENG, H.-Y.; YEH, S.-P. and KAO, C.-C.: Numerical on-line modelling of sea state in coastal areas for engineering purposes. In: Kao, C.C.; ZANKE, U; YAN, Y.: Proc. Third Chinese-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering, Tainan, Taiwan, 2006.
- SCHÖLZEL, C.: Extremereignisse im Klimasystem; Vortrag; Meteorologisches Institut der Universität Bonn, 2009.
- SEIFFERT, T.; TAUBER, F. and KAYSER, B.: A High Resolution Spherical Grid Topography of the Baltic Sea – revised edition, Proceedings of the Baltic Sea Science Congress, 25–29, Stockholm, 2001.
- URCE 2009: Verbundprojekt MUSTOK, Vorhaben: SEBOK B: Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der Ostsee, Abschlussbericht, Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau, Rostock, 2009.
- WALLINGFORD, H. R.: The Joint Probability of Waves and Water Levels: JOIN-SEA, Report SR 537, November 1998, Re-issued May 2000.
- WEISSE, R. et al.: Wind- und Seegangsklimatologie 1958–2001 für die südliche Nordsee basierend auf Modellrechnungen, GKSS, 2003/10., 2003.
- WITTE, J.-O.; FRÖHLE, P.; FITTSCHEN, T. and KOHLHASE, S.: Assessment of Long-Term Directional Wave Conditions based on Nearshore Wind-Wave Correlations. In: MEDCOAST CONFERENCE: The International MEDCOAST Conference on Wind and Wave Climate of the Meditterean and the Black Sea. Antalya, Turkey, 1999.