

**KFKI-VERBUNDPROJEKT**  
Modellgestützte Untersuchungen zu extremen  
Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)

**TEILVORHABEN**  
Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer  
Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der Ostsee (SEBOK B)



ABSCHLUSSBERICHT 3.1

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

|                      |   |
|----------------------|---|
| Autoren              | Christian Schlamkow, Peter Fröhle   |
| Institut             | Universität Rostock<br>Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät<br>Institut für Umweltingenieurwesen<br>Fachgebiet Küstenwasserbau |
| Bearbeitungszeitraum | 01.07.2005 – 31.12.2008   |
| Fördernummer         | BMBF 03KIS054 / KFKI 86   |
| Datum                | 25.06.2009  |
| Version              | 2.0   |

Zitierhinweis: Schlamkow, Ch. und Fröhle, P. (2009): Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der Ostsee, Abschlussbericht 3.1 zum KFKI-Verbundprojekt *Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)*, Rostock

Das Verbundprojekt wurde gefördert von:



**Verbundprojekt: MUSTOK; Vorhaben: SEBOK-B: Entwicklung  
von Methoden zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer  
Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der  
Ostsee**

**Abschlussbericht**

**25. Juni 2009**

**Förderkennzeichen: 03KIS054**  
**Zuwendungsempfänger: Universität Rostock**  
**Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät**  
**Institut für Umweltingenieurwesen**  
**Fachgebiet Küstenwasserbau**  
**Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2005 bis 31.12.2008**

## Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| 1 Einführung und Zielsetzung.....           | 4  |
| 2 Forschungsansatz.....                     | 5  |
| 3 Ermittlung der Datengrundlage.....        | 6  |
| 3.1 Messdaten.....                          | 6  |
| 3.1.1 Wasserstände.....                     | 6  |
| 3.1.2 Wind.....                             | 8  |
| 3.1.3 Seegang.....                          | 8  |
| 3.2 Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen..... | 9  |
| 3.3 Langzeit-Seegangssimulationen.....      | 13 |
| 3.3.1 WODLM.....                            | 14 |
| 3.3.1.1 Datengrundlage.....                 | 14 |
| 3.3.1.2 Simulationsparameter.....           | 15 |
| 3.3.1.3 Durchgeführte Berechnungen.....     | 15 |
| 3.3.1.4 Verifikation.....                   | 15 |
| 3.3.2 SOHIP.....                            | 19 |
| 3.3.2.1 Datengrundlage.....                 | 20 |
| 3.3.2.2 Simulationsparameter.....           | 21 |
| 3.3.2.3 Durchgeführte Berechnungen.....     | 22 |
| 3.3.2.4 Verifikation.....                   | 23 |

# Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau

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

---

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4     | Definition von Bemessungsdaten.....   | 28 |
| 5     | Statistische Analyse der Eingangsdaten.....   | 31 |
| 5.1   | Wasserstand.....  | 31 |
| 5.1.1 | Extremwertstatistische Untersuchungen der Jahresmaxima der Wasserstände .....                   | 32 |
| 5.1.2 | Extremwertstatistische Untersuchungen der POT-Werte der Wasserstände...35                       |    |
| 5.1.3 | Diskussion der Ergebnisse.....  | 41 |
| 5.2   | Dauer.....  | 41 |
| 5.3   | Seegang.....  | 43 |
| 5.4   | Kombination Wasserstand – Wellenhöhe.....   | 49 |
| 5.5   | Kombination Wasserstand – Dauer.....  | 52 |
| 6     | Auswahl von Bemessungsgrößen für ausgewählte Bauwerke, Bemessungsverfahren und Schutzziele..... | 53 |
| 6.1   | Eingangsgrößen für übergeordnete Küstenabschnitte.....  | 53 |
| 6.2   | Deterministische Bemessung auf der Grundlage von Eintrittswahrscheinlichkeiten .....            | 55 |
| 6.3   | Probabilistische Bemessung.....   | 56 |
| 6.4   | Sedimenttransportuntersuchungen.....  | 56 |
| 6.5   | Transformation an das zu bemessende Bauwerk.....  | 57 |
| 7     | Vergleich der Bemessungsparameter die in SEBOK A bzw. SEBOK B ermittelt wurden.....             | 59 |
| 8     | Zusammenfassung.....  | 60 |
| 9     | Schrifttum.....   | 62 |

## 1 Einführung und Zielsetzung

Eingangsdaten für 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).

Hierbei wird der Schwerpunkt auf die Ermittlung der Bemessungsparameter und deren Genauigkeit bzw. Verlässlichkeit gelegt. Bemessungsansätze werden nur insofern behandelt, als sie Grundlage für die Ableitung von Bemessungsparametern darstellen. Die Weiterentwicklung von Bemessungsansätzen, die intensive theoretische Arbeiten hierzu und ggf. Untersuchungen in hydraulischen Modellen oder in der Natur erfordern würde, ist im Rahmen des skizzierten Vorhabens nicht geplant.

Das Vorhaben SEBOK B ist Teil des Forschungsvorhabens SEBOK, welches von der Universität Rostock gemeinsam mit der Universität Kiel, dem StAUN Rostock (Staatliches Amt für Umwelt und Natur, Rostock) und dem ALR Kiel (Amt für Ländliche Räume, Kiel, jetzt LKN Schleswig-Holstein) durchgeführt wird. Das Vorhabens SEBOK wird von den beteiligten Parteien aus administrativen Gründen in zwei Teile, SEBOK A und SEBOK B, geteilt.

Gemeinsam mit den Vorhaben MUSE Ostsee (Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmhochwasserständen mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Ostseeküste) und SEBOK A ist das Vorhaben SEBOK B in das übergeordnete Verbundforschungsprojekt MUESTOK (Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der deutschen Ostseeküste) Auf die Beschreibung der inhaltlichen Verzahnung der Teilvorhaben im Projekt MUESTOK wird in diesem Antrag verzichtet und auf den Leit Antrag der Universität Siegen verwiesen.

## 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 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 A wurde dazu die kombinierte univariate Methode benutzt. Abschließend wurden die statistischen Beziehungen zwischen der Dauer und dem Maximalwasserstand des jeweiligen Ereignisses ermittelt.

In Kap. 7 wurde die beschriebene Methodik Bemessungsgrößen wurden exemplarisch für die Lokation Warnemünde für die Bemessung eines hypothetischen Bauwerks angewendet. Die Daten können dann Grundlage für den Vergleich mit den Größen aus dem Projekt SEBOK A sein.

## 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, der bei weitem größte Anteil der Forschungsarbeit gewidmet werden. 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 hochdynamische Messdaten gesammelt, vereinheitlicht und verifiziert. Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden diese Arbeiten intensiviert und auf die für das Projekt verwendbaren Daten konzentriert. Die im Projektergebnis als Grundlage für die weiteren Untersuchungen vorhandene Datenbasis wird für die einzelnen Messgrößen im Folgenden detaillierter beschrieben.

#### 3.1.1 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..

In Abbildung 1 sind die im Projekt für die deutsche Ostseeküste verfügbaren Pegelstandorte zusammenfassend dargestellt. Die Messzeiträume für die einzelnen Pegel sind grün markiert. Längere Messausfälle und Zeiträume, für die keine Messungen vorhanden sind, sind in der Darstellung nicht markiert (d.h. weiß dargestellt). Kürzere Datenlücken (i.d.Regel kleiner als einen Tag) sind in der gewählten Auflösung nicht erkennbar.

Die längsten Zeitserien sind für die Pegelstandorte Warnemünde, Wismar und Greifswald mit einem zeitlichen Umfang von 51, 49 und 44 Jahren vorhanden.

Die Zeitreihen der Wasserstände der schwedischen Pegel Ringhals, Simrisham, Ystad, Kungsholmfort und Landsort wurden im Rahmen der Projektbearbeitung durch das BSH beschafft. Diese Daten wurden für die Projektbearbeitung nur für Vergleichszwecke verwendet.

# Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau

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

| Pegel            | 1950-1959 | 1960-1969 | 1970-1979 | 1980-1989 | 1990-1999 | 2000-2009 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| LT Kalkgrund     |           |           |           |           |           |           |
| Flensburg        |           |           |           |           |           |           |
| Langballigau     |           |           |           |           |           |           |
| SP Schleimünde   |           |           |           |           |           |           |
| Kappeln          |           |           |           |           |           |           |
| Schleswig        |           |           |           |           |           |           |
| Eckernförde      |           |           |           |           |           |           |
| Kiel-Holtenau    |           |           |           |           |           |           |
| LT Kiel          |           |           |           |           |           |           |
| Heiligenhafen    |           |           |           |           |           |           |
| Marienleuchte    |           |           |           |           |           |           |
| Neustadt         |           |           |           |           |           |           |
| Lübeck           |           |           |           |           |           |           |
| Travemünde       |           |           |           |           |           |           |
| Dassow           |           |           |           |           |           |           |
| Boltenhagen      |           |           |           |           |           |           |
| Timmendorf       |           |           |           |           |           |           |
| Wismar           |           |           |           |           |           |           |
| Rerik            |           |           |           |           |           |           |
| Warnemünde (IMK) |           |           |           |           |           |           |
| Warnemünde (WSA) |           |           |           |           |           |           |
| Rostock          |           |           |           |           |           |           |
| Ahrenshoop       |           |           |           |           |           |           |
| Zingst (IMK)     |           |           |           |           |           |           |
| Zingst           |           |           |           |           |           |           |
| Zingst/Bodden    |           |           |           |           |           |           |
| Althagen         |           |           |           |           |           |           |
| Dierhagen        |           |           |           |           |           |           |
| Bodstedt         |           |           |           |           |           |           |
| Barth            |           |           |           |           |           |           |
| Barhöft          |           |           |           |           |           |           |
| Stralsund        |           |           |           |           |           |           |
| Neuendorf/Ostsee |           |           |           |           |           |           |
| Neuendorf/Bodden |           |           |           |           |           |           |
| Kloster          |           |           |           |           |           |           |
| Schaprode        |           |           |           |           |           |           |
| Wittower Fähre   |           |           |           |           |           |           |
| Ralswiek         |           |           |           |           |           |           |
| Varnkevitze      |           |           |           |           |           |           |
| Saßnitz          |           |           |           |           |           |           |
| Göhren           |           |           |           |           |           |           |
| Thiessow         |           |           |           |           |           |           |
| Lauterbach       |           |           |           |           |           |           |
| Stahlbrode       |           |           |           |           |           |           |
| Glewitz          |           |           |           |           |           |           |
| Greifswald       |           |           |           |           |           |           |
| Lubmin           |           |           |           |           |           |           |
| Ruden            |           |           |           |           |           |           |
| Greifswalder Oie |           |           |           |           |           |           |
| Peenemünde       |           |           |           |           |           |           |
| Karlshagen       |           |           |           |           |           |           |
| Wolgast          |           |           |           |           |           |           |
| Koserow (IMK)    |           |           |           |           |           |           |
| Koserow (WSA)    |           |           |           |           |           |           |
| Stagnieß         |           |           |           |           |           |           |
| Kamminke (IMK)   |           |           |           |           |           |           |
| Kamminke         |           |           |           |           |           |           |
| Karnin           |           |           |           |           |           |           |
| Mönkebude        |           |           |           |           |           |           |
| Ückeremünde      |           |           |           |           |           |           |
| Ringhals         |           |           |           |           |           |           |
| Simrishamn       |           |           |           |           |           |           |
| Ystad            | < ab 1886 |           |           |           |           |           |
| Kungsholmsfort   | < ab 1886 |           |           |           |           |           |
| Landsort         | < ab 1886 |           |           |           |           |           |

Abbildung 1: Zeitlicher Umfang der digital verfügbaren Pegeldata

# Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau

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

## 3.1.2 Wind

Die im Projekt verfügbaren Winddaten (Windgeschwindigkeit (U) und Windrichtung ( $\Delta\Theta$ )) sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Messungen wurden/werden vom StAUN (IMK-Messnetz) und vom Deutschen Wetterdienst (DWD) durchgeführt. Besonders lange Zeitserien sind für die Lokationen Boltenhagen, Arkona und Ückermünde sowie insbesondere an der Station Warnemünde (>50 Jahre) vorhanden.

| Lokation                | 1950-1959 | 1960-1969 | 1970-1979 | 1980-1989 | 1990-1999 | 2000-2009 |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Glücksburg-Meierwik     |           |           | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Flensburg (Schäferhaus) |           |           |           | ■         | ■         | ■         |
| Olpenitz                |           |           | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Kiel-Holtenau           |           |           | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Kalifornien             |           |           |           | ■         | ■         | ■         |
| Boltenhagen (IMK)       |           |           |           |           | ■         | ■         |
| Boltenhagen (DWD)       |           |           | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Rerik (IMK)             |           |           |           |           | ■         | ■         |
| Bastorf-Kägsdorf        |           |           |           |           | ■         | ■         |
| Warnemünde (IMK)        |           |           |           |           | ■         | ■         |
| Rostock-Wmnde           | ■         | ■         | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Dierhagen (IMK)         |           |           |           |           | ■         | ■         |
| Ahrenshoop (IMK)        |           |           |           |           | ■         | ■         |
| Darßer Ort              |           |           |           |           | ■         | ■         |
| Zingst (IMK)            |           |           |           |           | ■         | ■         |
| Barth                   |           |           |           | ■         | ■         | ■         |
| Hiddensee-Vitte         |           | ■         | ■         | ■         |           |           |
| Schaprode (IMK)         |           |           |           |           | ■         | ■         |
| Varkevitz (IMK)         |           |           |           |           | ■         | ■         |
| Arkona                  |           |           | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Göhren (IMK)            |           |           |           |           | ■         | ■         |
| Putbus                  |           |           |           | ■         | ■         | ■         |
| Greifswald              |           |           |           | ■         | ■         | ■         |
| Greifswald-Wiek         |           | ■         | ■         | ■         |           |           |
| Lubmin (IMK)            |           |           |           |           | ■         | ■         |
| Greifswalder Oie        |           |           |           |           | ■         | ■         |
| Koserow (IMK)           |           |           |           |           | ■         | ■         |
| Ückermünde              |           |           |           | ■         | ■         | ■         |

Abbildung 2: zeitlicher Umfang der digital verfügbaren Winddaten

## 3.1.3 Seegang

Abbildung 3 zeigt einen Überblick über die im Projekt vorhandenen Seegangsdaten für Messlokationen in der Ostsee (grüne Markierung). Neben Daten aus eigenen Messkampagnen der Universität Rostock handelt es sich dabei vorwiegend um Daten aus dem Internen Messnetz Küste (IMK) des StAUN Rostock. Die Messungen an der Lokation Arkona werden durch das BSH durchgeführt. Der zeitlicher Umfang dieser Zeitreihe ist umfangreicher, die Daten wurden aber bisher nicht in die Datenbank des Landes Mecklenburg-Vorpommern integriert.

# Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau

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

| Lokation         | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Schönhagen       |      | █    | █    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Heiligenhafen    | █    | █    | █    | █    |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Brodten          |      |      | █    | █    |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Dassow           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Boltenhagen      |      |      | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    |
| Rerik            |      | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    |
| Kühlungsborn     |      |      |      | █    | █    |      |      |      |      |      |      |      |
| Börgerende       |      |      |      |      | █    | █    | █    | █    | █    | █    |      |      |
| Warnemünde (IMK) |      | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    |
| Warnemünde       |      |      |      | █    | █    | █    | █    |      |      |      |      |      |
| Dierhagen        |      | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    |      |      |      |      |
| Ahrenshoop       |      | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    |
| Zingst           |      | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    |
| Schaprode        |      | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    |      |      |      |      |
| Varnkevit        |      | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    |
| Arkona           |      |      |      |      |      |      | █    |      |      |      |      |      |
| Göhren           |      |      |      |      |      |      |      |      |      | █    | █    |      |
| Göhren (IMK)     |      | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    |
| Arkona (BSH)     |      |      |      |      |      |      | █    |      |      |      |      |      |
| Lubmin           |      |      | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    |
| Koserow          |      |      | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    |
| Mönkebude        |      | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    |
| Kamminke         |      | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    | █    |

Abbildung 3: zeitlicher Umfang der digital verfügbaren Seegangdaten

Der zeitliche Umfang der Seegangdaten 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 Seegangparameter ermittelt.

## 3.2 Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen

Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen sind eine Methode zur Berechnung des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Windfeld und dem daraus resultierenden Wellenfeld. 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 werden. Abbildung 4 verdeutlicht die Vorgehensweise.

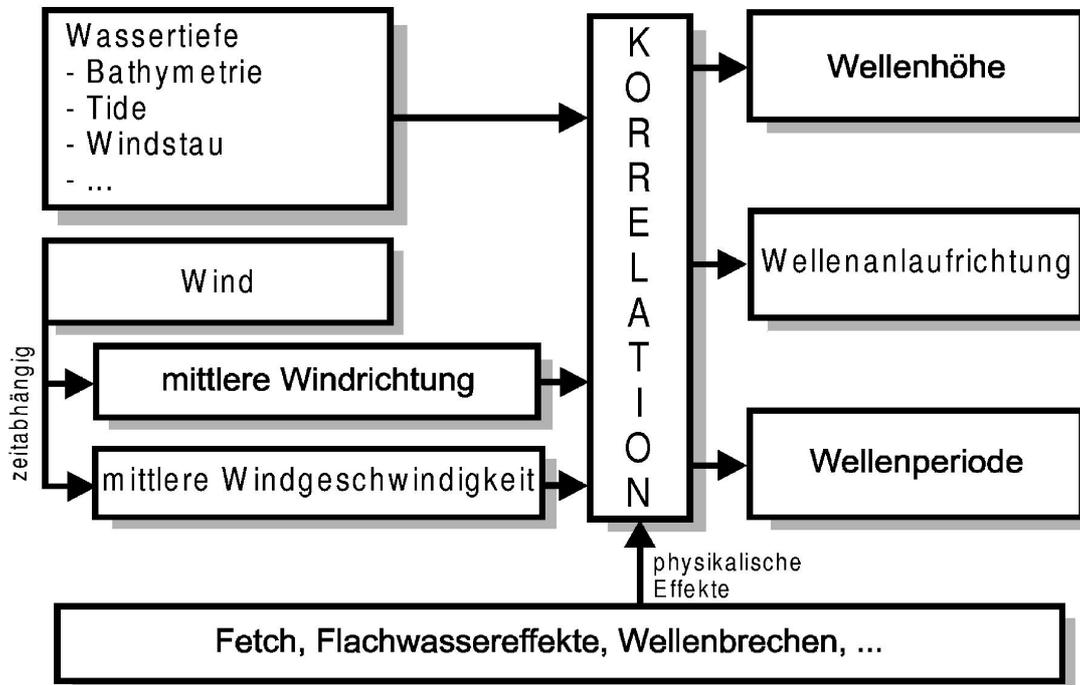


Abbildung 4: Wind-Wellen-Korrelationsrechnung, Schema (nach Witte et al., 1999)

Nachteilig gegenüber anderen Verfahren wie 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 fortgeschriebenen Messungen immer wieder verifiziert. Die Extrapolation der Daten über die beobachteten Windgeschwindigkeiten hinaus ist begrenzt (Fröhle & Fittschen 1999).

Abbildung 5 zeigt ein XY-Diagramm von gemessenen und korrelierten Wellenhöhen an der Lokation Warnemünde. Dabei wurden an der Abszisse die gemessenen Werte und an der Ordinate die berechneten Wellenhöhen dargestellt, um einen guten Vergleich zwischen den beiden Datensätzen zu ermöglichen.

Die Abbildung zeigt, dass die gemessenen und berechneten Werte eine sehr gute Übereinstimmung aufweisen. Es gibt praktisch keine systematischen Abweichungen, d.h. Die Steigung der Aus-

gleichsgeraden beträgt nahezu  $m=1$ , und die durchschnittliche mittlere Abweichung ist mit  $\overline{\Delta H} = 0,21 \text{ m}$  gering.

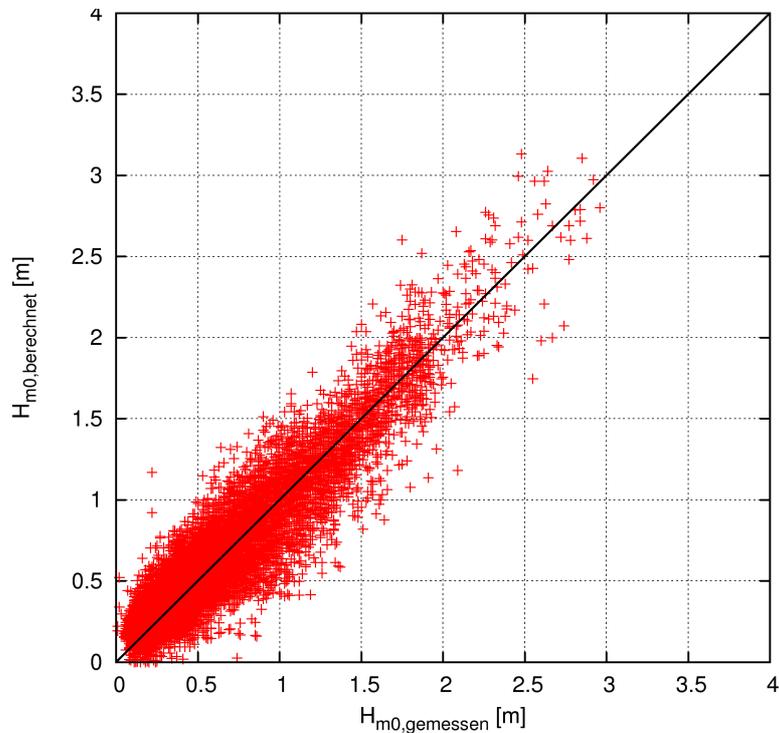
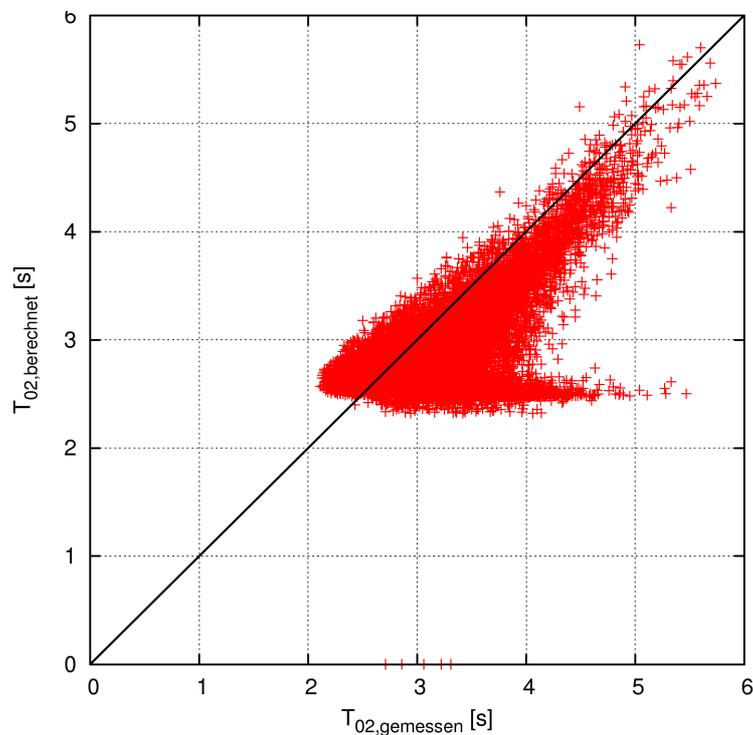


Abbildung 5: Vergleich gemessener und korrelierter Wellenhöhen  $H_{m0}$  an der Lokation Warnemünde

Der Vergleich der gemessenen und berechneten Wellenperioden ist in Abbildung 6 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Wellenperioden ebenfalls sehr gut wiedergegeben werden. Lediglich ausgeprägte Dünungsereignisse zeigen deutliche Abweichungen.



*Abbildung 6: Vergleich gemessener und korrelierter Wellenperioden  $T_{02}$  an der Lokation Warnemünde*

Abbildung 7 zeigt die berechneten und gemessenen Wellenaufrichtungen. Hierbei wurden Ereignisse bei denen die Wellenhöhe  $H_{m0} < 0,5\text{m}$  ist vernachlässigt, da Messergebnisse für Wellenaufrichtungen mit geringerer Wellenhöhen stark von zufälligen Ereignisse (Schiffahrt, Fernwellen) abhängig sein können. Die berechneten Wellenaufrichtungen zeigen ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten.

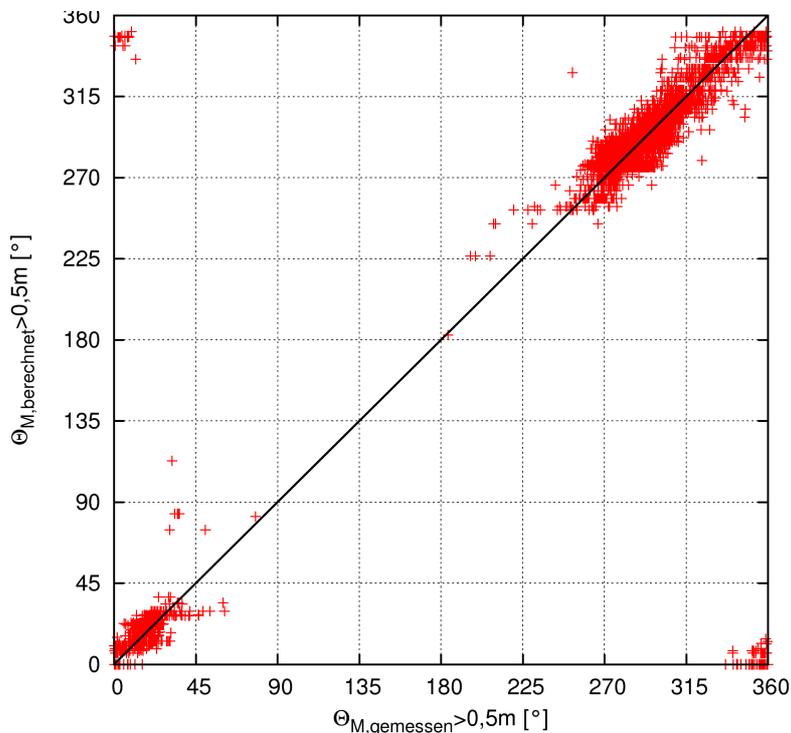


Abbildung 7: Vergleich gemessener und korrelierter Wellenanlafrichtungen  $\Theta_m$  an der Lokation Warnemünde

### 3.3 Langzeit-Seegangssimulationen

Da der zeitliche Umfang von gemessenen Seegangdaten für eine direkte extremwertstatistische Analyse zu gering ist, wären direkte Extrapolationen mit großen Unsicherheiten verbunden. Lange Ganglinien der Seegangparameter können mittels Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen erzeugt werden, wenn die Datengrundlage im Berechnungsgebiet ausreichend ist. (vgl. Abschnitt 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“ (**W**estliche **O**stsee, **A**ngetrieben durch **D**WD **L**M-Modell Windfelder) gewählt. Das Modell wurde auf der Grundlage einer Bathymetrie mit der Auflösung  $\Delta x \approx \Delta y \approx 1 \text{ km}$  und Winddaten aus dem LM-Modell des DWD aufgebaut. Es wird detaillierter in Abschnitt 3.3.1 vorgestellt.

Da der zeitlich Umfang der hoch-aufgelösten Windfelder die durch den Deutsche Wetterdienst aus dem LM-Modell zur Verfügung gestellt werden konnten relativ begrenzt ist (1998-2006), wurde ein weiteres instationäres Seegangmodell entwickelt. Grundlage dieses Modells ist eine Bathymetrie

mit der Auflösung  $\Delta x \approx \Delta y \approx 2\text{km}$  und Windfelder die im Rahmen des HIPOCAS-Projektes von der GKSS berechnet wurden. Diese Windfelder stehen über einen relativ langen Zeitraum (1948-2006) zur Verfügung. Für dieses Seegangmodell wurde der interne Name „SOHIP“ (**S**üdliche **O**stsee, Angetrieben durch **HIPOCAS**-Wind) gewählt. Das Modell wird in Abschnitt 3.3.2 detaillierter vorgestellt.

### 3.3.1 WODLM

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde zunächst ein Simulationsmodell für Seegang in der westlichen Ostsee aufgebaut. Im Zuge der Projektbearbeitung wurde anschließend ein zweites Langzeit-Seegangmodell aufgebaut so dass sich dadurch die Notwendigkeit der Benennung der Modelle ergab um die einzelnen Modelle besser absprechen zu können. Für das Simulationsmodelle „westliche Ostsee“ wurde dabei der Name WODLM“ (**W**estliche **O**stsee, Angetrieben durch **DWD LM**-Modell Windfelder) gewählt.

#### 3.3.1.1 Datengrundlage

Das WODLM-Modell wurde auf der Grundlage einer Bathymetrie der Ostsee (Seifert et al., 2001) in der Auflösung  $\Delta x \approx \Delta y \approx 1\text{km}$ . aufgebaut. In Abbildung 8 sind die Wassertiefen im Simulationsgebiet dargestellt. Das Simulationsgebiet umfasst den gesamten dargestellten Abschnitt der westlichen Ostsee bis Bornholm. Es umfasst ein Gebiet von rd.  $400\text{km} \times 350\text{km}$ . D.h. es wurden insgesamt 133.200 Rechengitterpunkte im Modell berücksichtigt. Ein Zeitschritt umfasst eine Datenmenge von 6 Gigabyte. Abgespeichert werden jeweils 11,5 Mbyte. Ein Jahr benötigt somit eine Festplattenkapazität von 100 Gigabyte.

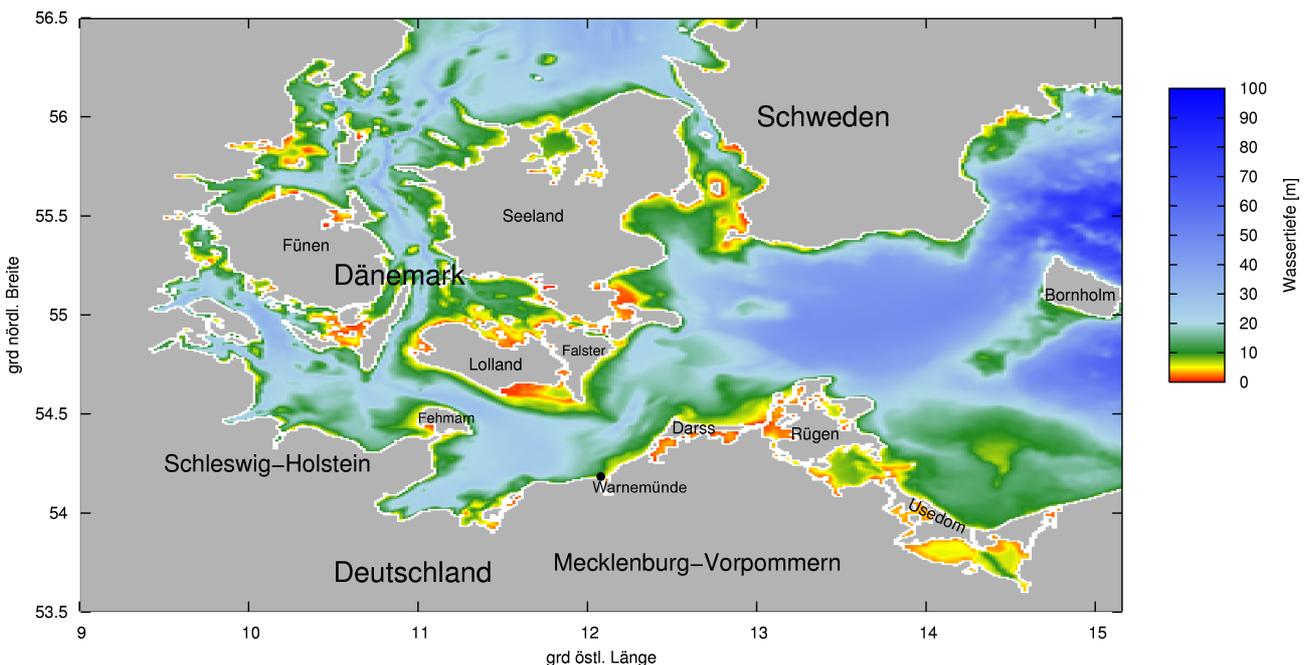


Abbildung 8: Bathymetrie des numerischen Modells "WODLM"

# Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau

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

---

Die als Antrieb für das Seegangmodell erforderlichen Winddaten wurden vom Deutschen Wetterdienst beschafft. Es wurde der Modellwind des sog. LM-Modells (heute COSMO-EU) mit einer zeitlichen Auflösung von  $\Delta t=1h$  und einer räumlichen Auflösung von  $\Delta x \approx \Delta y \approx 7km$  für einen Zeitraum von 7 Jahren (1998-2006) geliefert und in das Seegangmodell integriert. Dabei wurden für die Seegangssimulation die Ergebnisse des sogenannten „Reanalyselaufes“ verwendet, bei dem Messungen der Klimabeobachtung in die Modellierung integriert werden.

### 3.3.1.2 *Simulationsparameter*

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

### 3.3.1.3 *Durchgeführte Berechnungen*

Die Durchführung von Langzeit(-Seegang)simulationen benötigt relativ viel Rechenzeit. Da der Betrieb der entsprechenden Rechner nicht vollkommen störungsfrei verlaufen kann, ist es sinnvoll während der Berechnung Zwischenergebnisse abzuspeichern um im Falle eines Rechnerausfalls die Simulation weiterlaufen lassen zu können. Das numerische Modell SWAN bieten 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 sichert 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, 3Ghz-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.

### 3.3.1.4 *Verifikation*

Das WODLM-Modell wurde vergleichsweise umfangreich validiert. Dabei wurden die berechneten Seegangsdaten mit an verschiedenen Lokationen gemessenen Seegangsdaten verglichen. Um die berechneten und gemessenen Daten besser vergleichen zu können wurde dafür statt einer

# Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau

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

---

Zeitreihendarstellung eine Darstellung in einem XY-Diagramm gewählt. Dabei wurden die gemessenen Werte auf der Abzisse und der berechnete Wert auf der Ordinate eines Koordinatensystems aufgetragen. Abbildung 9 zeigt dies für die Lokationen Warnemünde, Damp, Börgerende und Göhren am Beispiel der Wellenhöhen  $H_{m0}$ .

Es wird deutlich, dass die Genauigkeit der Simulation 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 Lokationen Börgerende kommt ein Abschattungseffekt hinzu, der bei Winden aus West auftritt. Dieser hat in der Simulation zu starken Einfluß, da die Diskretisierung der realen Bathymetrie im Bereich der Messlokation zu zu großer Landabdeckung geführt hat. Da die für die spätere Berechnung der Bemessungswerte ausgewählten Punkte einen größeren Abstand zur Küste haben, hat dieser Fehler keinen Einfluss auf die Bemessungswerte selbst.

An der Lokation Göhren werden hohe Wellen systematisch unterschätzt. Grund dafür ist die Lage der Lokation in der relativen Nähe des Randes des Simulationsgebietes. Beim Aufbau der SOHIP-Simulation wird auf dieses Problem eingegangen und der Rand weiter in Richtung Osten verlegt.

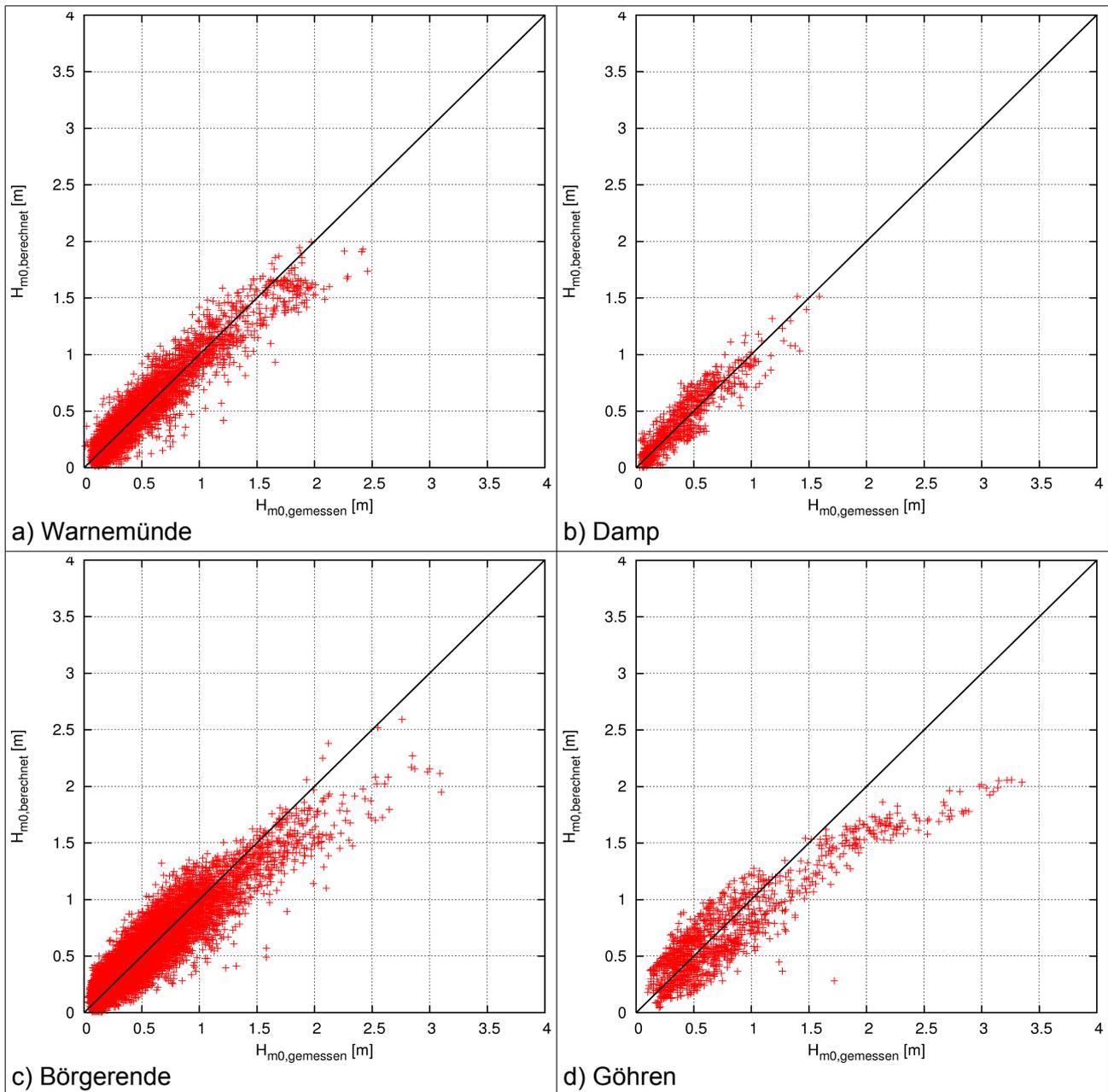
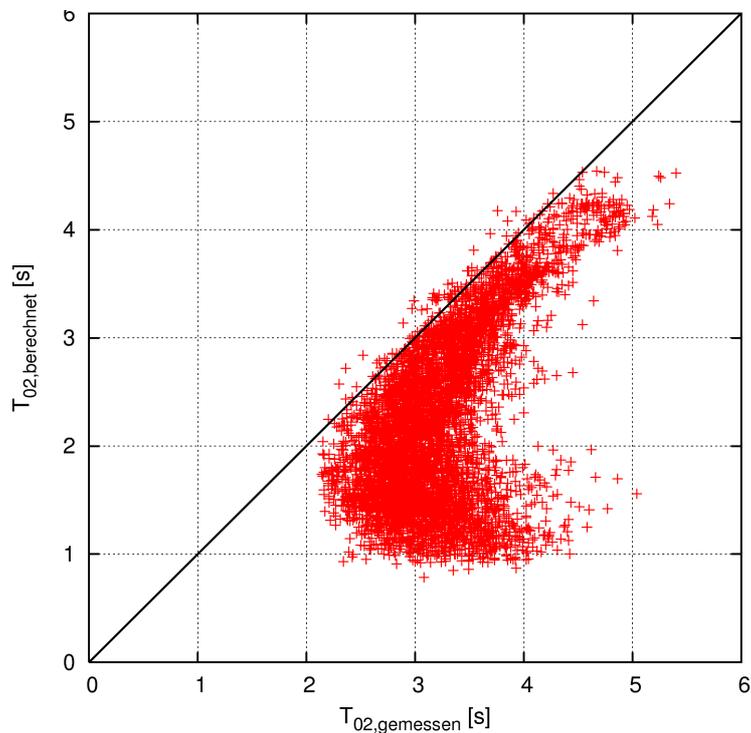


Abbildung 9: Vergleich gemessener und mit dem WODLM-Modell berechnete Wellenhöhen  $H_{m0}$

Einen Vergleich zwischen gemessener und berechneter Wellenperiode für die Lokation Warnemünde ist in Abbildung 10 dargestellt. 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 & Fröhle, 2008 sowie Fröhle & 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.



*Abbildung 10: Vergleich gemessener und mit dem WODLM-Modell berechneter Wellenperioden  $T_{02}$*

In Abbildung 11 ist einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Wellenanlafrichtungen für die Lokation Warnemünde dargestellt, wobei Ereignisse bei denen die Wellenhöhe  $H_{m0} < 0,5\text{m}$  vernachlässigt wurden. Berechnete und gemessene Anlafrichtungen zeigen eine gute Übereinstimmung. Dies gilt auch für alle anderen betrachteten Lokationen. Ereignisse mit geringerer Wellenhöhen weisen eine schlechtere Übereinstimmung auf, da die Anlafrichtung niedriger Wellen stark von zufälligen Ereignisse (Schifffahrt, Fernwellen) abhängig sein kann.

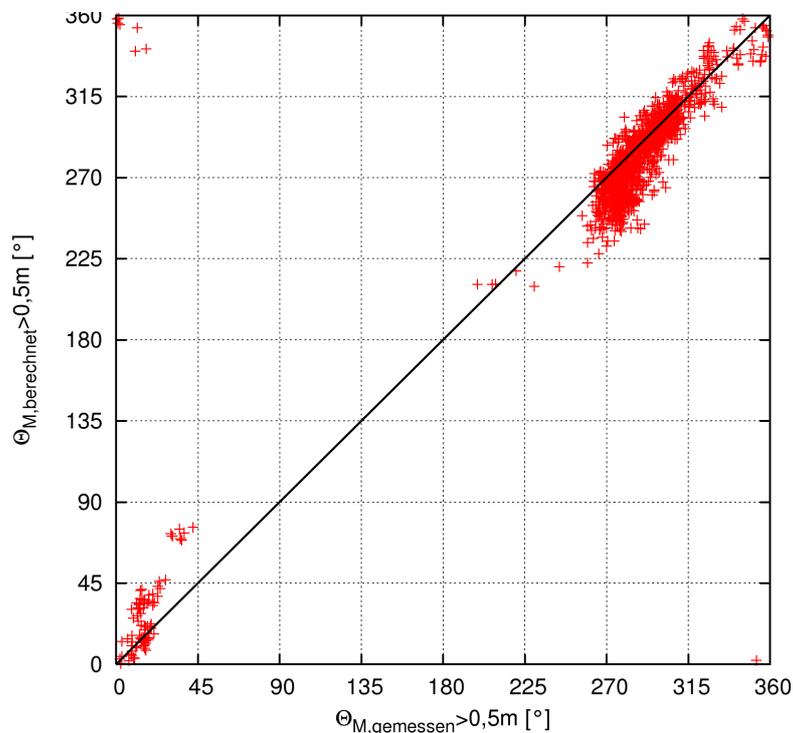


Abbildung 11: Vergleich gemessener und mit dem WODLM-Modell berechneter Wellenanlaufrichtungen  $\Theta_M$

### 3.3.2 SOHIP

Der zeitliche Umfang der WODLM-Simulation umfasst einen Zeitraum von etwa sieben Jahren. Windfelder aus dem LM-Modell weiter zurück liegender Zeiträume als etwa 10/1998 sind beim DWD nicht verfügbar, da das LM-Modell erst zu diesem Zeitpunkt implementiert wurde. Vor 1999 sind Daten aus dem sog. „Deutschlandmodell“ verfügbar, diese sind aber für Seegangssimulationen weniger geeignet da die zeitliche Auflösung mit drei Zeitpunkten pro Tag (d.h.  $\Delta t=8h$ ) zu gering ist. Um den zeitlichen Umfang der Ausgangsdatenbasis für die Ermittlung der Bemessungsdaten zu verbessern, wurde nach Windfeldern gesucht, die einen längeren Zeitraum umfassen. Solche Windfelder wurden im Rahmen des HIPOCAS-Projektes bei der GKSS berechnet (Weisse et al., ). Die Windfelder aus dem HIPOCAS-Projekt sind über einen Zeitraum von 1948 bis 2006 verfügbar.

Für das Seegangmodell der „südlichen Ostsee“ wurde der Name SOHIP“ (**S**üdliche **O**stsee, **A**ngetrieben durch **H**IPOCAS-Modell Windfelder) gewählt.

## 3.3.2.1 Datengrundlage

Das SOHIP-Modell wurde auf Grundlage einer Bathymetrie der Ostsee (Seifert et. al, 2001) mit der Auflösung  $\Delta x \approx \Delta y \approx 2\text{km}$  aufgebaut. Die Bathymetrie ist in Abbildung 12 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. In Abbildung 13 wird die vorhergesagte Wellenhöhe für ausgewählte Windgeschwindigkeiten über unterschiedlich Fetchlängen grafisch dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Einfluss der Fetchlänge mit zunehmender Fetchlänge geringer wird und ab etwa 500km vernachlässigbar ist. Der Abstand der Ostküste Rügens zum Rand des Simulationsgebietes wurde auf mit etwa 550km festgelegt.

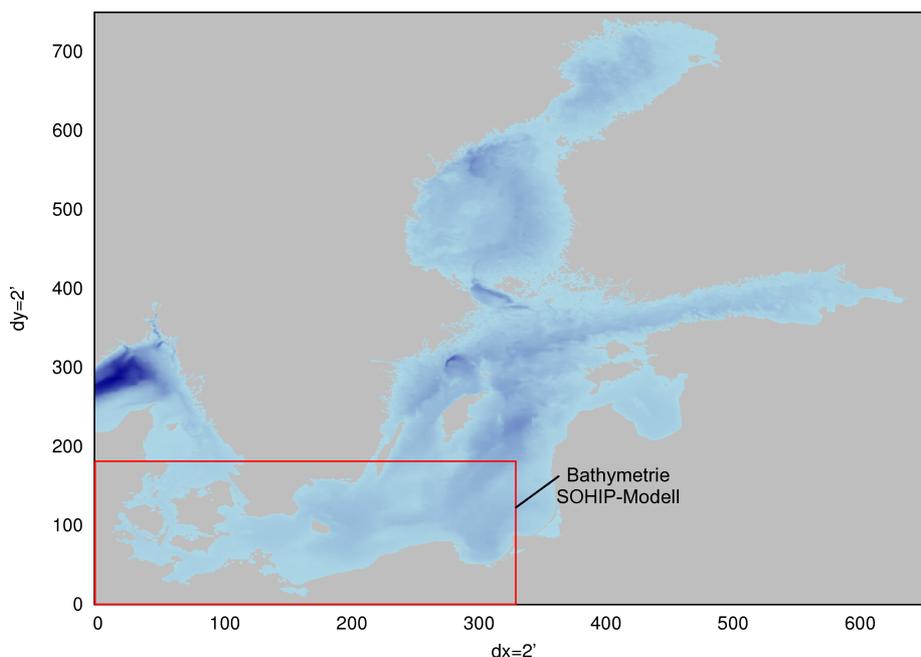


Abbildung 12: Bathymetrie der Ostsee und Ausschnitt des numerischen Modells SOHIP

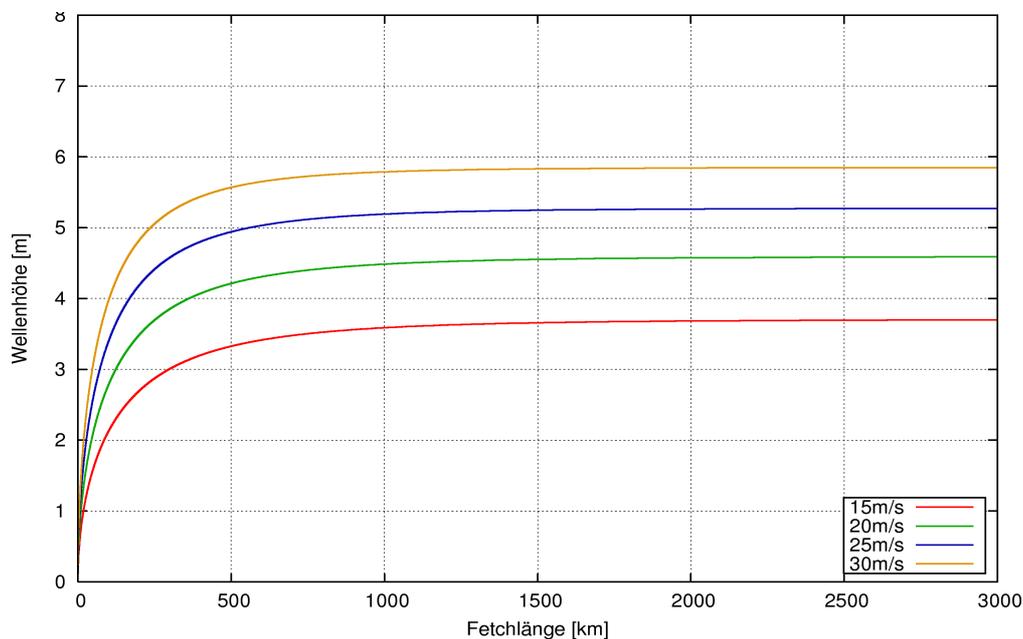


Abbildung 13: Einfluss der Fetchlängen auf die Wellenhöhen nach SPM

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

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

### 3.3.2.2 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  $\Delta x=3,7km$  und  $\Delta y=1km$  (bei  $55^\circ N$ ) und der Auflösung der verwendeten Bathymetrie. Wie bei WODLM wurde festgelegt, dass Zeitschritte von  $\Delta t=1h$  ausreichend sind, wenn dabei wenigstens 20 Iterationen zugelassen werden. Die Seegangsspektren werden mit 41 Frequenzen von  $f_{min}=0,02Hz$  bis  $f_{max}=1Hz$  über  $\Delta\theta=10^\circ$  aufgelöst.

Es wurden 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 ( $H_{m0}$ ,  $T_{01}$ ,  $T_{02}$ ,  $T_p$ ,  $\Theta_M$ ) für alle Punkte des Berechnungsgebietes ausgegeben. Zusätzlich wurden die vollen zweidimensionalen Seegangsspektren an ausgewählten Punkten ausgegeben.

### 3.3.2.3 Durchgeführte 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 Beginn jeder Simulation überlappend gerechnet. Die 10tägige zeitliche Überlappung wurde in der Annahme gewählt, dass Seegang über ein Gebiet von etwa 800km Länge (Ost-West-Ausdehnung des Simulationsgebietes) eine Ausbreitendauer 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 konnte Zeitnah und unbürokratisch entsprechende Rechenleistung zur Verfügung gestellt werden, 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. Abbildung 14 gibt einen Überblick über die mit den SOHIP-Simulationen ermittelte Zeitserie der Wellenhöhen vor Warnemünde.

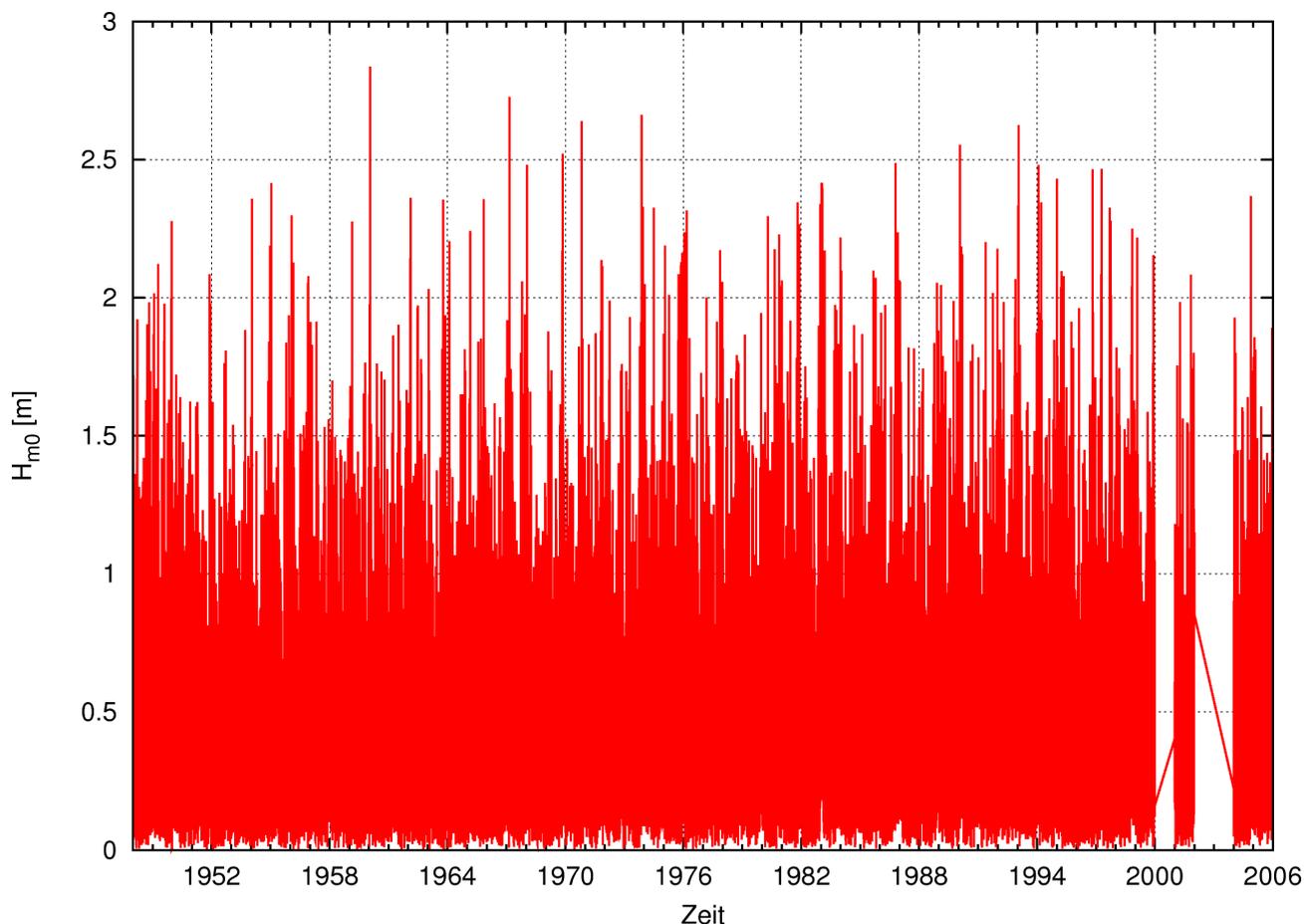


Abbildung 14: Zeitserie der Wellenhöhen  $H_{m0}$  vor Warnemünde (SOHIP-Simulationen)

### 3.3.2.4 Verifikation

Das SOHIP-Modell wurde methodisch analog zum WODLM-Modell validiert. Abbildung 15 zeigt XY-Diagramme für die Wellenhöhen an den Lokationen 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 (Abbildung 16) 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.

Abbildung 15 d zeigt, dass im SOHIP-Modell die Wellenhöhen im Bereich „östlich Rügen“ nicht mehr systematisch unterschätzt. Die Verlagerung des Modellrandes in Richtung Osten hat hier, wie erwartet, signifikante Verbesserungen bewirkt.

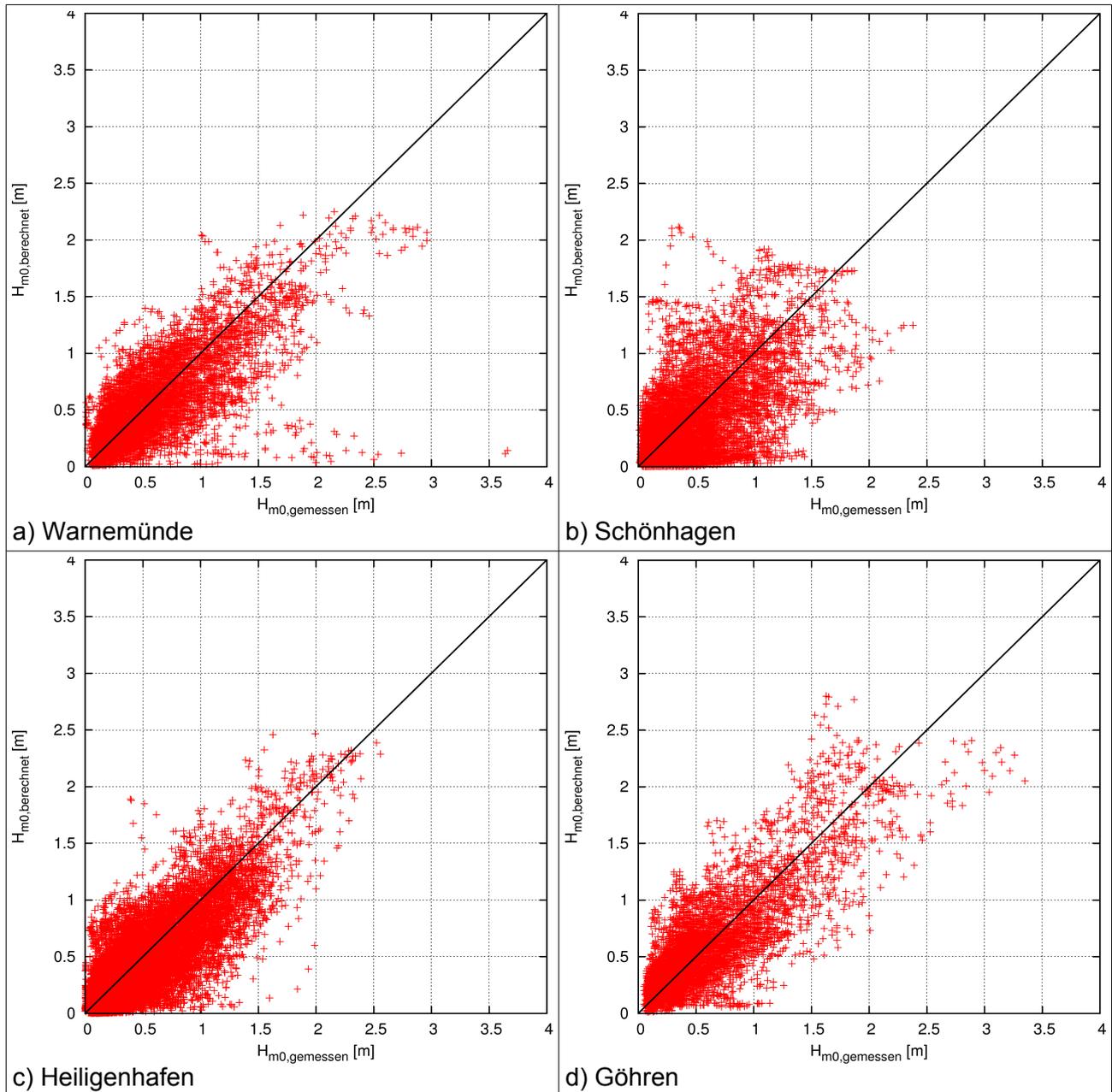


Abbildung 15: Vergleich gemessener und mit dem SOHIP-Modell berechneter Wellenhöhen  $H_{m0}$  für ausgewählte Lokationen in der Ostsee

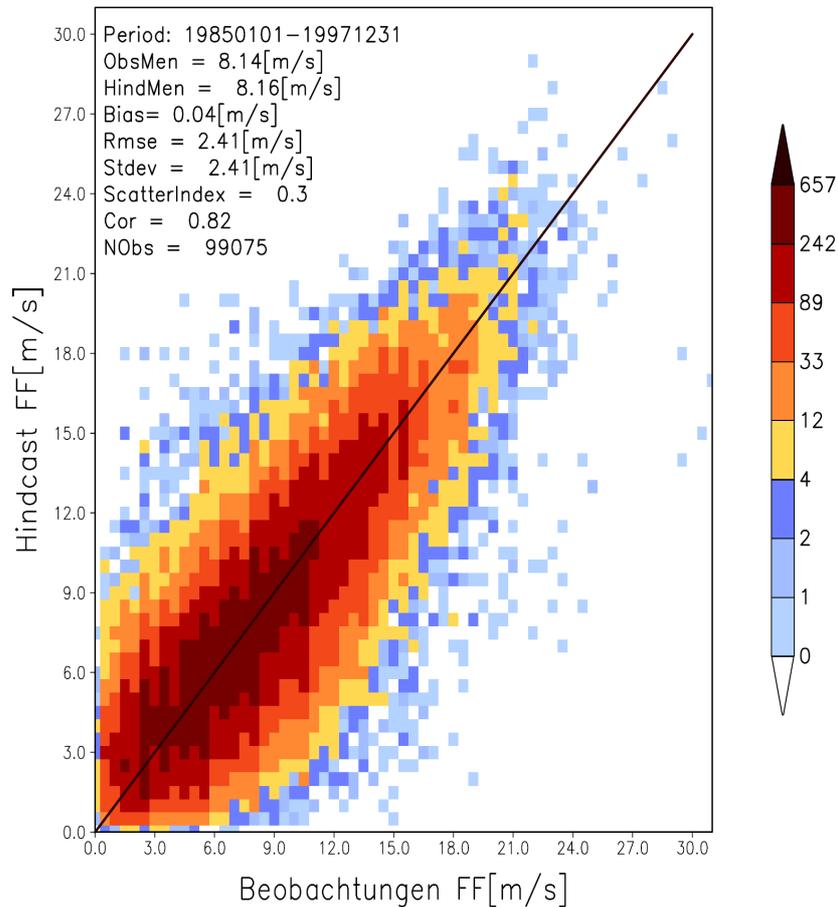


Abbildung 16: Beobachtete und modellierte Windgeschwindigkeiten an der Lokation K13 (in der westl. Nordsee) aus: Weisse et al., 2003

Für die Wellenperioden können für das SOHIP-Modell die selben Aussagen wie für WODLM getroffen werden. Die berechneten Wellenperioden sind durchweg zu kurz. Abbildung 17 zeigt einen Vergleich der an der Lokation Warnemünde gemessenen und berechneten Wellenperioden.

Die Wellenperioden die als Grundlage für die Bemessungsparameter benutzt werden sollen, werden auf anderem Wege aus der direkten Korrelation mittels Seegangsmessungen ermittelt.

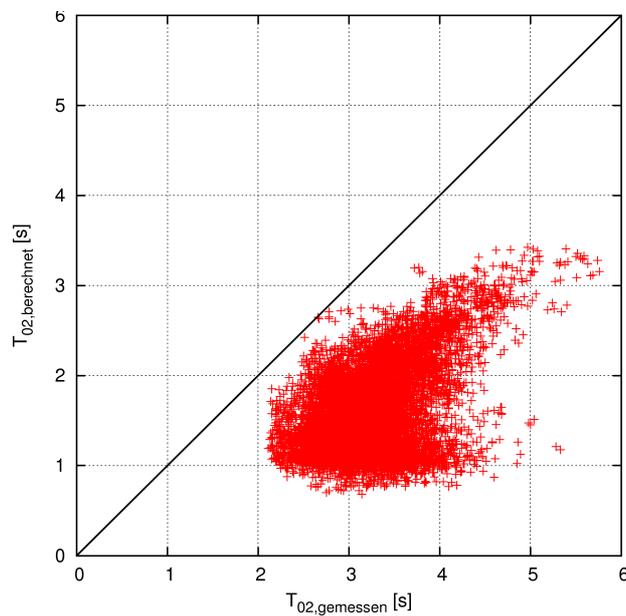


Abbildung 17: Vergleich gemessener und mit dem SOHIP-Modell berechneter Wellenperioden  $T_{02}$  an der Lokation Warnemünde

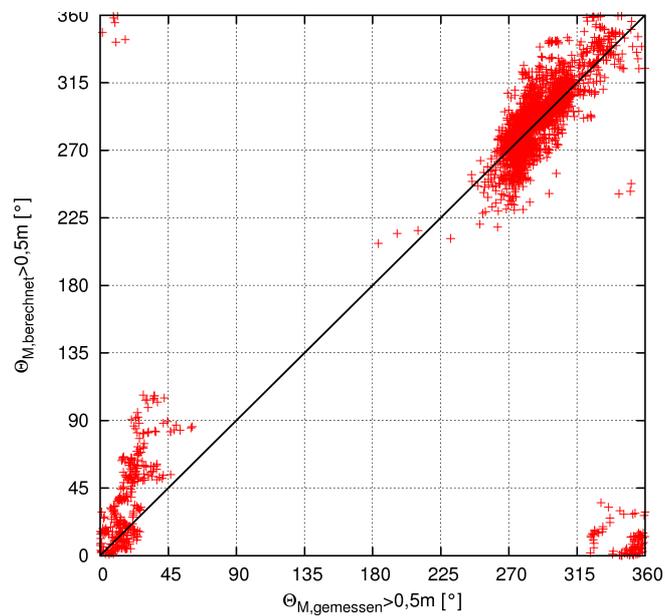


Abbildung 18: Vergleich gemessener und mit dem SOHIP-Modell berechneter Wellenanlaufrichtungen  $\Theta_m$  an der Lokation Warnemünde

# Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau

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

---

Die Wellenanlauffrichtungen zeigen – wie auch die im WODLM Modell – eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten Werten (Abbildung 18 für die Lokation Warnemünde). Auch hier wurden Ereignisse bei denen die Wellenhöhe  $H_{m0} < 0,5\text{m}$  ist vernachlässigt, da Ereignisse mit geringerer Wellenhöhen stark von zufälligen Ereignisse (Schiffahrt, Fernwellen) abhängig sein können.

## 4 Definition von Bemessungsdaten

Wie bereits 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 – benötigen, 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. 19). Das gewählte Sicherheitsniveau hängt dabei von den zu schützenden Gütern ab.

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

Für die funktionelle Bemessung von Anlagen zur Beeinflussung des Sedimenttransports mit dem Ziel des Erhalts der Küstenlinie:

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

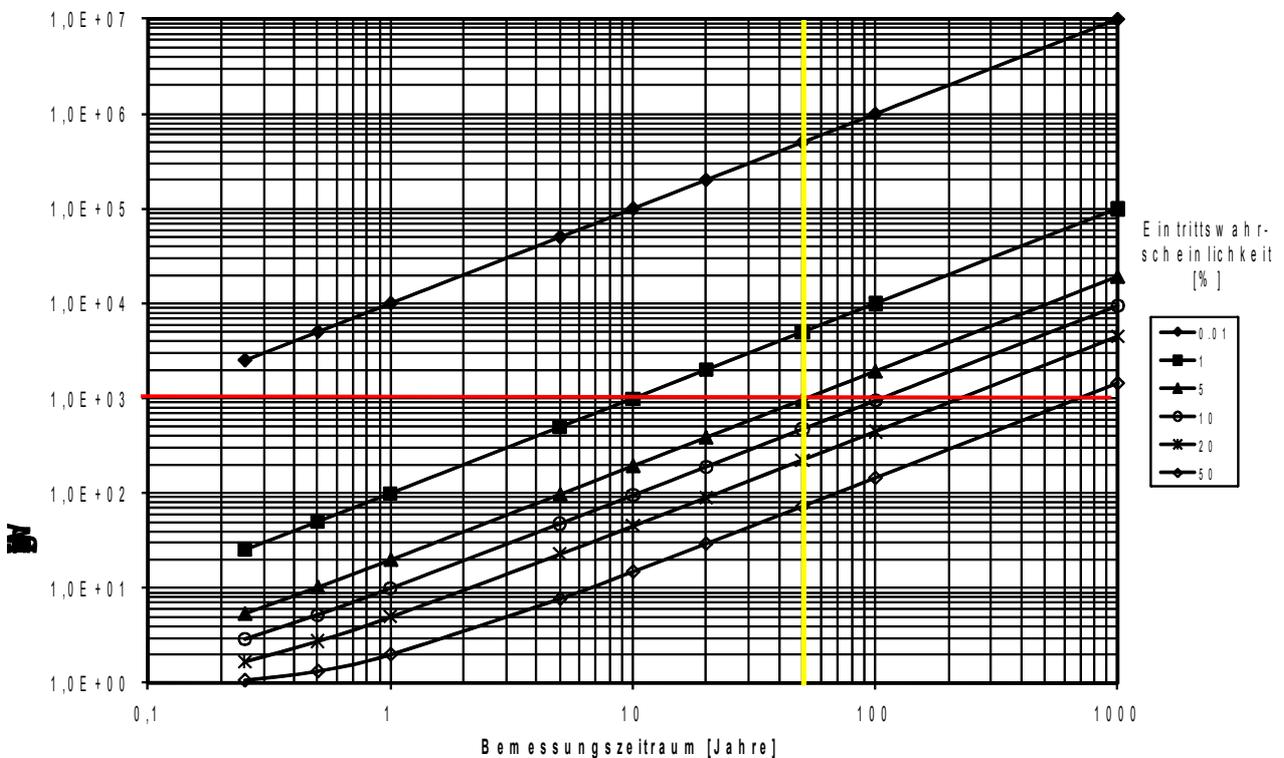


Abbildung 19: Statistischer Zusammenhang zwischen Bemessungszeitraum, mittlerem Wiederkehrintervall und Eintrittswahrscheinlichkeit

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 zeitlicher Abstands zwischen Extremereignissen
- Ansätze zur Verknüpfung statistisch unabhängiger Größen

Deterministische Bemessung (auf Grundlage statistischer Bewertung der Eingangsgrößen):

# Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau

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

---

- 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

Deterministische Bemessung:

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

In den folgenden Abschnitten 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 Abschnitt 3 beschriebenen Eingangsdaten umfangreiche statistische Berechnungen durchgeführt werden. Exemplarisch wurde dies im Rahmen des Forschungsvorhabens für die Lokation Warnemünde durchgeführt. Die Lokation wurde ausgewählt, weil die Datenlage für Warnemünde vergleichsweise sehr gut ist. Grundsätzlich können die beschriebenen Untersuchungen in allen Küstenabschnitten (vgl. Kap. 6) durchgeführt werden.

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 der sehr gut abgesicherten Berechnungen die mittels Wind-Wellen-Korrelationsverfahren berechnet wurden, sind die Daten des WODLM und SOHIP-Modells für Warnemünde verfügbar. Die ebenfalls verfügbaren Messdaten aus dem Internen Messnetz Küste wurden für die statistischen Untersuchungen nicht herangezogen, da gem. Konzept ausschließlich Lokationen in größerer Wassertiefe statistisch analysiert werden, da die Ergebnisse dann für größere Küstenabschnitte verwertbar sind. Zudem sind die IMK - Messdaten erst über einen Zeitraum von 10 Jahren 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. Abschnitt 3.3.2).

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

### 5.1 Wasserstand

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

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

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde beide Stichproben verwendet und die Ergebnisse verglichen.

## 5.1.1 Extremwertstatistische Untersuchungen der Jahresmaxima der Wasserstände

Die Jahresmaxima für Warnemünde wurden auf Grundlage der stündlichen Messwerte die vom Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund erhoben werden (ältere Werte auch vom Seehydrographischen Dienst), ermittelt. Die Daten wurden bereits plausibilisiert ausgeliefert und wurden um den säkularen Meeresspiegelanstieg trendbereinigt. Dazu wurde am Pegel Warnemünde ein mittlerer Meeresspiegelanstieg von 2,2 mm/Jahr ermittelt (Abbildung 20). Bei Auswertung des gleitenden Mittelwertes ergab sich für den mittleren Meeresspiegelanstieg ebenfalls ein Wert von 2,2 mm/Jahr. Als Bezugsjahr wurde 2006 gewählt.

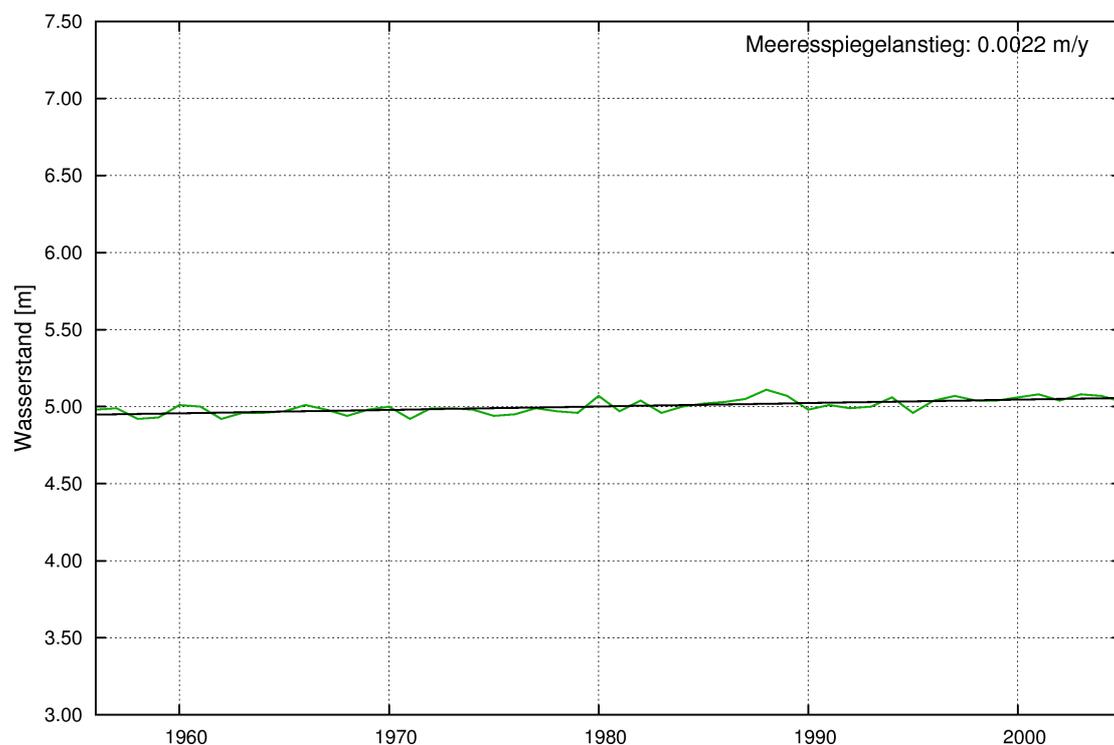


Abbildung 20: Trend der Jahresmittelwerte der Wasserstände am Pegel Warnemünde

Um eine sinnvolle Extremwertverteilung aus der Vielzahl möglicher Verteilungsfunktionen auszuwählen, wurden unterschiedliche Extremwertverteilungen an die gewählte Stichprobe angepasst und vergleichend untersucht. Es wurden folgende Extremwertverteilungen mittels der Maximum-Likelihood-Methode an die Stichprobe angepasst:

- Weibull-Verteilung
- Log-Normal-Verteilung
- Gumbelverteilung

- generalisierte Extremwertverteilung (GEV)
- generalisierte Paretoverteilung (GPD)

Abbildung 21 zeigt die angepassten Verteilung und die Daten der Stichprobe, wobei die Plotting-Positionen mit der Formel von Weibull:

$$p_i = \frac{i}{n+1} \text{ mit}$$

$i$  Rang des Datensatzes

$n$  Anzahl der Datensätze der Stichprobe

berechnet wurden.

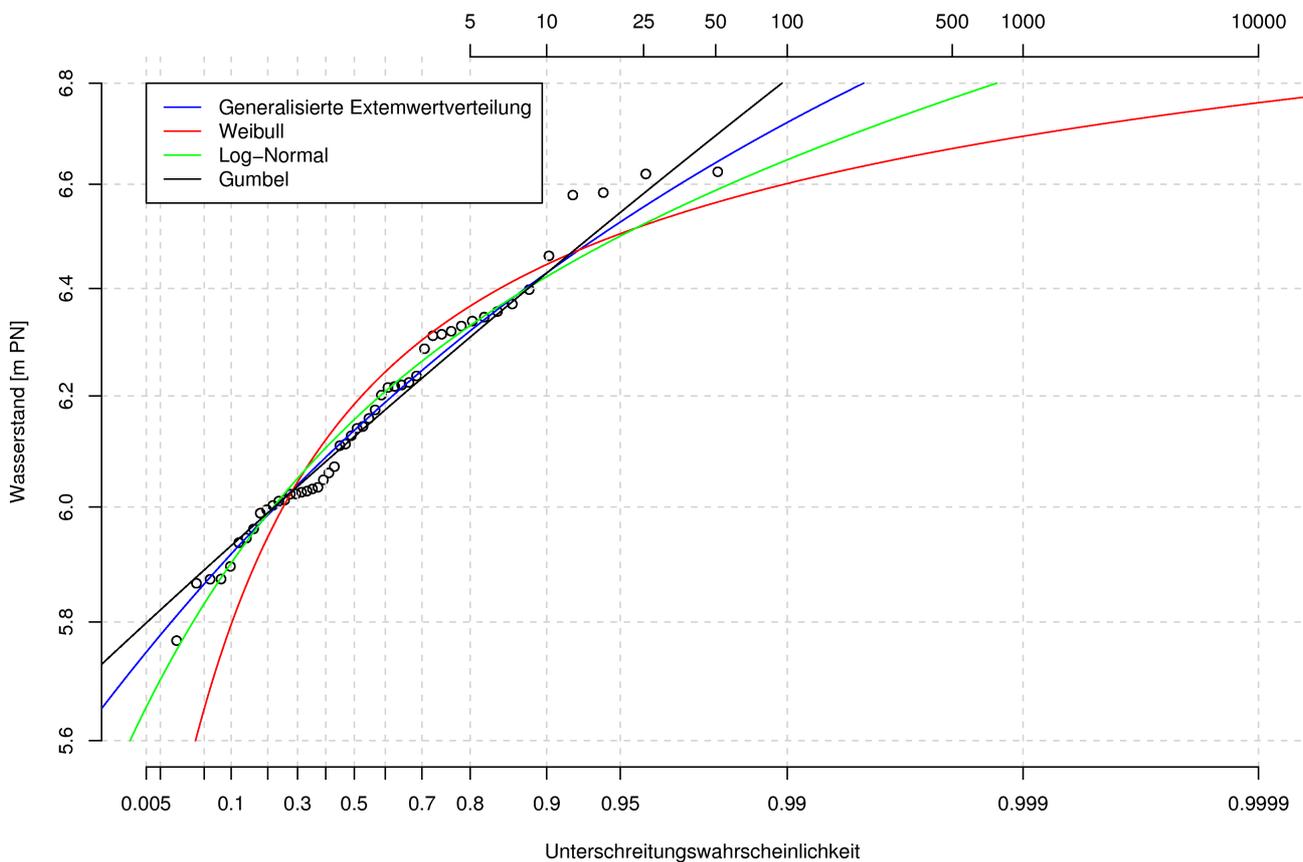


Abbildung 21: Anpassung unterschiedlicher Extremwertverteilungen an die Stichprobe der Jahresmaxima der Wasserstände von 1957 bis 2006 in Warnemünde

Die Abbildung zeigt, dass (erwartungsgemäß) die generalisierte Extremwertverteilung (GEV) die Stichprobe ab Besten beschreibt. Die GEV wurde demnach für die weiteren Auswertungen verwendet.

Abbildung 22 zeigt die generalisierte Extremwertverteilung noch einmal in einer separaten Darstellung. Hierzu wurden die Plotting-Positionen mit der Formel nach Goel, 1993:

$$p_m = \frac{m - 0,02 \cdot \gamma - 0,32}{n - 0,04 \cdot \gamma + 0,36} \quad \text{mit}$$

- $m$  Rang des Datensatzes
- $n$  Anzahl der Datensätze der Stichprobe
- $\gamma$  Schiefe der Stichprobe

ermittelt, da hiermit (nach Goel, 1993) bei graphischen Darstellungen geringere Abweichungen zur GEV erwartet werden können. Zusätzlich sind in der Abbildung die 95%-Konfidenzintervalle der Daten dargestellt.

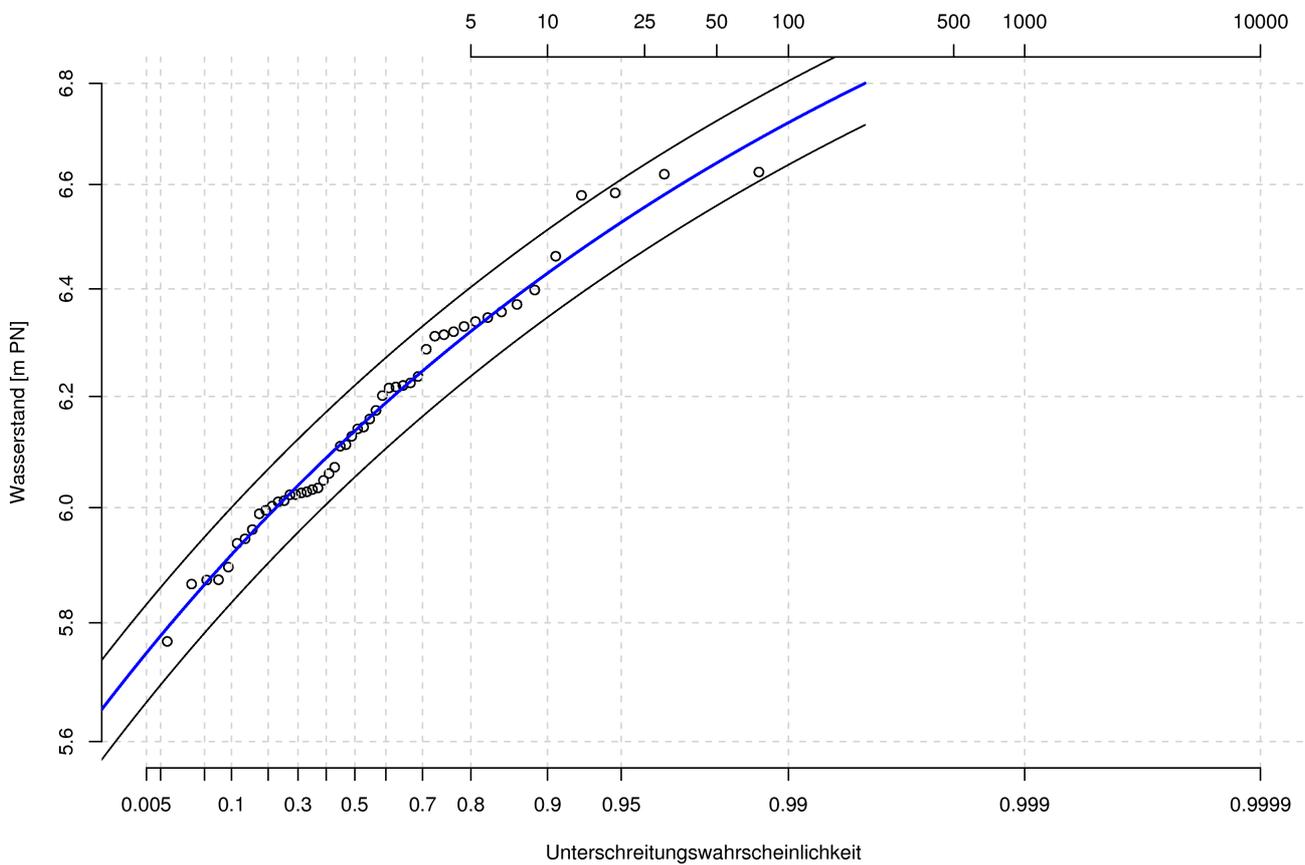


Abbildung 22: Anpassung der generalisierten Extremwertverteilung (GEV) an die Stichprobe der Jahresmaxima der Wasserstände von 1957 bis 2006 Warnemünde und zugehörige 95%-Konfidenzintervalle

Die angepasste GEV kann mit folgenden Parametern beschrieben werden:

Ortsparameter  $\mu$      6,0730  
Skalenparameter  $\beta$     0,1782  
Shapeparameter  $\zeta$     -0,1063

Aus dieser Verteilung wurden Ereignisse mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeit abgeleitet (Tabelle 1).

| <b>Unterschreitungswahrscheinlichkeit <math>p_u</math></b> | <b>Wiederkehrintervall [Jahre]</b> | <b>Wasserstand [m PN]</b> |
|--|------------------------------------|---------------------------|
| 0,900  | 10                                 | 6,43                      |
| 0,980  | 50                                 | 6,64                      |
| 0,990  | 100                                | 6,72                      |
| 0,996  | 250                                | 6,82                      |
| 0,998  | 500                                | 6,88                      |
| 0,999  | 1000                               | 6,94                      |

*Tabelle 1: Wasserstände mit ausgewählten mittleren Eintrittswahrscheinlichkeiten (Unterschreitungswahrscheinlichkeiten) Lokation Warnemünde, Datenbasis Messwerte 1957 - 2006*

## 5.1.2 Extremwertstatistische Untersuchungen der POT-Werte der Wasserstände

Auf Grundlage der Auswertung der POT-Werte konnten auch weitere extreme Wasserstände in die Auswertung einbezogen werden. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden die amtlichen Extremwerte des BSH benutzt. Diese Extremwerte liegen nicht nur ab 1957 vor (wie die stündlichen Wasserstandaufzeichnungen), sondern beinhalten auch die Werte historischer Sturmfluten, u.a. auch die Extremsturmflut von 1872 (2,70m über NN). Der höchste Werte der Datenreihe wird durch die Sturmflut vom 10.02.1625 mit 2,82m 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 & Liebsch, 2000).

Als Grenzwert für die Auswahl der Stichprobe wurde ein Wert von 1,4m über NN (entspricht 6,4m PN) verwendet. Der Wert von 6,4 m PN wurde nach Vergleichsrechnungen als optimaler Wert ermittelt. Die Ergebnisse mit benachbarten Grenzwerten (6,3m ... 6,5m) 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 6,4m PN eine Stichprobe von 14 Werten (extreme Hochwasserereignisse) ausgewählt.

Die Stichprobe der POT-Werte wurden mittels der Maximum-Likelihood-Methode an mehrere unterschiedliche Extremwertverteilung angepasst (vgl. Ausführungen in 5.1.1). Folgende Extremwertverteilungen wurden untersucht:

- Weibullverteilung
- Log-Normal-Verteilung
- Gumbelverteilung
- generalisierte Extremwertverteilung (GEV)
- generalisierte Paretoverteilung (GPD)

Da die einfachen Extremwertverteilungen (Weibull-, Log-Normal-, Gumbelverteilung) in Voruntersuchungen durchgängig schlechtere Anpassungen als die generalisierten Extremwertverteilungen ausweisen, 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. Die generalisierte Extremwertverteilung (GEV) wird 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.

Abbildung 23 zeigt die Stichprobe mit der angepassten GEV, Abbildung 24 die Stichprobe mit der angepassten GPD. Beide Verteilungsfunktionen lassen sich Problemlos an die Stichprobe anpassen. Bei der optischen Bewertung der Anpassungsgüte ist die GEV besser angepasst. Die GPD scheint keinerlei Zusammenhang mit dem Verlauf der Wasserstandsdaten zu haben.

Da sich die angepasste GEV scheinbar keinem Grenzwert nähert, können sich bei Ermittlung von Wasserständen mit sehr niedrigen Eintrittswahrscheinlichkeiten (langer Wiederholungszeitraum) extrem hohe (physikalisch unsinnige) Wasserstände ergeben. Die GPD zeigt in dieser Hinsicht ein gutmütigeres Verhalten.

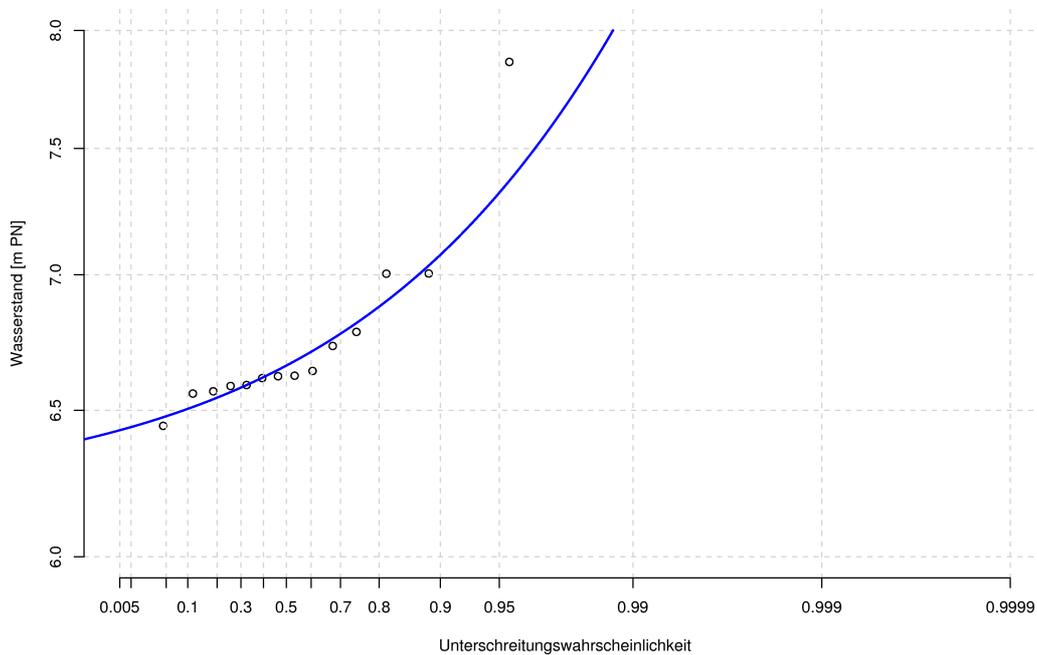


Abbildung 23: Anpassung der generalisierten Extremwertverteilung an die Stichprobe der Peak over Threshold-Werte Wasserstände von 1872 bis 2008 in Warnemünde (Plotting Positionen: Goel, 1993)

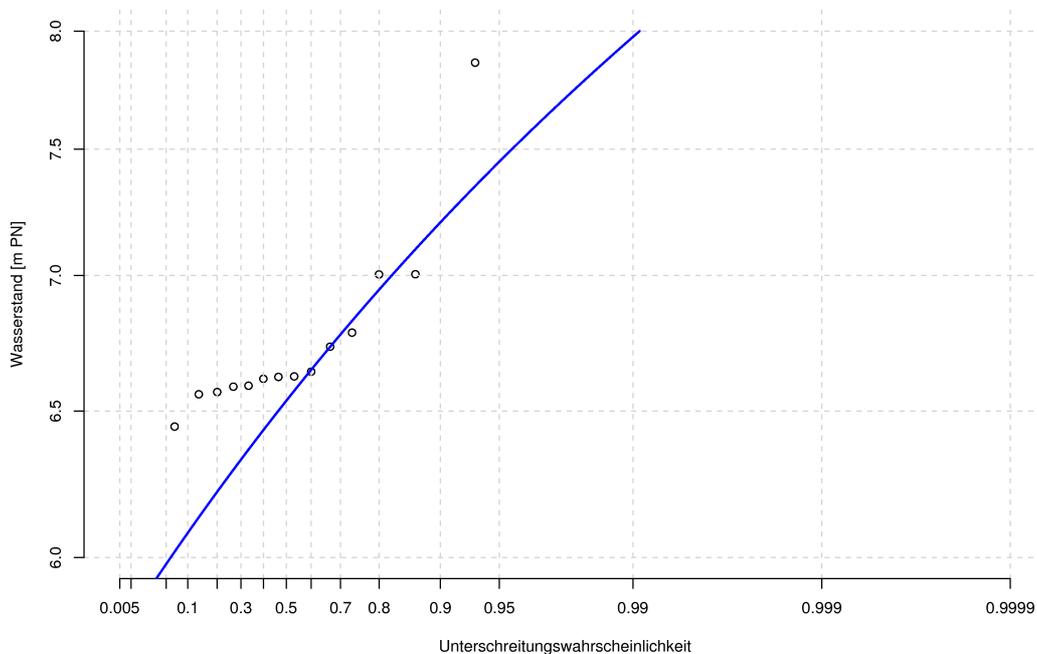


Abbildung 24: Anpassung der generalisierten Paretoverteilung an die Stichprobe der Peak over Threshold-Werte Wasserstände von 1872 bis 2008 in Warnemünde (Plotting Positionen: Weibull)

# Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau

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

Tabelle 2 zeigt die berechneten Anpassungsparameter für die GEV und die GPD an die POT-Wasserstände Warnemünde.

|                         | <b>GEV</b> | <b>GPD</b> |
|-------------------------|------------|------------|
| Ortsparameter $\mu$     | 6,6065     | 6,4000     |
| Skalenparameter $\beta$ | 0,1390     | 0,3747     |
| Shapeparameter $\zeta$  | 0,2065     | -0,0401    |

*Tabelle 2: Parameter der generalisierten Extrem- und Paretoverteilung für POT-Werte des Wasserstand Warnemünde 1872 – 2008*

Tabelle 3 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

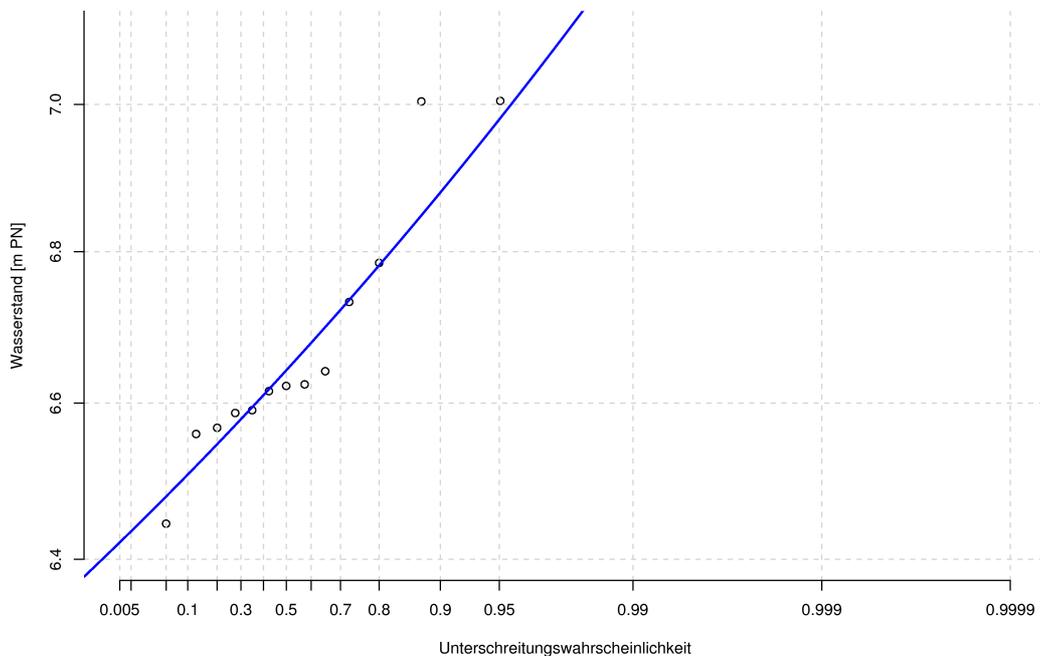
| <b>Unterschreitungs-<br/>wahrscheinlichkeit<br/><math>p_u</math></b> | <b>Wiederkehrs-<br/>intervall<br/>[Jahre]</b> | <b>GEV<br/>Wasserstand<br/>[m PN]</b> | <b>GPD<br/>Wasserstand<br/>[m PN]</b> |
|--|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 0,043  | 10  | 6,47                                  | 6,42                                  |
| 0,809  | 50  | 6,89                                  | 7,00                                  |
| 0,904  | 100   | 7,09                                  | 7,24                                  |
| 0,962  | 250   | 7,43                                  | 7,55                                  |
| 0,98   | 500   | 7,76                                  | 7,77                                  |
| 0,990  | 1000  | 8,18                                  | 7,99                                  |

*Tabelle 3: Wasserstände mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten vor Warnemünde (Unterschreitungswahrscheinlichkeiten) Lokation Warnemünde, Datenbasis POT 1872 - 2008*

Die berechneten Wasserstände werden teilweise sehr hoch. Ein Grund dafür ist, dass der Extremwert von 1872 in die Auswertungen einbezogen wurde. Alternativ kann man diesen Wert auch als Ausreißer aus der Grundgesamtheit werten und aus den Extremwertanalysen ausschließen.

In Abbildung 25 und Abbildung 26 sind die Anpassungen der GEV und GPD für eine um den Extremwasserstand 1872 reduzierte Stichprobe (POT 1883 – 2008) dargestellt. Der Verlauf der GEV ist dem der für die gesamte Stichprobe berechneten Verlauf sehr ähnlich, der Anstieg der Funktion

ist etwas flacher. Der Verlauf der GPD ändert sich relativ stark und erscheint doch sehr unglaubwürdig. Bei Verwendung der reduzierten Stichprobe nähert sich die Funktion sehr schnell einem Grenzwert an.



*Abbildung 25: Anpassung der generalisierten Extremwertverteilung an die Stichprobe der Peak over Threshold-Werte Wasserstände von 1883 bis 2008 in Warnemünde (Plotting Positionen: Goel, 1993)*

Die berechneten Parameter sind in Tabelle 4 aufgeführt. In Tabelle 5 sind die für unterschiedliche Wiederkehrintervalle berechneten Unterschreitungswahrscheinlichkeiten und die zugehörigen Wasserstände angegeben.

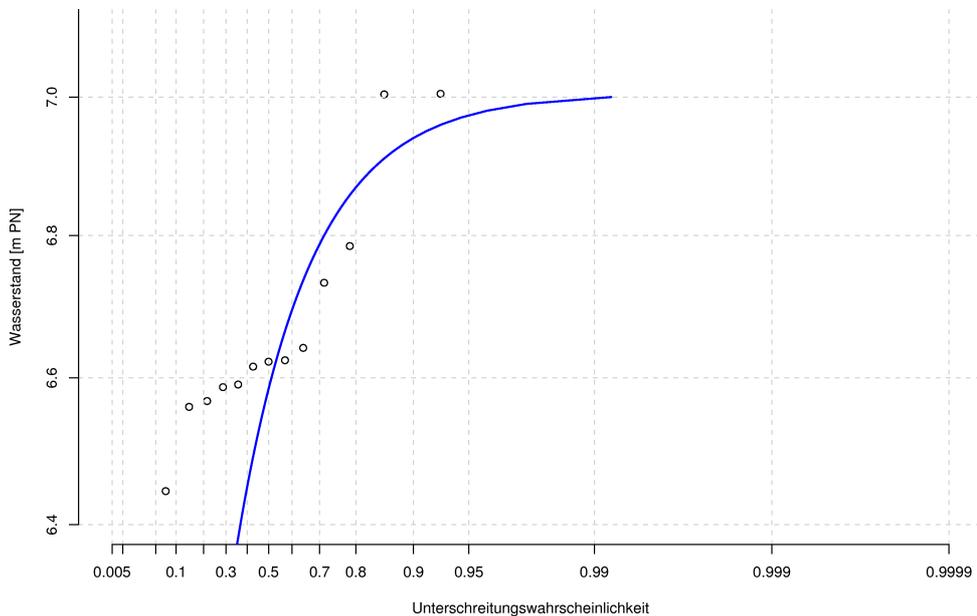


Abbildung 26: Anpassung der generalisierten Paretoverteilung an die Stichprobe der Peak over Threshold-Werte Wasserstände von 1883 bis 2008 in Warnemünde (Plotting Positionen: Weibull)

|                         | <b>GEV</b> | <b>GPD</b> |
|-------------------------|------------|------------|
| Ortsparameter $\mu$     | 6,60027    | 6,4000     |
| Skalenparameter $\beta$ | 0,11410    | 0,6009     |
| Shapeparameter $\zeta$  | 0,07425    | -0,9931    |

Tabelle 4: Parameter der generalisierten Extrem- und Paretoverteilung für POT Werte der Wasserstände Warnemünde 1883 - 2008

| <b>Unterschreitungswahrscheinlichkeit <math>p_u</math></b> | <b>Wiederkehrintervall [Jahre]</b> | <b>GEV Wasserstand [m PN]</b> | <b>GPD Wasserstand [m PN]</b> |
|--|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0,108  | 10                                 | 6,51                          | 6,46                          |
| 0,822  | 50                                 | 6,80                          | 6,90                          |
| 0,911  | 100                                | 6,90                          | 6,95                          |
| 0,964  | 250                                | 7,03                          | 6,98                          |
| 0,982  | 500                                | 7,13                          | 6,99                          |
| 0,99   | 1000                               | 7,24                          | 7,00                          |

Tabelle 5: Wasserstände mit ausgewählten mittleren Eintrittswahrscheinlichkeiten vor Warnemünde (Stichprobe Warnemünde POT 1883 - 2008)

## 5.1.3 Diskussion der Ergebnisse

Die oben dargestellten Berechnungen zeigen teilweise sehr unterschiedliche Ergebnisse. Tabelle 6 fasst die berechneten extrem Wasserstände noch einmal zusammen.

| Wiederkehrsintervall [Jahre] | GEV der Jahresmaxima [m PN] | GEV POT 1872 - 2008 [m PN] | GPD POT 1872 - 2008 [m PN] | GEV POT 1883 - 2008 [m PN] | GPD POT 1883 - 2008 [m PN] |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 10                           | 6,43                        | <b>6,47</b>                | 6,42                       | 6,51                       | 6,46                       |
| 50                           | 6,64                        | <b>6,89</b>                | 7,00                       | 6,80                       | 6,90                       |
| 100                          | 6,72                        | <b>7,09</b>                | 7,24                       | 6,90                       | 6,95                       |
| 250                          | 6,82                        | <b>7,43</b>                | 7,55                       | 7,03                       | 6,98                       |
| 500                          | 6,88                        | <b>7,76</b>                | 7,77                       | 7,13                       | 6,99                       |
| 1000                         | 6,94                        | <b>8,18</b>                | 7,99                       | 7,24                       | 7,00                       |

*Tabelle 6: Extreme Wasserstände vor Warnemünde (grau hinterlegt: Werte außerhalb des erlaubten Extrapolationszeitraums; fett: vorgeschlagene Bemessungswerte)*

Die berechneten Extremwerte unterscheiden sich teilweise erheblich. Es ist zu beachten, dass Extrapolationen auf sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeiten (größer als der dreifache Zeitraum der Datenerhebung) im Allgemeinen als unzulässig angesehen wird, auch wenn Untersuchungen von Fröhle (2000) etwas anderes andeuten. Die mutmaßlich unzulässigen Extrapolationswerte sind in Tabelle 6 grau hinterlegt.

Weitere Unterschiede ergeben sich auf Grund der jeweils verwendeten Stichprobe. Die Zeitreihe der Jahresmaxima ab 1957 enthält im Mittel geringere Wasserstände als die POT-Werte, besonders wenn der Extremwert von 1872 in der Stichprobe enthalten ist. Als Grundlage für die Auswahl von Bemessungsgrößen wird die Verwendung der Stichprobe aller Peak over Threshold-Werte ab 1872 (POT 1872 - 2008) vorgeschlagen. Als Verteilungsfunktion wird die Generalisierten 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.

## 5.2 Dauer

Die Belastung von Deichen und Dünen wird neben dem höchsten Wasserstand auch von der Dauer einer Sturmflut bestimmt. Die Dauer einer Sturmflut wird als derjenige Zeitraum definiert, während dessen der Wasserstand höher als ein bestimmter Grenzwasserstand  $W_{\text{Grenz}}$  ist.  $W_{\text{Grenz}}$  wurde im Rahmen der Projektbearbeitung und in Absprache mit dem StAUN Rostock auf  $W_{\text{Grenz}}=6,0\text{m PN}$  festgelegt, da eine signifikante Belastung von Deichen und Dünen erst oberhalb dieses Wasserstands zu erwarten ist.

Die Dauern von Sturmfluten wurden für Warnemünde aus der Zeitreihe der Wasserstände von 1957 bis 2006 ermittelt. Aus dieser Zeitreihe wurden 68 Sturmfluten mit einem Maximalwasserstand höher als 6,0m PN ermittelt. Die Dauern dieser Sturmfluten betrug zwischen einer und sechsundzwanzig Stunden.

Auch die Dauern der Sturmfluten wurden mit den Verfahren der Extremwertstatistik untersucht. Da in den vorangegangenen Untersuchungen die generalisierte Extremwertverteilung (GEV) stets am besten an die vorhandenen Daten angepasst werden konnte, wurde auch für die weiteren Untersuchungen die GEV als Extremwertverteilung ausgewählt. In Abbildung 27 sind die Stichprobe der Sturmflutdauern sowie die für die Sturmflutdauern angepasste GEV mit dem zugehörigen 95% - Konfidenzintervall dargestellt.

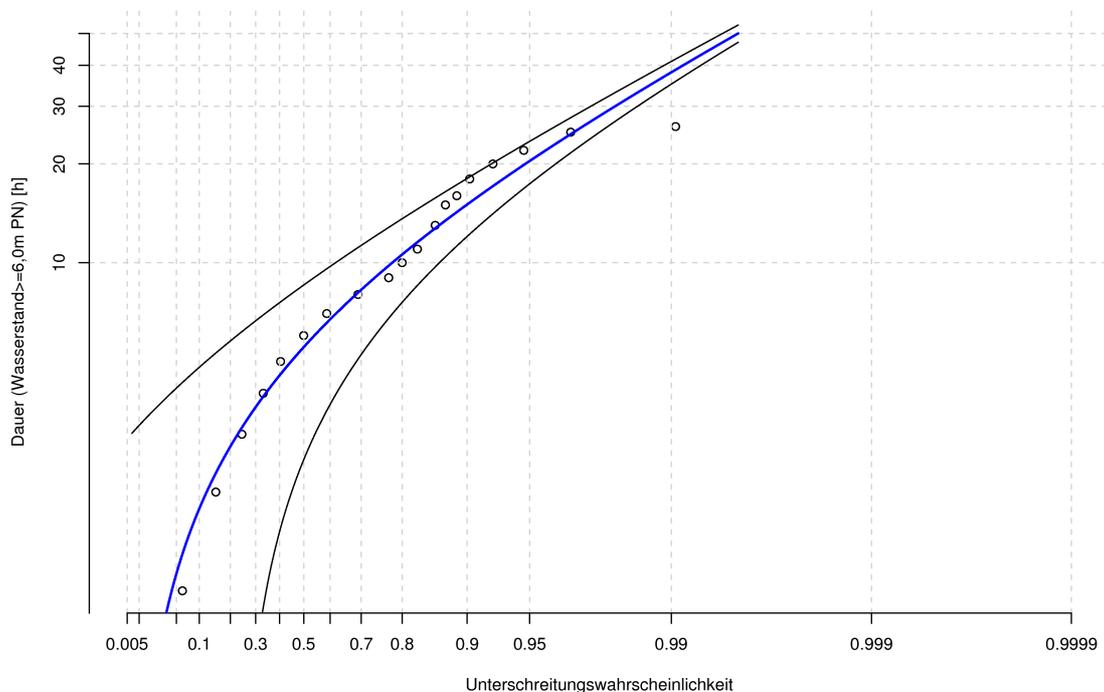


Abbildung 27: Anpassung der generalisierten Extremwertverteilung an die Stichprobe Dauern der Sturmfluten mit einem Wasserstand  $\geq 6,0\text{m PN}$  von 1965 bis 2006 in Warnemünde (Plotting Positionen: Goel, 1993)

Die angepasste GEV wird durch folgende Parameter definiert:

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| Ortsparameter $\mu$     | 4,234 |
| Skalenparameter $\beta$ | 3,332 |
| Shapeparameter $\zeta$  | 0,308 |

Aus der GEV - Verteilung der Sturmflutdauern wurden extreme Sturmflutdauern mit zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeit abgeleitet (Tabelle 7).

| Unterschreitungswahrscheinlichkeit $p_u$ | Wiederkehrintervall [Jahre] | Dauer [h] |
|--|-----------------------------|-----------|
| 0,927941                                 | 10                          | 17,46     |
| 0,985588                                 | 50                          | 33,25     |
| 0,992794                                 | 100                         | 42,79     |
| 0,997118                                 | 250                         | 58,93     |
| 0,998559                                 | 500                         | 74,54     |
| 0,999279                                 | 1000                        | 93,86     |

Tabelle 7: Wasserstände mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten vor Warnemünde

## 5.3 Seegang

Als Grundlage für die Berechnung extremer Seegangbedingungen sind für die Lokation Warnemünde mehrere Datensätze verfügbar:

- 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)

Für extremwertstatistischen Analysen wurden aus den Datensätzen die in Tabelle 8 aufgeführten Stichproben extrahiert und für die extremwertstatistische Berechnungen aufbereitet. Für die über längere Zeiträume vorliegenden Datensätze wurden dabei die Jahresmaxima der Wellenhöhen verwendet. Die Ergebnisse der WODLM-Simulationen wurden mittels Peak over Thershold-Stichproben analysiert, da der zeitliche Datenumfang für eine Betrachtung der Jahresmaxima zu kurz war. Zudem ist die Aussagefähigkeit der Extrapolationen für die WODLM-Simulationsrechnungen insbesondere für Ereignisse mit sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit (bzw. großem Wiederkehrintervall) aufgrund des begrenzten Datenumfangs begrenzt.

| Stichprobe | Stichprobenumfang   |
|------------|---|
| A          | Jahresmaxima der mittels Wind-Wellen-Korrelationsrechnung ermittelten Wellenhöhen |
| B          | Jahresmaxima der mit den SOHIP-Simulationen ermittelten Wellenhöhen               |
| C          | Peak over Threshold-Werte der mit den WODLM-Simulationen berechneten Wellenhöhen  |

Tabelle 8: Stichproben der Wellenhöhen

Die generalisierte Extremwertverteilung wurde mittels der Maximum-Likelihood-Methode an Stichprobe A und Stichprobe B (vgl. Tab. 8) angepasst. Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen die angepassten GEV mit den zugehörigen 95% - Konfidenzintervallen. In Tabelle 9 sind die für die beiden Stichproben ermittelten Parameter der GEV zusammengefasst. Die aus den ermittelten Verteilungen abgeleiteten Extremwerte sind in Tabelle 11 aufgeführt.

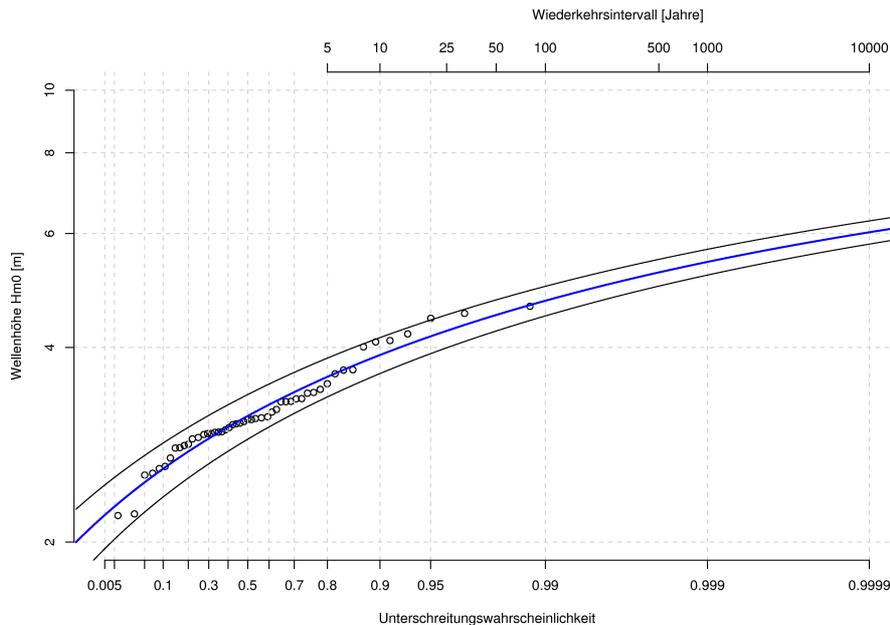
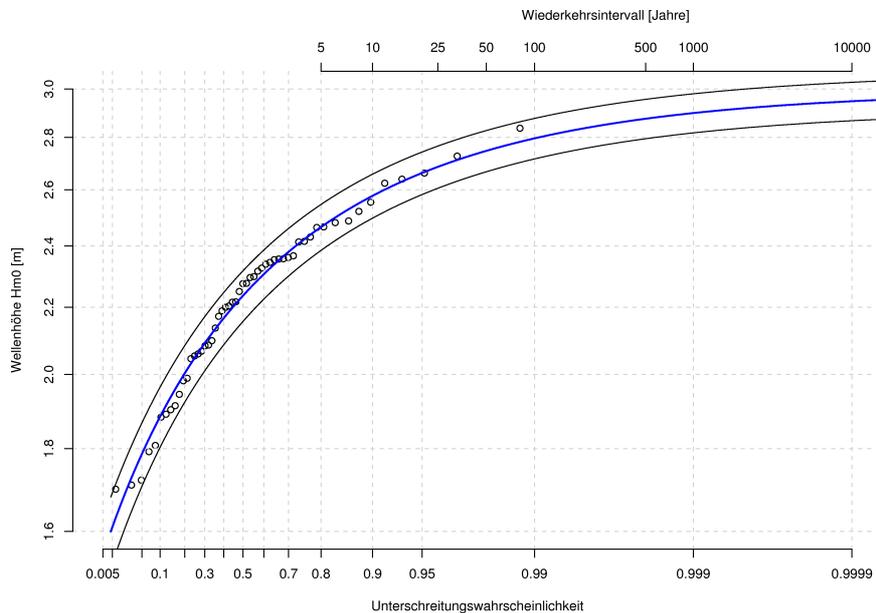


Abbildung 28: Anpassung der generalisierten Extremwertverteilung an Stichprobe A der Wellenhöhen vor Warnemünde (Plotting Positionen: Goel, 1993)

|                         | <b>Stichprobe A</b> | <b>Stichprobe B</b> |
|-------------------------|---------------------|---------------------|
| Ortsparameter $\mu$     | 2,97462             | 2,1426              |
| Skalenparameter $\beta$ | 0,43909             | 0,2706              |
| Shapeparameter $\zeta$  | -0,06412            | -0,3179             |

Tabelle 9: Parameter der GEV von Stichprobe A und B



*Abbildung 29: Anpassung der generalisierten Extremwertverteilung an Stichprobe B (Tab. 8) der Wellenhöhen vor Warnemünde (Plotting Positionen: Goel, 1993)*

Stichprobe C wurde mittels des Peak over Threshold-Verfahrens aus den WODLM-Simulationen gebildet. Dazu wurde ein Grenzwert von  $H_{m0} > 1,5\text{m}$  benutzt. Die Auswertung ergab eine Stichprobe mit einem Umfang von  $n=62$  statistisch unabhängigen Einzelereignissen.

An die Daten der Stichprobe C wurden beide Verteilungsfunktionen (GEV und GPD) mittels der Maximum-Likelihood-Methode angepasst und hieraus Extreme Wellenhöhen mit zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten ermittelt. Die Abbildungen 30 und 31 zeigen die angepassten GEV und die angepasste GPD mit den zugehörigen 95% - Konfidenzintervallen. Tabelle 10 zeigt die für die beiden Verteilungen ermittelten Parameter. Die aus den ermittelten Verteilungen abgeleiteten Extremwerte sind in ebenfalls in Tabelle 11 aufgeführt.

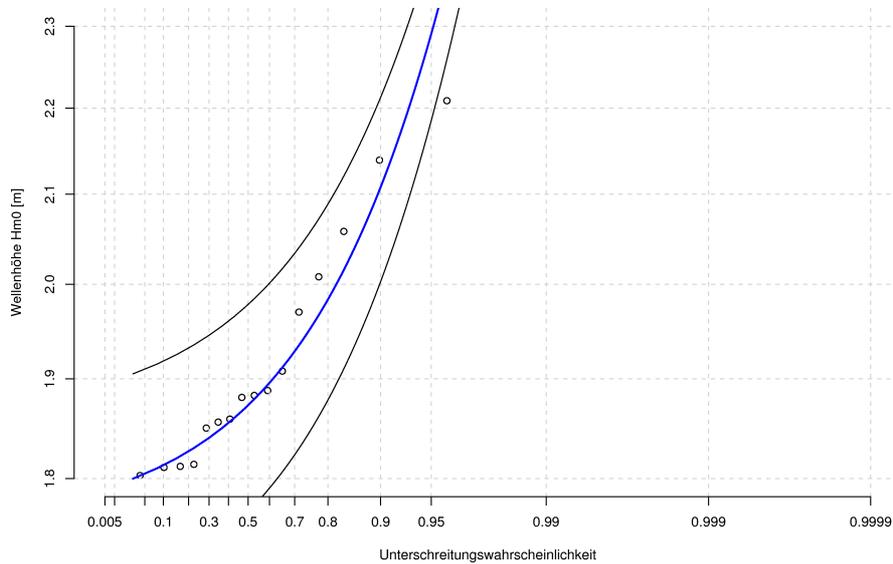
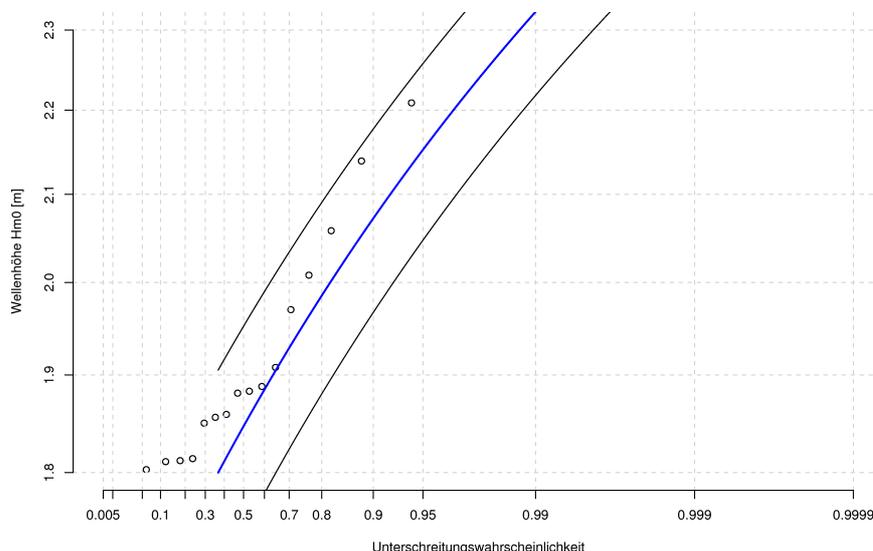


Abbildung 30: Anpassung der generalisierten Extremwertverteilung an Stichprobe C der Wellenhöhen vor Warnemünde (Plotting Positionen: Goel, 1993)

|                         | <b>GEV</b> | <b>GPD</b> |
|-------------------------|------------|------------|
| Ortsparameter $\mu$     | 1,85010    | 1,80000    |
| Skalenparameter $\beta$ | 0,05578    | 0,12853    |
| Shapeparameter $\zeta$  | 0,57811    | 0,05437    |

Tabelle 10: Parameter der GEV und GPD von Stichprobe C



*Abbildung 31: Anpassung der generalisierten Paretoverteilung an Stichprobe C der Wellenhöhen vor Warnemünde (Plotting Positionen: Weibull)*

Um die oben beschriebene statistischen Analysen besser bewerten zu können, wurden zusätzlich statistische Auswertungen mit den vor Warnemünde mittels einer Directional Waverider Boje gemessenen Wellenhöhen durchgeführt. Hierzu wurde aus den Daten eine Stichprobe POT  $H_{m0} \geq 2,20\text{m}$  ausgewählt.

Die Messungen wurden von Juli 1998 bis Juli 2002 vor Warnemünde mit einer Datawell Waverider Richtungswellenmessboje durchgeführt. Im Messzeitraum sind teilweise nicht unerheblich Lücken vorhanden, da die die Boje teilweise auch an anderen Lokationen eingesetzt werden musste. Insgesamt sind Daten für 36 Monate (3 Jahre) vorhanden. In diesem Zeitraum wurde eine maximale signifikante Wellenhöhe von  $H_{m0,max} = 2,96\text{m}$  gemessen.

Die Anpassung der GEV führte in diesem Fall nicht zu sinnvollen Ergebnissen, die mit der GPD ermittelten Extremwerte sind in Tabelle 11 aufgeführt. Es ist zu beachten, dass die Extrapolationen auf Eintrittswahrscheinlichkeiten mit einem Wiederkehrintervall größer als 10 Jahre nicht zulässig ist.

| Wiederkehrsintervall [Jahre] | GEV der Stichprobe A [m] | GEV der Stichprobe B [m] | GEV der Stichprobe C [m] | GPD der Stichprobe C [m] | GPD der Messwerte [m] |
|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 2                            | <b>3,13</b>              | 2,24                     | 1,95                     | 1,97                     | 1,97                  |
| 5                            | <b>3,60</b>              | 2,47                     | 2,11                     | 2,08                     | 2,93                  |
| 10                           | <b>3,89</b>              | 2,58                     | 2,29                     | 2,16                     | 3,08                  |
| 50                           | <b>4,49</b>              | 2,75                     | 3,13                     | 2,32                     | 3,41                  |
| 100                          | <b>4,72</b>              | 2,80                     | 3,81                     | 2,39                     | 3,54                  |
| 250                          | <b>5,02</b>              | 2,85                     | 5,26                     | 2,48                     | 3,70                  |
| 500                          | <b>5,22</b>              | 2,88                     | 6,99                     | 2,54                     | 3,82                  |
| 1000                         | <b>5,43</b>              | 2,90                     | 9,57                     | 2,60                     | 3,94                  |

Tabelle 11: Extremwerte der signifikanten Wellenhöhe vor Warnemünde (grau hinterlegt: Werte außerhalb des erlaubten Extrapolationszeitraums; fett: vorgeschlagene Bemessungswerte)

## Diskussion der Ergebnisse

Die in Tabelle 11 dargestellten Extremwellenhöhen unterscheiden sich deutlich. Für Bemessungsaufgaben werden die Extremwerte empfohlen, die aus Stichprobe A (Jahresmaxima der mittels Wind-Wellen-Korrelation ermittelten Wellenhöhen) ermittelt wurden, weil diese Ausgangsdaten grundsätzlich die geringsten Abweichungen zu den Messungen aufweisen und zudem die Anpassung an die statistischen Verteilungen immer vergleichsweise gut war.

Die Extremwerte aus Stichprobe B (Jahresmaxima der Wellenhöhen die mit den SOHIP-Simulationen ermittelt wurden) scheinen durchgängig zu niedrig, da an der Lokation schon mehrfach höhere Wellenhöhen gemessen wurden (vgl. Stichprobe Messwerte). Die Ergebnisse der SOHIP-Simulationen können daher für extremwertstatistische Untersuchungen nicht empfohlen werden. Dies entspricht insofern den Erwartungen, dass die den Simulation zugrunde liegenden Windfelder auch nur im Mittel zutreffend sind, im Einzelwert aber starke Abweichungen zeigen.

Die WODLM-Simulation können aufgrund des vergleichsweise kurzen Simulationszeitraums nicht direkt für extremwertstatistische Berechnungen herangezogen werden. Aufgrund des zu geringen Datenumfangs differieren die Ergebnisse die mit unterschiedlichen Extremwertverteilung erzielt werden im Bereich großer Wiederkehrintervalle sehr stark.

Direkte Extremwertberechnungen aus den Seegangsmessungen weisen auf Grund des zu geringen Datenumfangs ebenfalls sehr großen Ungenauigkeiten auf.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Seegangssimulationen – zumindest für die verwendeten instationären Windfelder aus den Hipocas-Daten und aus den DWD-LM-Modell – zu deutlich zu geringen extremen Wellenhöhen führen. Da dies bei stationären Windfelder nicht der Fall ist – hier

kommt es eher zu einer Überschätzung der Wellenhöhen – wird dieses Modellverhalten zunächst auf die verwendeten Windfelder zurückgeführt. Weiterführende Untersuchungen hierzu sind dringend zu empfehlen. Hierbei sind neben der detaillierteren Analyse der Windfelder zwangsläufig auch Wellenmessungen mit in die Untersuchungen einzubeziehen. Dies ist insbesondere erforderlich, da das numerische Modell mittlere Verhältnisse vergleichsweise sehr gut wiedergibt.

### 5.4 Kombination Wasserstand – Wellenhöhe

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.

In Abbildung 32 sind als erster Vergleich zeitgleich gemessene Wasserstände und Wellenhöhen  $H_{m0}$  für die Lokation Warnemünde dargestellt. Die Abbildung zeigt, 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. Extreme Wasserstände in der Ostsee sind somit aufgrund des komplexen Wirkungsmechanismus ihrer Entstehung eben nicht nur Windstauabhängig sondern auch von vielen anderen Faktoren abhängig (z.B. Beckenfüllung, Schwingungen, etc.).

Aus Abbildung 32 wird jedoch sehr deutlich, dass die statistische Verteilung der Wellenhöhen für extrem hohe, extrem niedrige und mittlere Wasserstände deutlich unterschiedliche ist. Hieraus wird ein statistischer Zusammenhang abgeleitet.

Weiterhin ist zu prüfen, ob es einen windrichtungsabhängigen Zusammenhang zwischen Wasserständen und Wellenhöhen gibt. Abbildung 33 zeigt beispielhaft zeitgleich gemessene Wasserstände und Wellenhöhen bei einer Windrichtung von  $\Theta_w=290^\circ$  (ca. WNW). Offensichtlich ergibt sich kein funktionaler oder annähernd funktionaler Zusammenhang (Korrelation) zwischen Wellenhöhen und Wasserständen. Für die anderen Windrichtungen ergibt sich dies in gleicher Weise.

Für die Lokation Warnemünde können demnach Wasserstände und Wellenhöhen als statistisch abhängige Größen betrachtet werden. Dies ist auch für andere Lokation an der deutschen Ostseeküste zu erwarten, muss jedoch im Einzelfall überprüft werden.

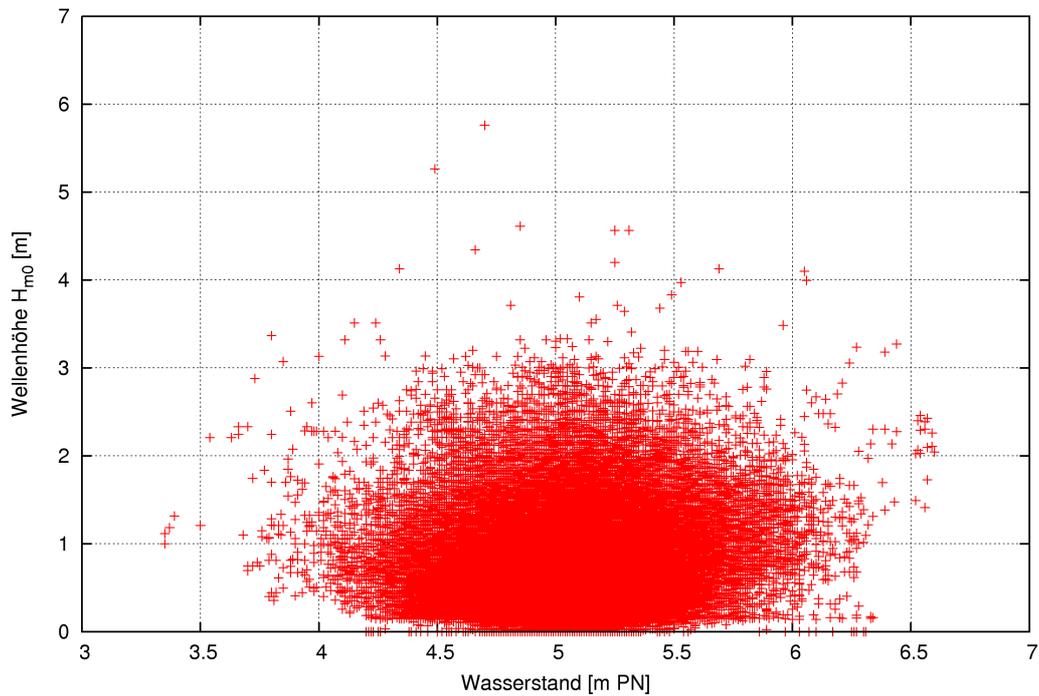


Abbildung 32: Zeitgleich gemessene Wasserstände und Wellenhöhen vor Warnemünde

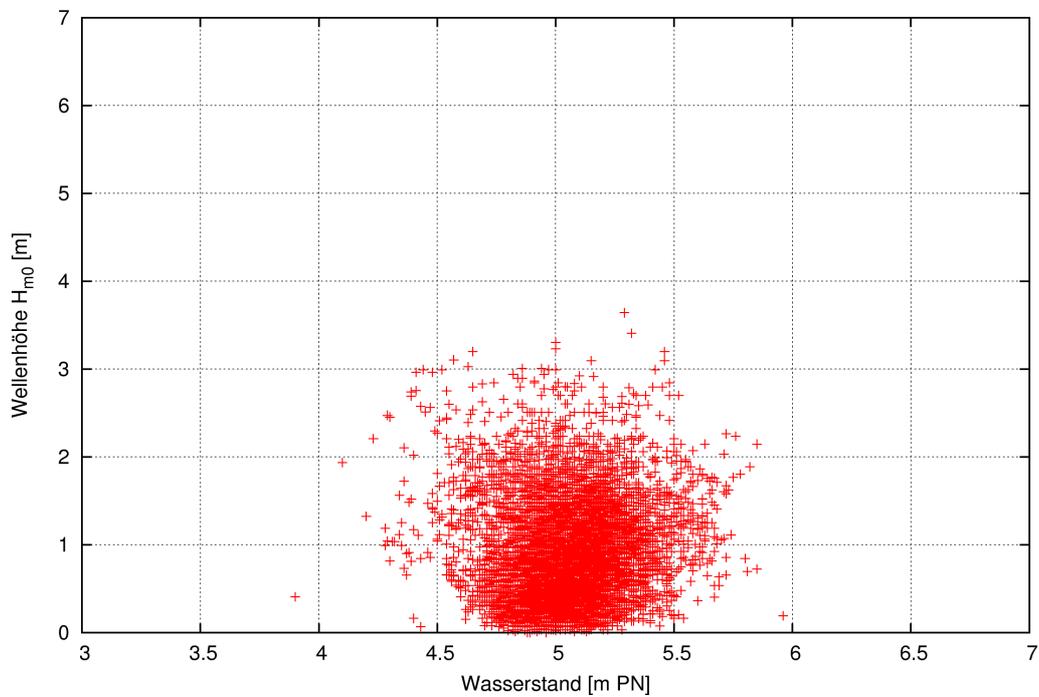


Abbildung 33: Zeitgleich gemessene Wasserstände und Wellenhöhen vor Warnemünde bei einer Windrichtung von  $\Theta_w=290^\circ$

Da Wasserstand und Wellenhöhe als statistisch abhängige Zufallsvariablen betrachtet werden, wurden die gemeinsamen Eintrittswahrscheinlichkeiten mit der sog. „kombinierten univariaten“ Methode berechnet. Die Anwendung der bivariaten Methode wurde zunächst verworfen, da die Anpassungen der Extremwertverteilungen an die einzelnen Parameter bei der „kombinierten univariaten“ Methode besser bewertet werden können (vergl. EAK, 2002). Hier bleiben für die Zukunft weitere offene Fragen.

Für die Anwendung der „kombinierten univariaten“ Methode wurde als vorgegebene Zufallsvariablen die Wasserstände benutzt. Die Wellenhöhen wurden der Wasserstandsverteilung mit einer Auflösung von  $\Delta W_{st}=0,5\text{m}$  zugeordnet. Die berechneten kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden für die graphische Darstellung in einem zweidimensionalen Gitter gerastert und für unterschiedliche (kombinierte) Eintrittswahrscheinlichkeiten dargestellt (Abbildung 34).

Aus Abbildung 34 können die bivariaten Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen und Seegang für weiterführende Analysen ermittelt werden. Hierbei gehen die jeweiligen Einzel-Eintrittswahrscheinlichkeiten gegen die für die univariate Analyse ermittelten Größen.

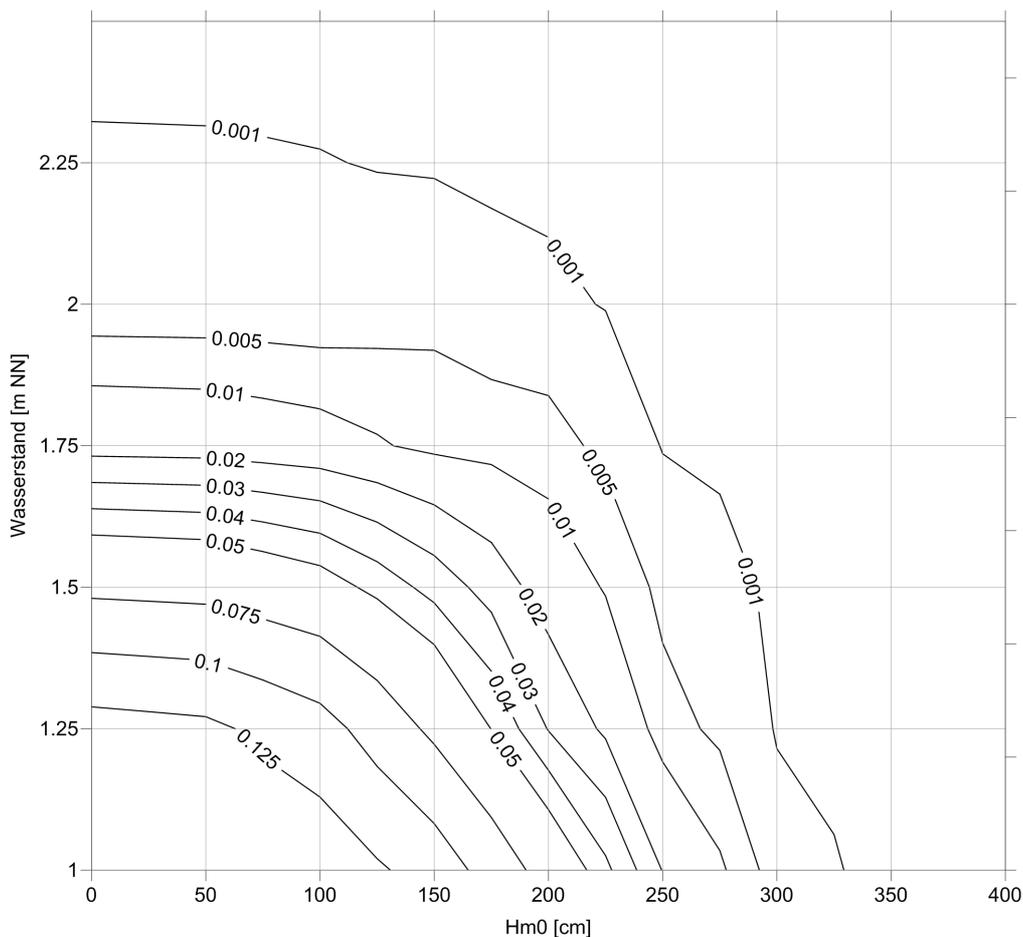
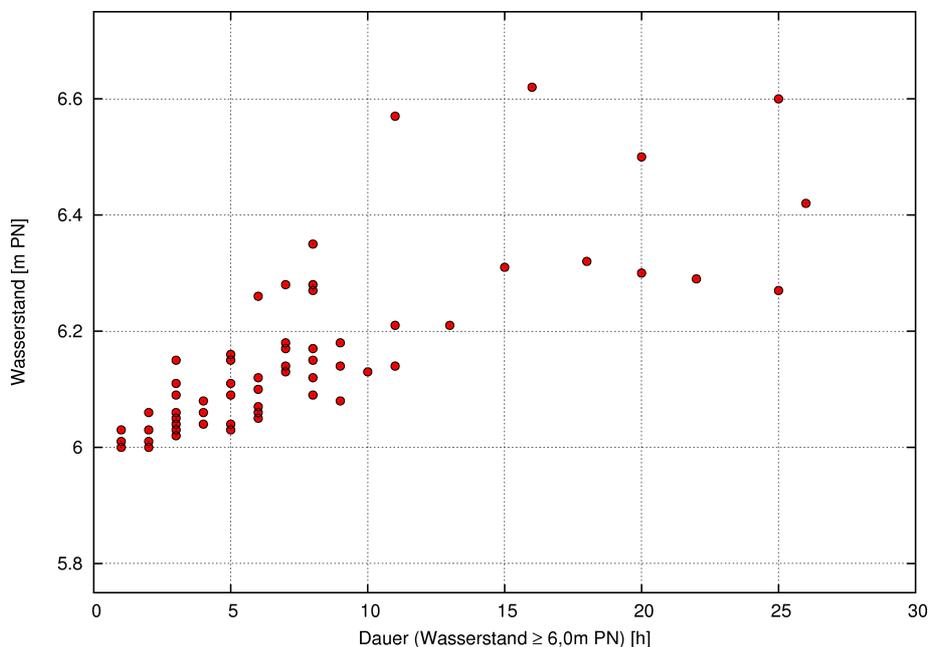


Abbildung 34: Kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten Wasserstand / Wellenhöhe

## 5.5 Kombination Wasserstand – Dauer

Grundsätzlich überschreiten höher auflaufenden Sturmfluten einen bestimmten (definierten) Wasserstand länger, da die Geschwindigkeit der Wasserstandänderungen begrenzt ist. Abbildung 35 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Für extrem hoch auflaufende Sturmfluten trifft dieser Zusammenhang nicht mehr zu, wie die Abbildung ebenfalls verdeutlicht. Wenn beispielsweise nur diejenigen Sturmfluten betrachtet werden, bei denen der maximale Wasserstand höher als 6,40m PN aufgetreten ist fällt auf, dass die Dauer keinen Zusammenhang mit dem maximalen Wasserstand mehr aufweist.



## 6 Auswahl von Bemessungsgrößen für ausgewählte Bauwerke, Bemessungsverfahren und Schutzziele

### 6.1 Eingangsgrößen für übergeordnete Küstenabschnitte

Für die Bemessung von Küstenschutzbauwerken werden für jedes zu bemessende Bauwerk die entsprechenden Bemessungsparameter abgeleitet. In der Praxis werden teilweise vorgegebene Bemessungsparameter für einzelne Küstenabschnitte genutzt und ggf. auch gesetzlich vorgeschrieben (z.B. Bemessungshochwasserstände in Generalplänen). Die Bemessungsparameter für einen einzelnen Küstenabschnitt sind dabei prinzipiell konstant.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde für die gesamte deutsche Ostseeküste übergeordnete Küstenabschnitte definiert. Als Kriterium für die Festlegung von Küstenabschnitten als Grundlage für weitere Untersuchungen wurde insbesondere die Homogenität der Abschnitte bezüglich der Auswahl von Bemessungsdaten (hier im wesentlichen Wasserstände und Seegang) definiert. Dieses Kriterium wurde nach küstenwasserbaulichen Gesichtspunkten zunächst qualitativ-subjektiv bewertet. In einem zweiten Schritt, der im Folgenden noch näher erläutert wird, wurde die qualitativ-subjektive Bewertung auf der Grundlage von Ergebnissen numerischer Simulationsrechnungen verifiziert. Im Resultat wurde die deutsche Ostseeküste in insgesamt 24 übergeordnete Küstenabschnitte (13 Abschnitte für Mecklenburg-Vorpommern, 11 Abschnitte für Schleswig-Holstein) eingeteilt. Diese sind in Abbildung 36 zusammengestellt.

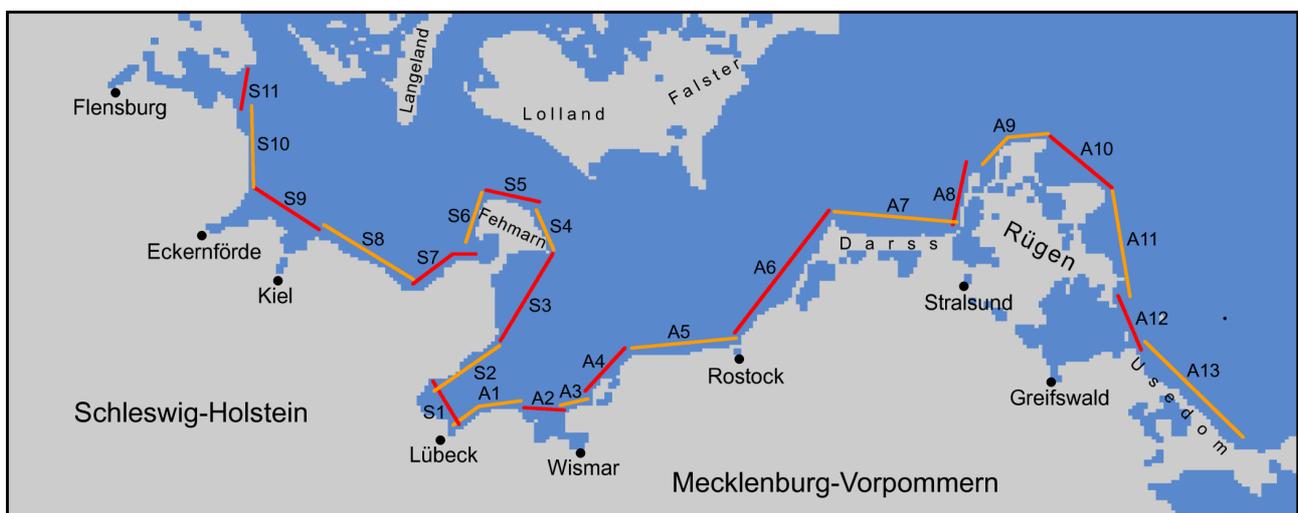


Abbildung 36: Räumlich übergeordnete Küstenabschnitte

Als Grundlage für die Bewertung der Variabilität des Seegangs innerhalb der gewählten Abschnitte und somit auch für die Signifikanz der Ergebnisse in den einzelnen Bereichen wurden in einer Parameterstudie Simulationsrechnungen mit dem numerischen Seegangmodell SWAN durchgeführt. Für die 24 übergeordneten Küstenabschnitte wurde die Verteilung der Wellenparameter über den jeweiligen Küstenabschnitt ermittelt.

Die Ergebnisse der Parameterstudie sind in Abbildung 37 und Abbildung 38 beispielhaft als Variabilität der Wassertiefe entlang eines gewählten Schnitts für die Küstenabschnitte A6 „Warnemünde – Fischland – Darß“ und S6 „Fehmarn West“ am Beispiel der signifikanten Wellenhöhen ( $H_{m0}$ ), der mittleren Wellenperioden ( $T_{02}$ ) und der Wellenanlafrichtungen ( $\Theta_M$ ) dargestellt.

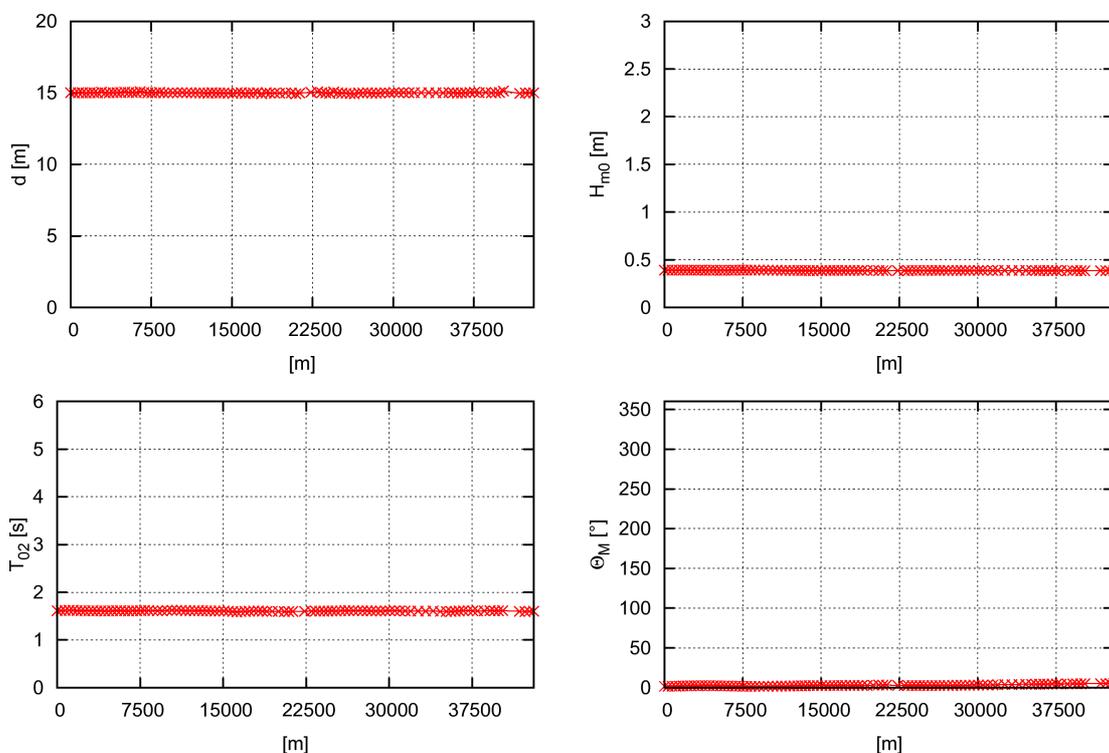


Abbildung 37: Variabilität von der Wassertiefe entlang des gewählten Schnittes, der signifikanten Wellenhöhen ( $H_{m0}$ ), die Wellenperioden ( $T_{02}$ ) und die Wellenanlafrichtungen ( $\Theta_M$ ) für den Küstenabschnitt A6 bei Windrichtung „Nord“ ( $0^\circ$ )

Es ist zu erkennen, dass die signifikanten Wellenhöhen in den definierten Schnitten als konstant angesehen werden können. Für andere Windrichtung ergeben sich teilweise größere Unterschiede, die Variabilität der Wellenparameter in den Küstenabschnitten liegt über weite Bereiche der gewählten Küstenabschnitte aber unter 10 %. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich auch für die Wellenperioden ( $T_{02}$ ) und die Wellenanlafrichtungen ( $\Theta_M$ ). Insgesamt wird festgestellt, dass eine Festlegung von einheitlichen Wellenparametern für jeweilige Küstenabschnitte eine zulässige Vereinfachung darstellt.

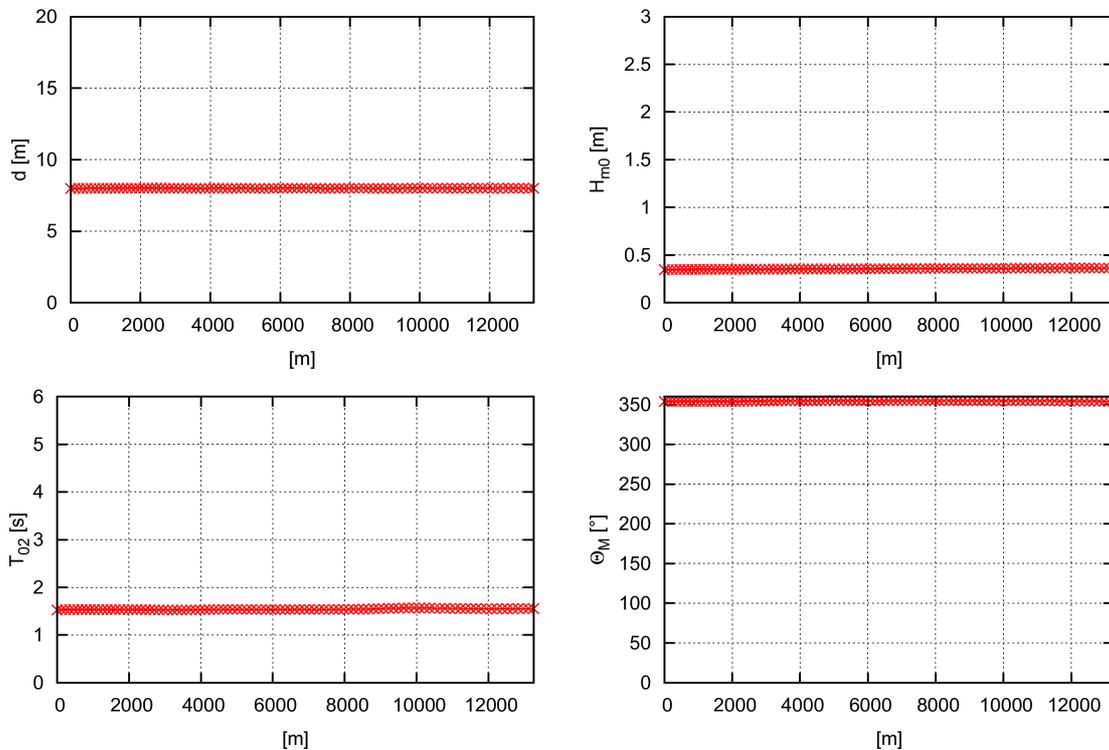


Abbildung 38: Variabilität von der Wassertiefe entlang des gewählten Schnittes, der signifikanten Wellenhöhen ( $H_{m0}$ ), die Wellenperioden ( $T_{02}$ ) und die Wellenanlaufrichtungen ( $\theta_M$ ) für den Küstenabschnitt S6 bei Windrichtung „Nord“ ( $0^\circ$ )

## 6.2 Deterministische Bemessung auf der Grundlage von Eintrittswahrscheinlichkeiten

Die Bemessungsparameter können auf Grundlage der kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten ermittelt werden. Dazu ist es erforderlich die Eintrittswahrscheinlichkeit für das Bemessungsereignis, dem das zu bemessende Bauwerk standhalten soll, zu definieren. Dies wird in der Praxis häufig durch die Angabe des mittleren Wiederkehrintervalls durchgeführt; es wird also beispielsweise gegen ein „100 jährliches Ereignis“ bemessen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit beträgt in diesem Fall  $p=0,01$  in jedem Jahr.

Für den Küstenabschnitt Warnemünde können aus Abbildung 34 für diese vorgegebene Eintrittswahrscheinlichkeit eine Vielzahl statistisch gleich wahrscheinlicher Kombinationen für die Bemessungsgrößen Wasserstand und Seegang ermittelt werden (Tabelle 12). Alle angegebenen Paare aus Wasserstand / Wellenhöhe sind gleich wahrscheinlich und ein Küstenschutzbauwerk muss gegen alle Kombinationen ausreichend bemessen werden.

| Wasserstand [m PN] | Wellenhöhe Hm0[m] |
|--------------------|-------------------|
| 1,00               | 2,75              |
| 1,25               | 2,40              |
| 1,50               | 2,25              |
| 1,75               | 1,40              |
| 1,85               | 0,00              |

*Tabelle 12: Kombinationen der Bemessungsgrößen Wasserstand / Wellenhöhen für die Lokation Warnemünde mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit  $p=0,01$  ( 100 jährliches Ereignis)*

Alternativ ist es möglich das Schutzziel nicht über ein mittleres Wiederkehrintervall zu definieren, sondern als Eintrittswahrscheinlichkeit eines entsprechenden Ereignisses innerhalb eines Bemessungszeitraums zu betrachten (Abb. 19). So beträgt beispielsweise die Eintrittswahrscheinlichkeit für ein Ereignis, das in den nächsten 50 Jahren (Bemessungszeitraum) mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 % eintritt  $p=0,001$ !

## 6.3 Probabilistische Bemessung

Vollständig probabilistische Bemessungen von Bauwerke erfordern die komplette Verteilungsfunktion der Belastungsgrößen (Wasserstände, Dauern, Seegang, etc.) sowie deren statistische Abhängigkeiten und die zugehörigen Unsicherheiten. Diese wurden für das Untersuchungsgebiet Warnemünde in den Kap. 5.1. bis 5.5 im Detail erläutert und werden daher in diesem Zusammenhang nicht noch einmal dargestellt.

## 6.4 Sedimenttransportuntersuchungen

Für Sedimenttransportuntersuchungen und beispielsweise die Bemessung von Sandvorspülungen werden im allgemeinen mittlere Zustände maßgebend. Extremwerte mit zugehörigen geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten treten zu selten ein, um signifikante Beiträge zum Gesamt-Sedimenttransport zu liefern.

Hier werden also mittlere Ereignisse und die statistische Verteilung (Häufigkeitsverteilung) der jeweiligen Parameter benötigt. Für die mit der Bemessung einer Sandvorspülung durchzuführende Sedimenttransportberechnung ist beispielsweise eine Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen in Kombination mit mittleren Wasserständen erforderlich.

Aus den im Forschungsvorhaben ermittelten Zeitserien können leicht Häufigkeitsverteilungen berechnet werden. Für Warnemünde wurde aus der Zeitserie der Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen eine zweidimensionale Häufigkeitsverteilung berechnet (Ausschnitt: Abbildung 39). Die gesamte Tabelle ist im Anhang A dargestellt.

# Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau

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

Zugehörige mittlere Wasserstände sind hier nicht dargestellt, können aber ebenfalls leicht ermittelt werden.

| Wellenhöhe $H_{m0}$ | % | N              | NNE           | NE            | ENE           | E              | ESE             | SE              |
|---------------------|---|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
|                     |   | [348,75;11,25) | [11,25;33,75) | [33,75;56,25) | [56,25;78,75) | [78,75;101,25) | [101,25;123,75) | [123,75;146,25] |
| [0,00;0,25)         |   | 7,20           | 6,31          | 0,00          | 1,86          | 0,73           | 0,27            | 0,94            |
| [0,25;0,50)         |   | 2,85           | 7,87          | 1,37          | 0,83          | 0,27           | 0,10            | 0,16            |
| [0,50;0,75)         |   | 0,70           | 3,91          | 0,32          | 0,04          | 0,08           | 0,04            | 0,00            |
| [0,75;1,00)         |   | 0,34           | 1,12          | 0,13          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            |
| [1,00;1,25)         |   | 0,15           | 0,30          | 0,05          | 0,00          | 0,00           | 0,03            | 0,00            |
| [1,25;1,50)         |   | 0,09           | 0,08          | 0,01          | 0,00          | 0,00           | 0,01            | 0,00            |
| [1,50;1,75)         |   | 0,03           | 0,03          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            |
| [1,75;2,00)         |   | 0,02           | 0,01          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            |
| [2,00;2,25)         |   | 0,01           | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            |
| [2,25;2,50)         |   | 0,00           | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            |
| [2,50;2,75)         |   | 0,00           | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            |
| [2,75;3,00)         |   | 0,00           | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            |
| [3,00;3,25)         |   | 0,00           | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            |
| <b>SUMME</b>        |   | <b>11,39</b>   | <b>19,64</b>  | <b>1,89</b>   | <b>2,73</b>   | <b>1,08</b>    | <b>0,46</b>     | <b>1,10</b>     |

Abbildung 39: Häufigkeiten Wellenhöhe / Wellenanlaufrihtung Warnemünde (Ausschnitt)

## 6.5 Transformation an das zu bemessende Bauwerk

Die Seegangparameter wurden für den räumlich übergeordneten Küstenabschnitt „Warnemünde“ in einer Wassertiefe von etwa 10m abgeleitet. Die üblichen Bemessungsverfahren, z.B. zur Bestimmung der Bestickhöhe eines Deiches, erfordern als Eingangsparameter die Wellenhöhe am Deichfuß. Die in Abschnitt 6.2 definierten Wellenhöhen müssen daher bis an den Deichfuß transformiert werden. Für Warnemünde wurde diese Transformation mittels kleinräumiger hoch aufgelöster SWAN-Simulationen berechnet. In Abbildung 40 ist die dafür verwendete Bathymetrie des Küstenabschnitts Warnemünde dargestellt.

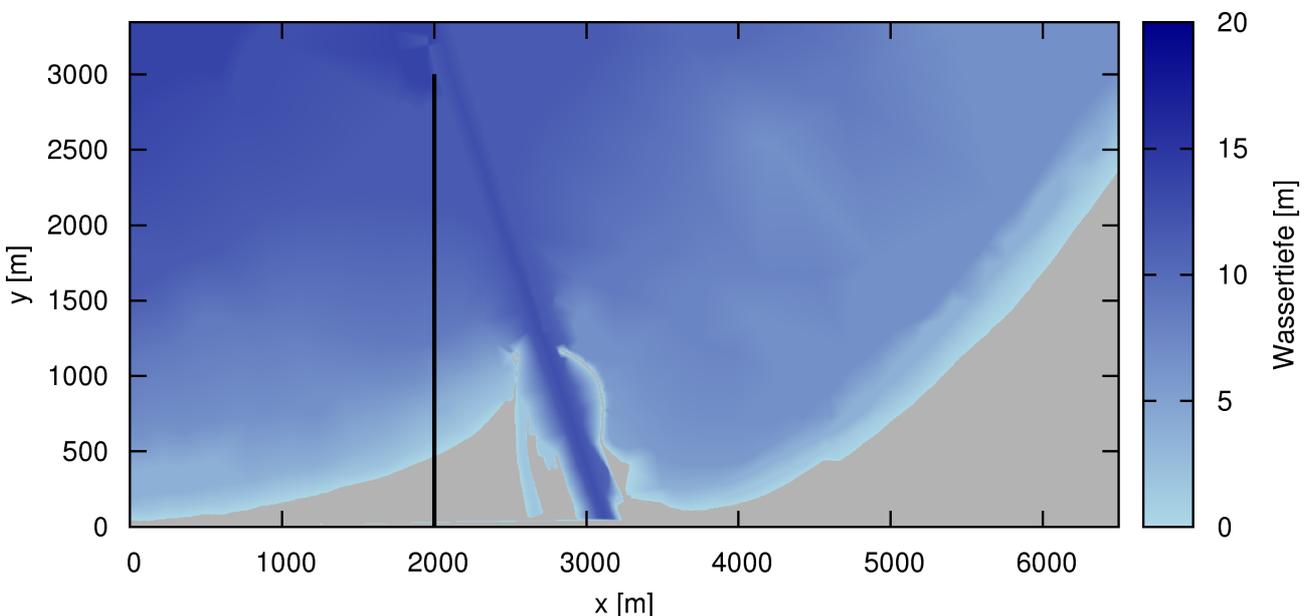


Abbildung 40: Bathymetrie für den Küstenabschnitt Warnemünde ( $dx=dy=5m$ )

# Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau

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

---

Abbildung 41 zeigt die beispielhaft die flächenhafte Verteilung des Seegangs, wenn am nördlichen Rand des Simulationsgebietes eine Wellenhöhe von  $H_{m0}=2,0\text{m}$  eingesteuert werden.

Die Seegangparameter wurden zusätzlich entlang des dargestellten Schnittes ausgegeben und können für die Lösung von Bemessungsaufgaben an beliebiger Stelle ausgewertet werden. Für das dargestellte Beispiel ergibt sich am Strand bei einer Wassertiefe von  $d=1,07\text{m}$  eine Wellenhöhe von  $H_{m0}=0,67\text{m}$ .

In Warnemünde können die Seegangtransformationen aufgrund der vergleichsweise einfachen orografischen Struktur der Umgebung mit uniformen Windfeldern durchgeführt werden. Für andere, stärker gegliederte Gebiete an der deutschen Ostseeküste (z.B. im Fehmarnsund) können dazu auch die vom DWD im Rahmen des Verbundprojektes berechneten Windfelder verwendet werden.

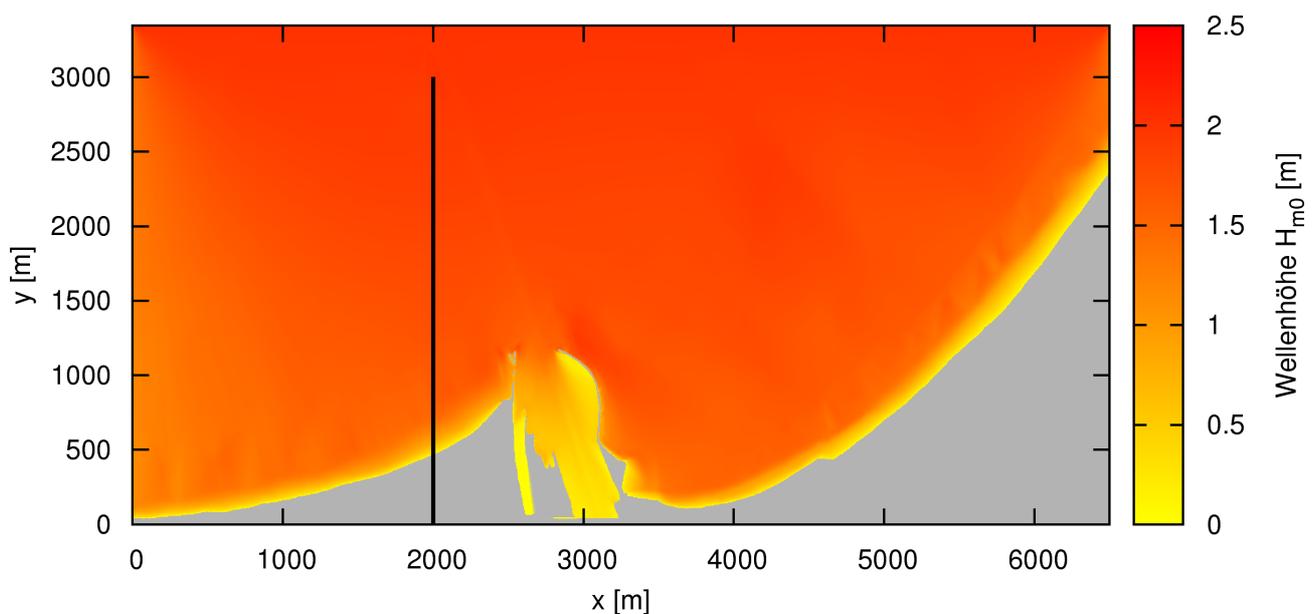


Abbildung 41: Flächenhafte Wellenhöhenverteilung im Küstenabschnitt Warnemünde

## **7 Vergleich der Bemessungsparameter die in SEBOK A bzw. SEBOK B ermittelt wurden**

Der Vergleich der Bemessungsparameter die in SEBOK A bzw. SEBOK B ermittelt wurden, wurde in Zusammenarbeit der jeweiligen Projektbearbeiter erstellt. Der Bericht ist als externes Dokument verfügbar.

## 8 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens „SEBOK B“ war die Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer Größen als Grundlage für die Bemessung von Küstenschutzanlagen an der deutsche Ostsee.

Im Forschungsansatz von SEBOK B sollten dabei ein Ansatz auf der Grundlage von statistischen Analysen möglichst umfassender Zeitserien aus Messungen, statistischen sowie physikalisch-numerischen Modellen entwickelt werden.

Dazu wurden zunächst die vorhandenen Messdaten (Wasserstände, Seegang, Wind) zusammengestellt, vereinheitlicht und plausibilisiert. Da für Seegang keine ausreichenden Messdaten vorhanden waren, wurden Zeitserien der Seegangparameter berechnet. Dazu wurden teilweise Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen für mehrere Lokationen an der deutschen Ostseeküste durchgeführt. Daneben wurden zwei unterschiedliche Langzeit-Seegangmodelle für die deutsche Ostseeküste entwickelt, verifiziert und damit Simulationsrechnungen durchgeführt. Als Ergebnis liegen Seegangsimulationen für 57 Jahre für die gesamte deutsche Ostseeküste vor.

Die ermittelten Zeitserien der Wasserstände und des Seegangs wurden mit extremwertstatistischen Methoden beispielhaft für die Lokation Warnemünde analysiert. Für die Parameter Wasserstand, Dauer von Extremereignissen und Wellenhöhe wurde extremwertstatistische Berechnungen durchgeführt und die komplette Verteilung extremer Ereignisse mit zugehöriger Verteilungsfunktion wurde bestimmt. Für die genannten Parameter wurden Extremwerte (mit entsprechend geringer Eintrittswahrscheinlichkeit) abgeleitet.

Für die Parameter Wasserstand und Wellenhöhe wurde eine Methode zur Ermittlung von kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten erfolgreich angewendet. Die Unsicherheiten bei der Ermittlung der kombinierter Eintrittswahrscheinlichkeiten sind derzeit noch insbesondere wegen der begrenzten Datenlage vergleichsweise groß. Hier wird noch Raum für weitere Forschungsarbeiten gesehen.

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

Für die Lokation Warnemünde wurden aus den Ergebnissen der statistischen Analysen Bemessungsgrößen für ausgewählte Bauwerke exemplarisch festgelegt. Die Größen wurden für konkrete Bemessungsaufgaben bis direkt an die Küstenlinie transformiert. Um diese Größen verbindlich festlegen zu können sind die Schutzziele aber durch die Küstenländer vorzugeben.

# Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau

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

---

Insgesamt wurde das Forschungsziel des Vorhabens erreicht. Durch die Langzeit-Seegangssimulationsrechnungen wurde die Datenlage für die Abschätzung der Seegangsverhältnisse in der deutschen Ostsee und an der deutschen Ostseeküste deutlich verbessert.

Weiterer Forschungsbedarf wird bei der numerischen Simulation von Ereignissen mit hohen Wellenhöhen (Wiederkehrintervall geringer als etwa 1-2 Jahre) gesehen. Diese wurden sowohl vom WODLM-Modell als auch vom SOHIP-Modell zum Teil deutlich unterschätzt, obwohl die mittleren Verhältnisse vergleichsweise gut wiedergegeben wurden. Dieses Modellverhalten wird zunächst auf die Genauigkeit der verwendeten instationären Windfelder zurückgeführt, da eine systematische Unterschätzung der Wellenhöhen bei stationären Windfeldern bis jetzt nicht beobachtet wurde.

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

Rostock, den 24.06.2009

Christian Schlamkow

(Projektbearbeiter)

Peter Fröhle

(Projektleiter)

Abschließend bedanken wir uns beim StAUN Rostock, beim DWD, beim BSH, beim ALR Kiel (jetzt LKN Husum) sowie beim Marineamt in Rostock für die tatkräftige Unterstützung bei der Datenbeschaffung und -bewertung, bei der Durchführung des Projekts sowie bei den Simulationsrechnungen.

## 9 Schrifttum

- Booij et al., 2001: N. Booij, L. Holthuijsen, J. Battjes: "Ocean to Near-Shore Wave Modelling with SWAN", Delft University of Technology, 2001
- CERC, 2003: 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.; Liebsch, G.: Zur Variabilität des Meeresspiegels an der Küste von Mecklenburg-Vorpommern, Zeitschrift für geologische Wissenschaften, 200, Bd 28, Heft 6, S. 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, S. 1 - 164.
- Fröhle, P.; 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.; 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 Extrem Value distribution, in: Stochastic Hydrology and Hydraulics, Springer-Verlag, 1993
- Holthuijsen et al., 2003: L.H. Holthuijsen, N. Booij, R.C. Ris, I.J.G. Haagsma, A.T.M.M. Kieftenburg, E.E. Kriezi, M. Zijlema: "SWAN Cycle III version 40.20 – User Manual", <http://fluidmechanics.tu-delft.nl/swan/>
- HR Wallingford, 2000: The Joint Probability of Waves and Water Levels: JOIN-SEA, Report SR 537, November 1998, Re-issued May 2000
- Schlamkow, Christian; Fröhle, Peter: 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.; Fröhle, P.: Gegenüberstellung ausgewählter Verfahren der Seegangsvorhersage. In: Institut für Bauingenieurwesen: Rostocker Berichte aus dem Institut für Bauingenieurwesen, Heft 13, Rostock. , 2004.

# Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau

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

---

Schlamkow, Christian; Fröhle, Peter: Entwicklung einer Methode zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der Ostsee : SEBOK B. In: Hafentechnische Gesellschaft e.V.: Tagungsband HTG-Kongress 2007. , 2007

Schlamkow, C.; Fröhle, P.: Numerische Simulation von Seegang im Vergleich zu Seegangsmessungen und Vorhersageverfahren. In: HTG-Kongress: Tagungsband. Bremen, 2005.

Schlamkow, C.; Fröhle, P.; Radomski, J.; Kohlhase, S.; Cheng, H.-Y.; Yeh, S.-P.; Kao, C.-C.: Numerical on-line modeling 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. & Kayser, B.: A High Resolution Spherical Grid Topography of the Baltic Sea – revised edition, Proceedings of the Baltic Sea Science Congress, Stockholm 25-29. November 2001

Weisse R. et al., 2003: Wind- und Seegangsklimatologie 1958-2001 für die südliche Nordsee basierend auf Modellrechnungen, GKSS, 2003/10

# Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau

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

## Anhang I – Häufigkeitstabelle von Wellenhöhe / Wellenanlaufrichtung in Warnemünde

| Wellenhöhe H <sub>0.9</sub> | Wellenanlaufrichtung θ <sub>w</sub> |               |               |               |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | SUMME  |
|-----------------------------|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|
|                             | N                                   | NNE           | NE            | ENE           | E              | ESE             | SE              | SSE             | S               | SSW             | SW              | WSW             | W               | WNW             | NW              | NNW             |        |
| %                           | [348,75;11,25]                      | [11,25;39,75] | [39,75;56,25] | [56,25;78,75] | [78,75;101,25] | [101,25;123,75] | [123,75;146,25] | [146,25;168,75] | [168,75;191,25] | [191,25;213,75] | [213,75;236,25] | [236,25;258,75] | [258,75;281,25] | [281,25;303,75] | [303,75;326,25] | [326,25;348,75] |        |
| [0,00;0,25)                 | 7,20                                | 6,31          | 0,00          | 1,86          | 0,73           | 0,27            | 0,94            | 0,27            | 0,00            | 0,35            | 0,00            | 0,45            | 0,08            | 0,49            | 5,95            | 6,57            | 31,46  |
| (0,25;0,50)                 | 2,85                                | 7,87          | 1,37          | 0,83          | 0,27           | 0,10            | 0,16            | 0,07            | 0,02            | 0,07            | 0,08            | 1,03            | 4,19            | 4,31            | 5,92            | 2,50            | 31,64  |
| (0,50;0,75)                 | 0,70                                | 3,91          | 0,32          | 0,64          | 0,08           | 0,04            | 0,00            | 0,00            | 0,01            | 0,00            | 0,08            | 0,23            | 5,70            | 3,26            | 1,27            | 0,83            | 16,69  |
| (0,75;1,00)                 | 0,84                                | 1,12          | 0,13          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,01            | 0,02            | 2,36            | 3,29            | 1,02            | 0,42            | 8,72   |
| (1,00;1,25)                 | 0,15                                | 0,30          | 0,05          | 0,00          | 0,00           | 0,03            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 1,03            | 2,55            | 0,73            | 0,24            | 5,08   |
| (1,25;1,50)                 | 0,03                                | 0,03          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,25            | 0,88            | 0,16            | 0,16            | 4,72   |
| (1,50;1,75)                 | 0,03                                | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,11            | 0,08            | 0,27            | 0,08            | 4,65   |
| (1,75;2,00)                 | 0,02                                | 0,01          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,11            | 0,44            | 0,14            | 0,04            | 4,77   |
| (2,00;2,25)                 | 0,01                                | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,05            | 0,22            | 0,09            | 0,02            | 0,39   |
| (2,25;2,50)                 | 0,00                                | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,03            | 0,11            | 0,05            | 0,02            | 0,21   |
| (2,50;2,75)                 | 0,00                                | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,01            | 0,07            | 0,03            | 0,01            | 0,11   |
| (2,75;3,00)                 | 0,00                                | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,01            | 0,03            | 0,01            | 0,01            | 0,06   |
| (3,00;3,25)                 | 0,00                                | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,00            | 0,03   |
| SUMME                       | 11,39                               | 19,94         | 1,99          | 2,73          | 1,08           | 0,46            | 1,10            | 0,95            | 0,03            | 0,42            | 0,18            | 1,73            | 14,31           | 17,26           | 15,93           | 10,89           | 106,00 |