Die Küste, 71 (2006), 123-167

# Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste

Von Jürgen Jensen, Christoph Mudersbach, Sylvin H. Müller-Navarra, Ingrid Bork, Christian Koziar und Volker Renner

## Zusammenfassung

Die Kenntnis der Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmter Sturmfluthöhen ist wesentliche Voraussetzung für ein vorausschauendes Küstenrisikomanagement. Im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten (MUSE)“ wurden beobachtete Extremwasserstände und modellierte Extremereignisse statistisch analysiert. Die Modellsimulationen wurden mit Modellketten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) durchgeführt. Die statistische Einordnung der modellierten und beobachteten Wasserstände erfolgte am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen. Die Ergebnisse zeigen, dass in der Nordsee Sturmflutwetterlagen möglich sind, die an den Küsten der Deutschen Bucht zu Wasserständen führen, die bis zu 1,4 m über den bisherigen höchsten Beobachtungsdaten liegen. Mit diesen modellierten Wasserständen kann die Einordnung extremer Sturmflutscheitelwasserstände hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit verbessert werden.

## Summary

*Knowledge of the probability of occurrence of certain storm surge levels is indispensable to long-term flood and coastal risk management. Within the framework of the KFKI research project „Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten“ (MUSE – Model-backed investigations of storm surges with very low probabilities of occurrence), observed extreme water levels and modelled extreme events were analysed statistically. The model simulations were carried out using modelling chains of the German Weather Service (DWD) and Federal Maritime and Hydrographic Agency of Germany (BSH). The statistical evaluation of the modelled and observed water levels was made at Siegen University's Research Center for Water and Environmental Engineering (fwu). The results show that weather conditions may occur in the German North Sea region which may lead to storm surge levels exceeding the maximum levels observed so far by up to 1.4 m. On the basis of these modelled water levels, it will be possible to improve the evaluation of extreme storm surge peak water levels with respect to their probability of occurrence.*

## Keywords

North Sea, statistical analysis, wind surge, probabilities, extreme events, risk management

Die Küste, 71 (2006), 123-167



## Inhalt

1. Einleitung . . . 124
2. Meteorologie des Windfeldes . . . 127
2.1 Voraussetzungen . . . 127
2.2 Die verwendeten NWV-Modellsysteme . . . 127
2.3 Bedingungen für Sturmfluten . . . 128
2.4 Experimente . . . 129
2.5 Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 . . . 131
2.6 Bewertung der meteorologischen Ergebnisse . . . 136
3. Wasserstandsmodellierung . . . 136
3.1 BSH-Modellsystem . . . 136
3.2 Ausgangsdaten und Vorgehen . . . 137
3.3 Windschubspannung . . . 137
3.4 Analyse der extremen Sturmfluten . . . 140
3.4.1 Definition . . . 141
3.4.2 Sturmflut vom Windstautyp: 1962 EPS26 . . . 141
3.4.3 Maximaler Effektivwind: 1999 EPS05 . . . 142
3.4.4 Extremer Stau bei NW: 1990 EPS20 . . . 144
3.4.5 Die extreme Sturmflut: 1976 EPS45 . . . 145
3.4.5.1 Fernwelle . . . 146
3.4.5.2 Windstau . . . 146
3.4.5.3 Scheitelwasserstand und Windschubansatz . . . 148
3.4.5.4 Einordnung . . . 150
3.5 Bewertung der hydrodynamischen Ergebnisse . . . 151
4. Extremwertstatistik . . . 152
4.1 Grundlagen der Extremwertstatistik . . . 152
4.2 Definition des Begriffs Wahrscheinlichkeit . . . 153
4.3 Beschreibung des ProMUSE-Verfahrens . . . 154
4.4 Datengrundlagen . . . 156
4.5 Parameter der Verteilungsfunktion . . . 157
4.6 Auswertungen für den Pegel Cuxhaven . . . 157
4.7 Bewertung der Ergebnisse der Extremwertanalyse . . . 160
5. Zusammenfassende Bewertung . . . 162
6. Ausblick und weiterer Forschungsbedarf . . . 164
7. Danksagung . . . 164
8. Schriftenverzeichnis . . . 165

## 1. Einleitung

Sturmfluten an Küsten sind Naturereignisse, die in unregelmäßigen Abständen mit unterschiedlicher Intensität auftreten. Die drei größten Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste im letzten Jahrhundert traten in den Jahren 1962, 1976 und 1999 auf, wobei die Sturmflut von 1976 mit einem Sturmflutscheitelwasserstand von 5,10 m NN am Pegel Cuxhaven in der Elbmündung die höchste war. Demgegenüber hat die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 in Hamburg weitaus größere Schäden und 315 Todesopfer gefordert, obwohl der Sturmflutscheitelwasserstand am Pegel Cuxhaven mit 4,95 m NN um 15 cm niedriger ausfiel, als im Jahr 1976.

Ausgelöst durch das Sturmtief „Anatol“ im Dezember 1999 sind jüngst wieder Fragen nach maximalen Höhen von Sturmfluten laut geworden. Das Orkantief „Anatol“ stellt einen der stärksten Stürme des 20. Jahrhunderts in Süddänemark dar. Untersuchungen zeigten, dass bei südlicherer Zugbahn und leicht modifiziertem zeitlichem Ablauf die Wasserstände in der Deutschen Bucht um 1,5 bis 2 m höher hätten eintreten können (Dick, 2000).

Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste treten in der Regel bei Stürmen aus nordwestlicher Richtung auf, wenn die Windgeschwindigkeit mehr als 20 m/s beträgt. Ab einem Wasserstand von 1,5 m über dem mittleren Hochwasser (MHW) wird von einer Sturmflut gesprochen, bei 2,5 bis 3,5 m über MHW ist es eine schwere Sturmflut und ab 3,5 m über MHW eine sehr schwere Sturmflut.

Grundsätzlich lassen sich zwei Typen von Nordsee-Sturmfluten unterscheiden. Beim Windstautyp weht der Wind lange aus nordwestlicher Richtung und staut damit das Wasser in der südöstlichen Nordsee an. Sturmfluten vom Windstautyp sind gut vorhersagbar und es können Vorwarnzeiten von 18–24 Stunden angegeben werden. Der Zirkulartyp ist hingegen deutlich komplizierter vorherzusagen, da hier ein kleines Orkantief mit hoher Geschwindigkeit über die Britischen Inseln zieht und sich über der Nordsee verstärkt. Die Vorwarnzeit kann dabei lediglich wenige Stunden betragen (Müller-Navarra, 2005).

Der Sturmflut- bzw. Hochwasserschutz hat in Küstengebieten oftmals eine existenzielle Bedeutung. Bei allen Hochwasserschutzmaßnahmen muss deutlich gemacht werden, dass das Wort „Schutz“ irreführend sein kann, da es keinen 100%-igen Schutz geben kann. Bei allen Betrachtungen und Maßnahmen bleibt ein Restrisiko, welches es zu quantifizieren und entsprechend der Nutzung des Gebietes zu minimieren gilt.

Zur Einführung eines Küstenrisikomanagements und der Quantifizierung des Restrisikos ist die Kenntnis über die Höhe von sehr extremen Sturmfluten und deren zugeordnete Eintrittswahrscheinlichkeit von entscheidender Bedeutung. Die Verfahren zur Bestimmung dieser Wahrscheinlichkeiten stammen aus dem Bereich der mathematischen Statistik. Mit Hilfe dieser Verfahren kann aus den vorhandenen Zeitreihen auf die Überschreitungswahrscheinlichkeit von Sturmfluten geschlossen werden. Diese Verfahren haben jedoch Grenzen; so lässt sich z.B. ein Wasserstand mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit (auch: Überschreitungswahrscheinlichkeit) von $P_Ü = 10^{-3}/a$ (Jährlichkeit T = 1.000 Jahre) nicht ohne weitere Informationen aus einer beobachteten Zeitreihe von 100 Jahren statistisch sicher schätzen, da eine Extrapolation der Verteilungsfunktion auf das 2- bis 3-fache des Beobachtungszeitraumes begrenzt ist (DVWK, 1999). Eine Verbesserung kann erreicht werden, wenn neben den rein mathematischen Ansätzen physikalisch begründete Informationen im Bereich der seltenen Ereignisse zur Verfügung stehen.

Um Aussagen über die Höhe und Eintrittswahrscheinlichkeit sehr seltener Sturmfluten ($P_Ü < 10^{-3}/a$) ableiten zu können, wurde 2002 das dreijährige Forschungsvorhaben „Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten (MUSE)“ genehmigt, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert und durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) fachlich begleitet wurde (Jensen et al., 2005).

Das Forschungsvorhaben MUSE war ein Kooperationsvorhaben zwischen dem Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen, dem Deutschen Wetterdienst (DWD, Offenbach) und dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH, Hamburg). Das Untersuchungsgebiet war die Nordsee und speziell die Deutsche Bucht (Abb. 1).

Das Forschungsvorhaben wurde in drei Stufen bearbeitet, die wechselseitig ineinander griffen:

**a) Deutscher Wetterdienst (DWD)**

Der DWD berechnete mit eigenen numerischen Vorhersagemodellen und mit Modellen des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) physikalisch mögliche Wetter- bzw. Windsituationen, die zu außergewöhnlichen Sturmfluten in der Deut-

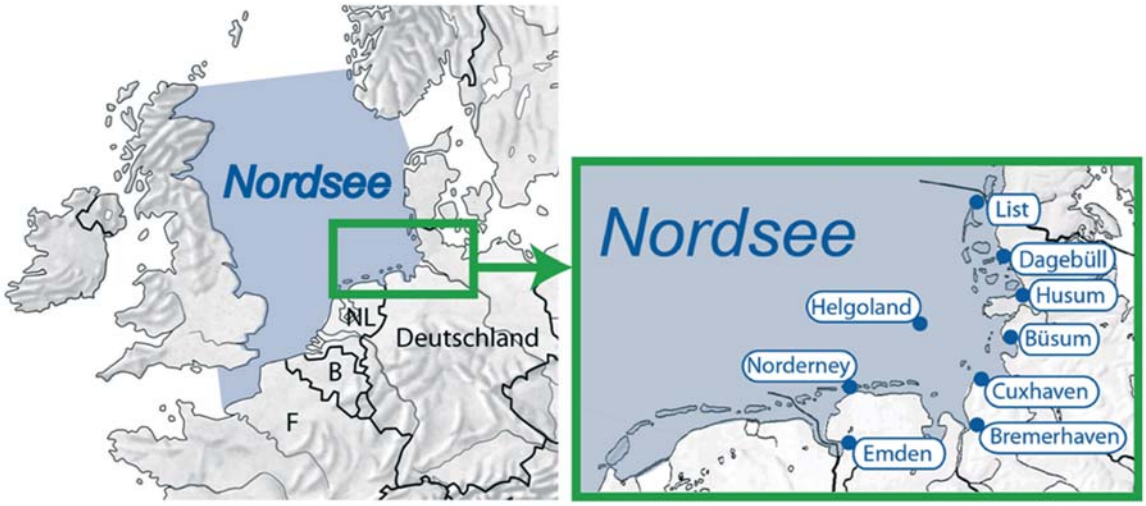


Abb. 1: Untersuchungsgebiet des Forschungsvorhabens MUSE

schen Bucht führen könnten. Hier ist wichtig zu beachten, dass alle Berechnungsergebnisse physikalisch konsistent sind, d.h. es wurden keine „künstlichen" Wettersituationen konstruiert, sondern Wetterentwicklungen simuliert, die auf realistischen Anfangswerten basieren.

**b) Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)**

Die vom DWD berechneten Wetter- und Windsituationen wurden zum BSH transferiert, wo dann resultierende Wasserstände und Windstauwerte an verschiedenen Küstenstandorten berechnet wurden. Auch hier wurden physikalisch konsistente numerische 2D- und 3D-Wasserstandsvorhersagemodelle verwendet, die im operationellen Sturmflutvorhersagebetrieb zum Einsatz kommen. Ein besonderer Arbeitsschwerpunkt des BSH lag in der Auswahl eines geeigneten Windschubspannungsansatzes für die teilweise sehr hohen Windgeschwindigkeiten bis über 30 m/s.

**c) Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)**

Das fwu übernahm die statistische Auswertung und Einordnung der berechneten Wasserstandswerte und erarbeitete ein statistisches Verfahren, mit dem eine Verknüpfung der modellierten Extremwerte mit den beobachteten Daten erreicht werden konnte. Bei dem entwickelten Verfahren können physikalisch begründete Annahmen zu oberen Grenzwerten berücksichtigt werden. Damit ist die Abschätzung von Ereignissen mit sehr kleinen Eintrittswahrscheinlichkeiten objektiver.

Zum KFKI-Forschungsvorhaben MUSE liegt ein umfangreicher Abschlussbericht vor, aus dem hier die wesentlichen Ergebnisse ausführlich erläutert werden. Im Abschlussbericht finden sich weitere Einzelheiten und insbesondere zusätzliche Tabellen und Abbildungen, die in diesem Beitrag nicht berücksichtigt werden konnten. Der Abschlussbericht des Forschungsvorhabens kann als PDF-Datei beim fwu angefordert werden.

Die Küste, 71 (2006), 123-167



# 2. Meteorologie des Windfeldes

## 2.1 Voraussetzungen

Es hat bereits Anfang der achtziger Jahre Ansätze gegeben, mit deterministischen Verfahren Extremsturmfluten zu berechnen. So wurden für eine Studie von HEWER (1980) durch einen erfahrenen Synoptiker des DWD aus verschiedenen beobachteten Sturmwetterlagen die sturmflutförderlichsten Komponenten extrahiert und in neuen künstlichen Wetterlagen so kombiniert, dass sich extreme, aber nicht undenkbare Wetterentwicklungen ergaben. Diesen wurden anschließend mit Hilfe eines 2-dimensionalen Wasserstandsmodells maximale Wasserstände zugeordnet.

Studien auf der Basis von konstruierten Wetterlagen können angezweifelt werden. Die Wetterlagen sind zwar denkbar, jedoch physikalisch nicht ableitbar. Außerdem erlaubten die bisherigen Arbeiten keinerlei Aussagen zur Wahrscheinlichkeit derartiger Szenarien und sind daher für Küstenschutzplanungen zunächst nicht verwertbar.

In dieser Hinsicht verfolgt das Projekt MUSE einen erweiterten Ansatz: Zur Erzeugung von Sturmflutwetterlagen kommen numerische Simulationsmodelle zum Einsatz. Auf diese Weise ist es möglich, für jeden beobachteten Termin eine ganze Reihe physikalisch möglicher Wetterlagen zu erzeugen. Dies kommt zum einen dadurch zustande, dass für jedes Zieldatum mehrere Vorhersagen mit unterschiedlichen Startterminen und Vorhersagelängen gerechnet werden können. Zum anderen lassen sich auch direkt durch kleine Veränderungen an den Anfangsdaten eines Vorhersagemodells, welche die möglichen Variationen des Startzustandes innerhalb der Analysengenauigkeit widerspiegeln, weitere meteorologisch sinnvolle Wetterlagen für einen bestimmten Zielzeitpunkt berechnen. Aus diesem Spektrum an Wetterlagen werden anschließend die Simulationen mit dem größten Sturmflutpotential herausgesucht und für die Versorgung von Ozeanmodellen mit Antriebsdaten genutzt.

## 2.2 Die verwendeten NWV-Modellsysteme

Modellentwicklung ist ein fortlaufender Prozess, in den aktuelle wissenschaftliche Entwicklungen sowie das Wissen über bestehende Modelldefizite einfließen. So wird beim DWD und beim EZMW kontinuierlich daran geforscht, die operationellen Modellvorhersagen zu verbessern. Die sich daraus ergebenden Änderungen am Modellcode werden über ein Versionskontrollsystem verwaltet und in regelmäßigen Abständen zu einer neuen Modellversion vereint. Für gewöhnlich finden solche Versionswechsel mehrmals pro Jahr statt. Sie dienen also dazu, neue oder verbesserte Verfahren im Bereich der Datenassimilation, der Numerik und der physikalischen Parametrisierung in das Modellsystem einzubeziehen sowie neuartige Beobachtungsdaten für die Vorhersage nutzbar zu machen.

Grundsätzlich wurden alle Simulationen mit Hilfe einer Modellkette, bestehend aus einem globalen und einem darin eingebetteten regionalen Atmosphärenmodell, realisiert. Als regionales Modell kam das **L**okal-**M**odell (LM) des Deutschen Wetterdienstes zum Einsatz. Als globales Modell wurde hingegen entweder das Global-Modell des DWD (GME) oder das **I**ntegrated **F**orecast **S**ystem (IFS) des EZMW (Reading, UK) verwendet. Dabei wurde das IFS immer in Form des **E**nsemble **P**rediction **S**ystems (EPS) genutzt. Das EPS ist eine Erweiterung des IFS, mit dem, ausgehend von einem bestimmten Starttermin, mehrere IFS-Modellvorhersagen berechnet werden können. Dieses meist 50 alternative Vorhersagen umfassende Prognosespektrum wird dadurch erzeugt, dass den Anfangsbedingungen zufällige,

im Bereich der Unsicherheiten des ungestörten Anfangszustandes liegende Variationen aufgeprägt werden. Nähe Informationen zu dem EPS sind z.B. in BUIZZA et al. (1999) enthalten.

### 2.3 Bedingungen für Sturmfluten

Für das Projekt MUSE sind primär solche Fälle interessant, bei denen Vorhersagemodelle Wetterlagen simulieren, die im Bereich der Deutschen Bucht zu einem außergewöhnlich starken Hochwasser führen würden. Solche Lagen sind gekennzeichnet durch starke und/oder lang anhaltende westliche Winde und einen dadurch bewirkten Windstau bzw. Wasserspiegelanstieg an der Küste. Der entscheidende Modellparameter ist demnach der Wind in 10 m Höhe über der Wasseroberfläche. Sturmfluten werden unter den folgenden Bedingungen erwartet:

| | |
|---|---|
| Gebiet: | Innere Deutsche Bucht<br>(53,8 – 54,75 ° n. Br., 7,5 – 9,0 ° ö. L.) |
| Windrichtung: | WSW – NNW (247,5 ° – 337,5 °) |
| Windstärke: | ab 8 Bft (> 17 m/s) |
| Entwicklung: | von SW auf NW drehend |
| Zeitskala: | ca. 3 Stunden vor astronom. Hochwassereintrittszeit. |

Um dies objektiv und auf einen Blick beurteilen zu können, wurde eine aus Windstärke und Windrichtung zusammengesetzte Größe definiert: der Effektivwind. Er wurde festgelegt als Anteil des 10-m-Windes, der aus Richtung 295° kommt (Abb. 2). Diese Windrichtung wurde in einer empirischen Studie als diejenige Richtung ermittelt, bei der der Windstau in der Deutschen Bucht bei sonst gleicher Windgeschwindigkeit maximal wird (MÜLLER-NAVARRA und GIESE, 1999). Im Flächenmittel über die Deutsche Bucht ist der Effektivwind demzufolge ein Maß dafür, wie stark sich durch den Wind das Wasser an der Küste der Deutschen Bucht aufstaut. Somit kann er im Rahmen dieses Forschungsvorhabens als erste Orientierung für das Sturmflutpotential einer Wettersituation herangezogen werden.

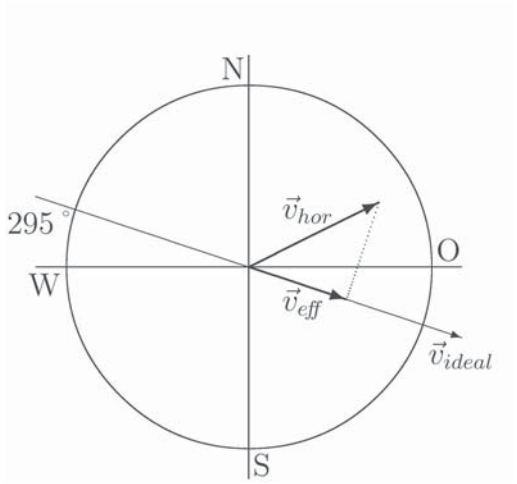


Abb. 2: Definition des Effektivwindes durch vektorielle Zerlegung des Wind-Vektors

Die Küste, 71 (2006), 123-167



## 2.4 Experimente

Im Einzelnen wurde auf Seiten des DWD nach der folgenden Vorgehensweise verfahren:

1. Zeitraum und Intervall für EPS-Starttermine festlegen,
2. EPS-Experimente durchführen,
3. Identifizierung der EPS-Member mit den stärksten Effektivwinden über der Deutschen Bucht,
4. Neuberechnung dieser Member mit vollständiger Archivierung der Ergebnisse und
5. Übergabe von IFS/LM-Daten an das BSH.

Die Auswahl der Zeiträume erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem BSH. Die Basis bildete dabei eine Liste mit den höchsten Pegelständen der letzten 50 Jahre für verschiedene Beobachtungsorte an der deutschen Nordseeküste, die mit Hilfe des BSH-Archivs zusammengestellt wurde. Daraus wiederum wurden die extremen Sturmfluten herausgesucht, wobei die Kriterien der Absolutwert des Wasserstandes sowie die Dauer des erhöhten Pegelstandes waren. Diese Liste wurde zuerst unter den am Projekt beteiligten Wissenschaftlern und später mit der begleitenden KFKI-Projektgruppe diskutiert und optimiert. Die ausgewählten Sturmfluten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Somit waren sechs Experimente mit dem EPS notwendig. Jedes dieser EPS-Experimente besteht dabei aus mehreren EPS-Simulationen, wobei wiederum jede EPS-Simulation aus 50 einzelnen IFS-Simulationen, dem eigentlichen Ensemble besteht. Alle IFS-Simulationen eines EPS-Experiments zusammen bilden dann ein Super-Ensemble. Die EPS-Simulationen eines EPS-Experiments unterscheiden sich also primär durch ihren Starttermin, wohingegen die 50 IFS-Simulationen alle den gleichen Starttermin haben. Dies wird durch Abb. 3 anhand des EPS-Experiments zur 1976er-Sturmflut veranschaulicht. Jeder diagonale Pfeil in der Grafik stellt darin eine EPS-Simulation mit 50 Ensemble-Membern dar.

Tab. 1: Ausgewählte Sturmfluten mit Pegelstandsmaxima für Cuxhaven

| Zeitpunkt [MEZ] | Pegelstand [m NN] |
|---|---|
| 16.02.1962, 22:40 | 4,95 |
| 23.02.1967, 23:20 | 3,99 |
| 03.01.1976, 14:20 | 5,10 |
| 27.02.1990, 01:42 | 4,44 |
| 28.01.1994, 13:08 | 4,51 |
| 03.12.1999, 20:18 | 4,53 |

Die Auswahl der Zeiträume ist bestimmt durch die Startzeitpunkte sowie die Länge der Simulationen. Beides wurde für die MUSE-Experimente so gewählt, dass der mit Simulationen abgedeckte Zeitbereich sich von ca. 96 Stunden vor dem Pegelstandsmaximum bis mindestens 12 Stunden danach erstreckt. Dadurch ist in jedem Fall gewährleistet, dass der Zeitbereich, für den die Unterschiede zwischen den gestörten und der ungestörten Vorhersage systembedingt maximal sind, überdeckt wird. Für die sechs durchzuführenden EPS-Experimente ergibt sich dementsprechend die in Tab. 2 dargestellte Grundkonfiguration.

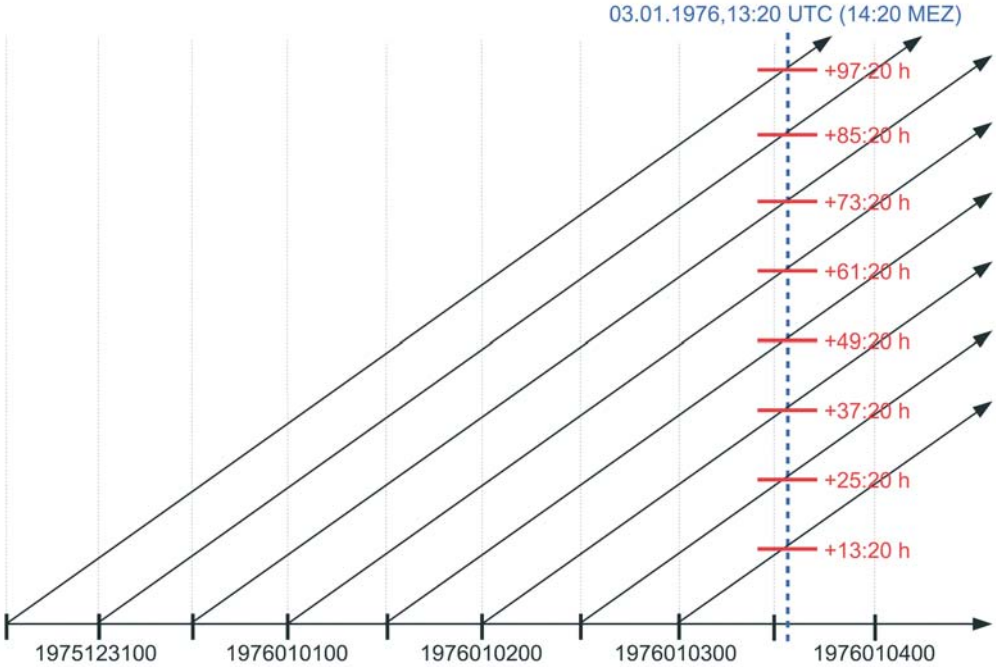


Abb. 3: Prinzip eines EPS-Experiments anhand der Sturmflut vom 3. Januar 1976; die Beschriftung der horizontalen Zeitachse am unteren Bildrand ist im Format "YYYYMMDDHH", wobei YYYY = Jahr (4-stellig), MM = Monat (2-stellig), DD = Tag (2-stellig), HH = Stunde (2-stellig), wobei als Referenzzeit UTC gewählt wurde

Tab. 2: Zeitfenster und Intervall geeigneter MUSE-Extremwetterlagen zur Bearbeitung mit dem EPS

| Experiment-Reihenfolge | Startzeitpunkte Von | Bis | Intervall | Member-Anzahl |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1962021112 | 1962021512 | 12 h | 9 × 50 |
| 2 | 1975123012 | 1976010300 | 12 h | 8 × 50 |
| 3 | 1999112900 | 1999120318 | 6 h | 20 × 50 |
| 4 | 1967022000 | 1967022318 | 6 h | 16 × 50 |
| 5 | 1994012418 | 1994012812 | 6 h | 16 × 50 |
| 6 | 1990022300 | 1990022800 | 6 h | 21 × 50 |

Für die Experimente Nr. 1 und 2 wurde ein Startintervall von 12 Stunden gewählt. Für die restlichen Experimente wurde das Startintervall auf sechs Stunden halbiert. Dadurch verdoppelt sich die Anzahl der durchgeführten Simulationen. Somit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass im Super-Ensemble eine Simulation mit extremen Windverhältnissen über der Deutschen Bucht enthalten ist. Allerdings steigt dadurch auch der Bedarf an Rechnerressourcen.

Die Startzeitpunkte selbst können nicht beliebig gewählt werden, da die Modellstartzustände unmittelbar auf Modellanalysen basieren. So liegen die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens benutzten EZMW-Analysen lediglich alle sechs Stunden vor. Diese Zeiten stellen also gleichzeitig die vier möglichen Startzeiten pro Tag für EPS-Simulationen im Rahmen von MUSE dar.

Im Folgenden wird der praktische Einsatz der MUSE-Modellkette am Beispiel der Sturmflut von 1962 beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse aller gerechneten Experimente zusammengefasst.

Die Küste, 71 (2006), 123-167



## 2.5 Sturmflut vom 16./17. Februar 1962

Am 16./17. Februar 1962 brach über die deutsche Nordseeküste die schwerste Sturmflut seit über 100 Jahren herein. Orkanböen bis 200 Kilometer pro Stunde und um mehrere Meter erhöhte Tidewasserstände ließen die Deiche an der Küste, an der Elbe und Weser brechen. Ursache war das Orkantief „Vincinette", das später über Skandinavien hinweg zur Ostsee zog und das Wasser der Nordsee in der Deutschen Bucht aufstaute (NDR, 2004). Die 1962er-Sturmflut fällt unter die Kategorie „Skandinavien-Typ". Bei dieser Art von Sturmfluten werden die besonders hohen Wasserstände durch die lange Dauer stauintensiver Winde aus nordwestlicher Richtung erreicht (vgl. PETERSEN und RHODE, 1991).

Um einen besseren Überblick über die Entwicklung der Wetterlage zu bekommen, wurden die für jeweils 00:00, 06:00, 12:00 und 18:00 UTC vorliegenden EZMW-Re-Analysen vom 15. bis 17. Februar visualisiert. D. h., es wurden für die aus dem ERA-40-Projekt (KALNAY et al., 1996) stammenden Felder des Windes in 10 m über Grund und des auf NN reduzierten Luftdruck Grafiken erstellt, die einen synoptischen Überblick über die Wetterlage vermitteln. Stellvertretend für alle erstellten Grafiken sind an dieser Stelle zwei Modellanalysen sowie die zeitlich zugehörigen Bodenwetterkarten aufgeführt (siehe Abb. 4).

Bereits Tage vor der Sturmflut zogen mehrere Sturmtiefs vom Seegebiet südlich von Island zur nördlichen Nordsee und weiter nach Skandinavien. Die eigentliche Geburt des Orkantiefs begann etwa am 14. Februar 1962. Grönlandkaltluft spaltete von einem Tief nahe

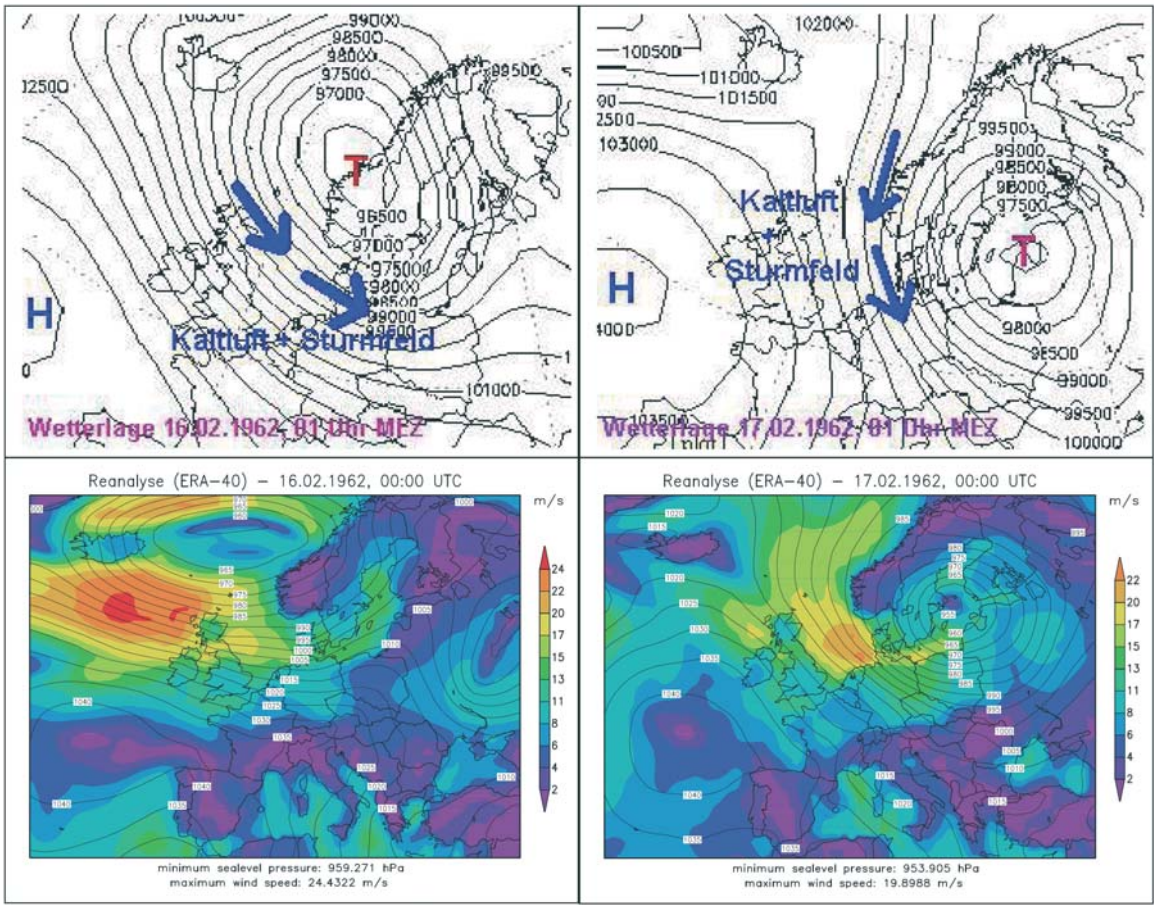


Abb. 4: Bodenwetterkarten + Re-Analysen für den 16. und 17. Februar 1962, jeweils 00:00 UTC; bei den Re-Analysen wurde zusätzlich zu den Isobaren das 10-m-Windfeld geplottet

Island ein kleines Teiltief ab, das sich danach verstärkte und als Schnellläufer mit einem breiten Niederschlagsband aus gewittrigen Regenschauern, Schneeregen und Graupel südostwärts zog. Am Morgen des 16. Februar erreichte es mit einem Kerndruck von nur 950 hPa Südskandinavien. In der nachfolgenden Nordmeerkaltluft steigerte sich über der Nordsee der Nordwest-Sturm allmählich zum Orkan.

Die Bordwetterwarte des Fischereischutzbootes „Meerkatze" meldete inmitten der Nordsee gegen 13 Uhr Windstärke 11 (28,5–32,7 m/s), um 19 Uhr dann bereits Orkan-Windstärke 12 (> 32,7 m/s). Das norwegische Wetterschiff „Eger" geriet in Seenot. Hinter der deutschen Küstenlinie und in Hamburg traten in der Nacht mehrmals Orkanböen auf. Die mittleren Windgeschwindigkeiten lagen jedoch deutlich niedriger; das eigentliche Hauptsturmfeld zog glücklicherweise weiter nördlich vorbei. Trotzdem behinderten die anhaltenden, massiven Nordwestwinde des Orkans ab Nachmittag des 16. Februar das Zurückströmen des Elbewassers in die Deutsche Bucht in fataler Weise. Dadurch erreichte das nächste Hochwasser in der Nacht dann auch diese katastrophale Höhe, was zu der Elbe-Flutwelle mit den verheerenden Auswirkungen für Hamburg führte.

Die Wetterlage vom 16./17. Februar 1962 wurde bereits im Vorfeld von MUSE mit Hilfe numerischer Modelle untersucht. Dazu wurden am EZMW auf Anfrage des DWD Re-Analysen für den Zeitbereich vom 9. Februar 1962, 18:00 UTC bis 20. Februar 1962, 12:00 UTC im 6-Stunden-Abstand erstellt (JUNG et al., 2004). Diese 44 Re-Analysen wurden dann zur Bereitstellung von Anfangsdaten für das GME des DWD genutzt. Die auf diese Weise zustande gekommenen GME-Simulationen wurden wiederum zur Randsteuerung des LM genutzt. Die Ergebnisse dieser Atmosphärenmodelle wurden zum BSH transferiert und dort als Antriebsdaten für die Wasserstandsmodelle genutzt (MÜLLER-NAVARRA et al., 2006).

Das eigentliche EPS-Experiment für die 1962er-Sturmflut besteht aus neun EPS-Läufen zu je 50 Membern. Die Vorhersagezeit für alle Member des Experiments betrug konstant 240 Stunden. Die ersten 50 Member haben zum Zeitpunkt des realen Pegelstandsmaximums eine Vorhersagelänge von 129 h 40 min, die letzten 50 Member dagegen nur noch 33 h 40 min. Insgesamt resultieren aus diesem Experiment $9 \times 50 = 450$ IFS-Simulationen. Um eine Übersicht über alle Läufe zu bekommen und vor allem um abschätzen zu können, welche Member des Super-Ensembles für das Projekt interessant sind, kam das beschriebene Verfahren zur Berechnung des Effektivwinds zum Einsatz. Auf die 450 EPS-Member der 1962er-Sturmflut angewendet ergibt sich das im oberen Teil von Abb. 5 dargestellte Bild.

Daraus wird ersichtlich, dass zu Zeiten, an denen real hohe Pegelstände auftraten, der Anteil der EPS-Modellsimulationen mit hohem Effektivwind deutlich höher ist als sonst. Typischerweise hat der Effektivwind des vollständigen Super-Ensembles eine Streubreite von ca. 20–25 m/s, wenn man von einzelnen Ausreißern absieht. Betrachtet man nur den Bereich des Effektivwinds, innerhalb dessen mindestens zwei Member pro Klasse verzeichnet werden, beträgt die Streubreite typischerweise sogar nur ca. 10 m/s.

Anhand dieser Darstellung wird außerdem deutlich, dass die Häufigkeiten von Beginn des Experiments an kontinuierlich zunehmen. Die Ursache dafür liegt darin, dass alle 12 Stunden 50 Member zum Super-Ensemble dazukommen, bis dann ab 15.02., 12:00 UTC das Super-Ensemble vollständig ist. Ab 11.02., 12:00 UTC + 240 h = 21.02., 12:00 UTC wird das Super-Ensemble dann wieder alle 12 Stunden um 50 Member reduziert, was sich im Bild zum Ende hin durch geringere Häufigkeiten über den gesamten Streubereich widerspiegelt.

Eine genauere Untersuchung (KOZIAL et al., 2005) zeigt, dass es nahezu gleichgültig ist, wie lange vor der realen Sturmflut ein Ensemble-Lauf startet – er wird in den allermeisten Fällen für den Zeitbereich des tatsächlichen Pegelstandsmaximums die höchsten Effektivwinde produzieren. Dies kommt in der Grafik dadurch zum Ausdruck, dass die höchsten

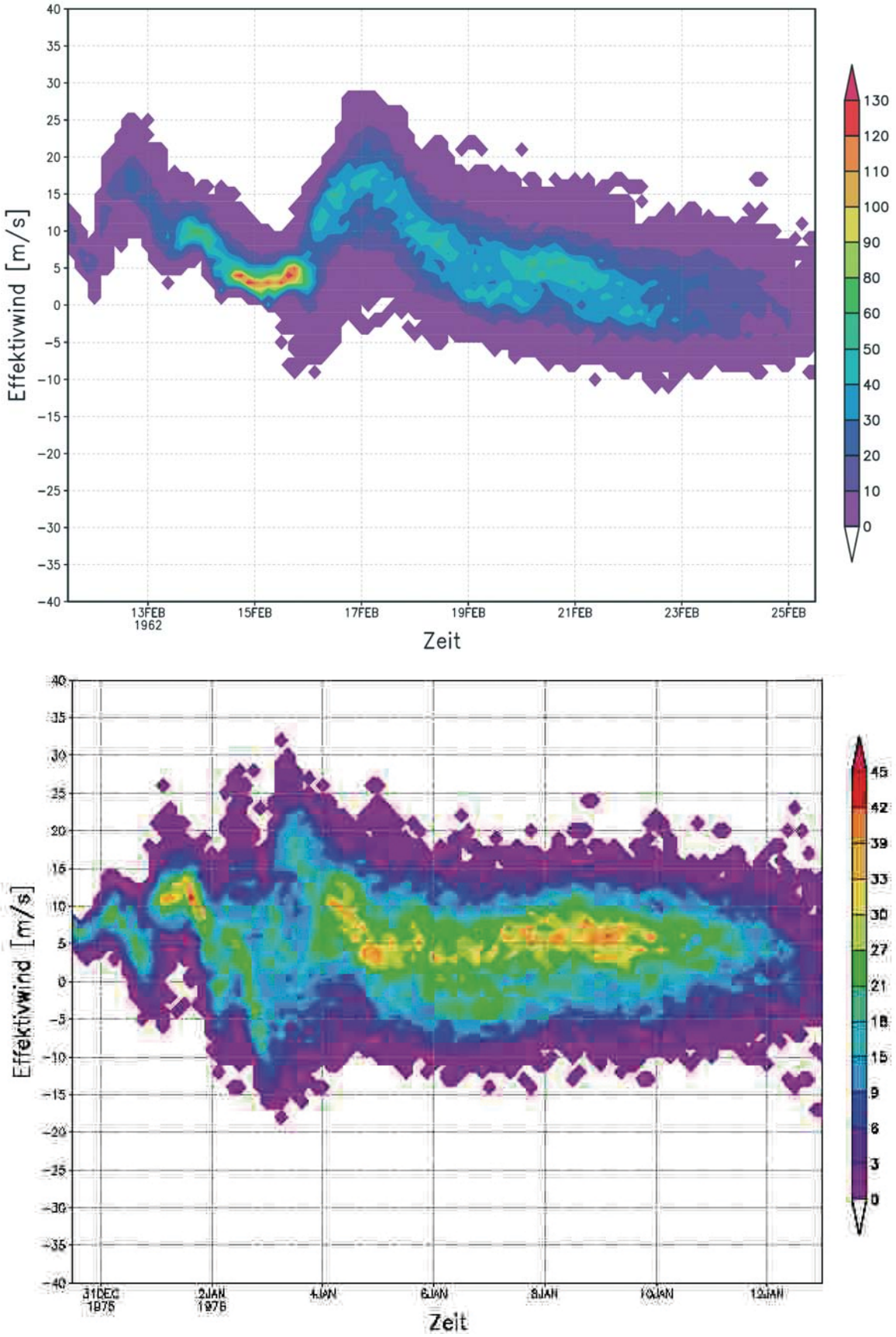


Abb. 5: Häufigkeitsverteilungen des Effektivwindes für die 62er-Sturmflut (oben) und die 76er-Sturmflut (unten) als Funktion der Zeit

Werte der Verteilung im Vorhersagelängenbereich von 34 bis 130 h auftreten. Für kürzere und längere Vorhersagen wurden tendenziell weniger hohe Effektivwinde produziert, weil in diesen Fällen nicht der Zeitbereich der realen Sturmflut abgedeckt wird. Durch die Grenzen der Vorhersagbarkeit sind diesem Verhalten jedoch natürliche Grenzen gesetzt. Im unteren Teil der Abb. 5 ist zum Vergleich die Häufigkeitsverteilung des Effektivwindes für die 1976er-Sturmflut, die extreme Sturmflut dieser Untersuchung (siehe Abschnitt 3.4.5), gegeben.

Nach der Durchführung des Ensemble-Experiments sind als nächstes die extremen Member aus dem Super-Ensemble herauszusuchen. Ein bestimmtes Member ist dabei durch seinen Startzeitpunkt sowie seine Nummer innerhalb des Ensembles eindeutig definiert. Für die 62er-Sturmflut wurden die in Abb. 6 dargestellten fünf Member für weitere Untersuchungen ausgesucht. Sie heben sich von den restlichen Membern des Super-Ensembles dadurch ab, dass sie ein höheres Effektivwind-Maximum aufweisen und/oder dass die hohen Effektivwindwerte über einen längeren Zeitraum anhalten.

Startzeitpunkt von Member Nr. 8, 30 und 37 ist dabei der 15.02.1962, 00:00 UTC, Member Nr. 26 und 50 wurden 12 Stunden später, also am 15.02.1962, 12:00 UTC gestartet. Die schwarze Kurve wurde aus den Re-Analysen abgeleitet. Es wird ersichtlich, dass das Effektivwind-Maximum der Re-Analyse ca. 20 m/s beträgt, wohingegen die Ensemble-Member Maxima von ca. 29 m/s aufzuweisen haben. Auch gestaltet sich die zeitliche Entwicklung bei den Extrem-Membern anders, als in der Re-Analyse. Das Maximum des Effektivwinds weist außer bei Member Nr. 50 immer eine zeitliche Verschiebung zur Re-Analyse auf. Mit der Ensemble-Technik für den Wind in der Deutschen Bucht konnte im Falle der 62er-Sturmflut ein um ca. 9 m/s höherer Wert ermittelt werden.

Während 1962 der zeitliche Verlauf des Effektivwinds vorwiegend in den Amplituden variiert (Abb. 6), zeigen andere Stürme, wie z.B. 1976 auch starke Unterschiede in der Eintrittszeit des maximalen Effektivwinds (vgl. KOZIAR und RENNER, 2005).

Jedes ausgewählte Extrem-Member wurde im Anschluss an das Super-Ensemble mit Hilfe eines separaten IFS-Laufes unter Abspeicherung des kompletten Modelloutputs reproduziert. Die für einen LM-Lauf mit IFS-Randsteuerung notwendigen Daten wurden dann im Anschluss wieder aus dem Archiv extrahiert und vom EZMW zum DWD nach Offenbach transferiert.

Primärer Sinn und Zweck der nachgeschalteten LM-Simulationen war es, die mit dem EPS erzeugten Extremwetterlagen realistischer abzubilden. Das ist nicht so zu verstehen, dass die mit dem EPS produzierten Wettersituationen unrealistisch oder gar physikalisch inkonsistent wären. Vielmehr ist es so, dass das EPS letztendlich ein globales Modell mit einer relativ groben räumlichen Auflösung darstellt. Das LM dagegen ist ein regionales Modell, dessen Modellgebiet immer nur einen kleinen Ausschnitt der Erdatmosphäre umfasst. Es ist daher auf Randwerte aus einem überregionalen Modell wie dem IFS angewiesen, ist dafür jedoch in der Lage, auch kleinskalige Wettererscheinungen im Küstenbereich wie z.B. eine Seewind-Zirkulation zu erfassen und zu beschreiben. Nachvollziehbar wird das, wenn man berücksichtigt, dass in den beiden Vorhersagemodellen jeder Gitterpunkt einen Gitterbereich von etwa 80 x 80 $km^2$ (IFS) bzw. 7 x 7 $km^2$ (LM) vertritt. Dadurch sind die an den Gitterpunkten stehenden Zustandsvariablen wie z.B. Druck, Temperatur und Wind als Mittelwerte über den Gitterbereich zu verstehen. Eine höhere räumliche Auflösung ermöglicht daher realitätsgetreuere Simulationen.

Die Ergebnisse der LM-Simulationen der 1962er-Sturmflut und der weiteren fünf ausgewählten Experimente sind, reduziert auf das Member mit den höchsten Windgeschwindigkeiten, in Tab. 3 dargestellt. Es ist festzustellen, dass die LM-Simulationen in der Regel etwas

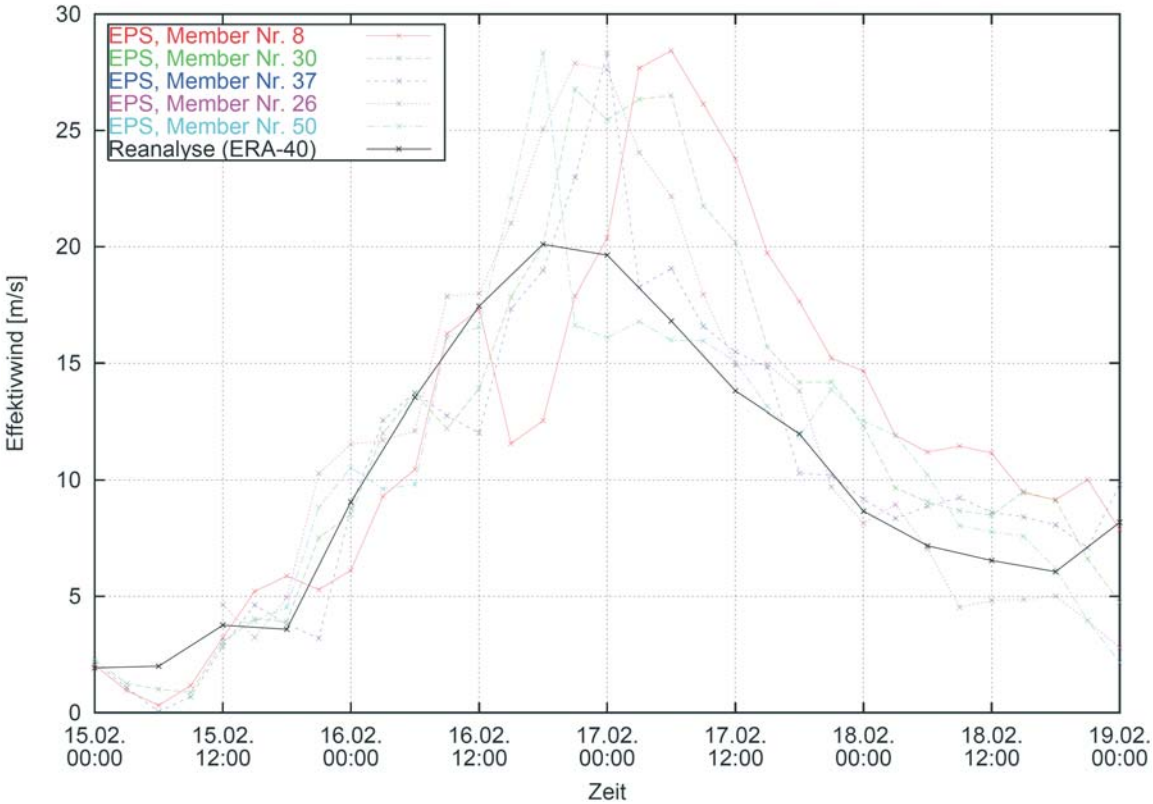


Abb. 6: Effektivwind ausgewählter Member aus dem 62er-Super-Ensemble

geringere Geschwindigkeiten liefern, als die IFS-Simulationen. Die LM-Ergebnisse werden aufgrund der höheren Detailgenauigkeit des Modells bevorzugt. Eine ausführliche Diskussion zu den Unterschieden des IFS und LM findet sich im Abschlussbericht des Forschungsvorhabens MUSE (Jensen et al., 2005).

Wie in Tab. 3 zu erkennen ist, gestalteten sich die Windverhältnisse in Simulationen für die Deutsche Bucht deutlich extremer als in der Realität. Die Flächenmittel wurden demnach immer um mindestens 3,2 m/s (LM) übertroffen, im Einzelfall sogar um 12,3 m/s (LM).

Tab. 3: Vergleich der Maxima des Effektivwinds von IFS und LM mit der Re-Analyse; die Modellwerte stellen das Maxima über das gesamte entsprechende Super-Ensemble dar

| Sturmflut | max. Effektivwind – Re-Analyse – | max. Effektivwind – IFS – | max. Effektivwind – LM – |
|---|---|---|---|
| 16.02.1962 | 20,1 m/s | 28,9 m/s | 24,7 m/s |
| 23.02.1967 | 19,8 m/s | 28,8 m/s | 23,0 m/s |
| 03.01.1976 | 21,6 m/s | 32,3 m/s | 29,5 m/s |
| 27./28.02.1990 | 18,0 m/s | 34,4 m/s | 27,9 m/s |
| 28.01.1994 | 16,8 m/s | 27,5 m/s | 25,3 m/s |
| 03.12.1999 | 19,0 m/s | 35,5 m/s | 31,3 m/s |

### 2.6 Bewertung der meteorologischen Ergebnisse

Die im Vorhaben erzielten Ergebnisse basieren auf Vorhersagen mit den Modellen des EZMW und des DWD, die dem heutigen Stand der Wissenschaft bei der Simulation der Atmosphäre entsprechen und erfolgreich für die Wettervorhersage eingesetzt werden. Speziell das EZMW-EPS dient dazu, ausgehend von jedem Startzeitpunkt einen ganzen Satz unterschiedlicher Vorhersagen zu erzeugen, die den Unsicherheiten der Bestimmung der Anfangslage und der Modellierung Rechnung tragen. Derartige Unsicherheiten sind prinzipiell unvermeidbar, auch wenn ihre Größe – vor allem in Bezug auf die Modellierung – sicherlich vom jeweils erreichten Stand der Beobachtungstechnik und der Modellierung abhängt.

Im Rahmen dieser (heute) unvermeidbaren Unsicherheiten sind die im Vorhaben produzierten und untersuchten Vorhersagen alle als mögliche und physikalisch konsistente Lösungen der atmosphärischen Entwicklung zu betrachten. Es konnte damit gezeigt werden, dass Wetterlagen mit einem gegenüber den beobachteten Lagen deutlich erhöhten Sturmflutpotential möglich gewesen wären, auch wenn sie tatsächlich nicht so eingetreten sind.

## 3. Wasserstandsmodellierung

### 3.1 BSH-Modellsystem

Im BSH steht eine Modellkette zur Wasserstandsberechnung zur Verfügung. Ihr Kern ist ein dreidimensionales, baroklines Modell mit einer horizontalen Auflösung von etwa 2 km in der Deutschen Bucht und der westlichen Ostsee (Küstenmodell) mit beidseitiger Koppelung an ein ebenfalls dreidimensionales, baroklines Modell der Nord- und Ostsee (Nord-Ostseemodell) mit einem horizontalen Gitterabstand von etwa 10 km (DICK et al., 2001; KLEINE, 1993, 1994). Daneben steht zur schnellen Wasserstandsvorhersage eine zweidimensionale, barotrope Version des Nord- Ostseemodells für die Nordsee und die westliche Ostsee (Staumodell) mit der gleichen horizontalen Auflösung von etwa 10 km zur Verfügung (JANSSEN, 1996). Randwerte für beide Modelle liefert ein zweidimensionales, barotropes Modell des Nordostatlantiks (Nordostatlantikmodell) mit einer Auflösung von etwa 40 km.

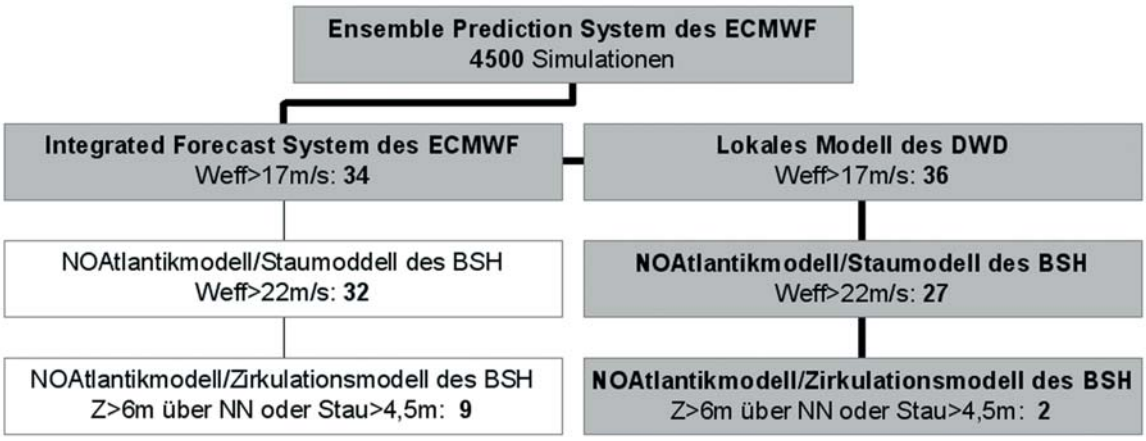


Abb. 7: Simulationen zur Ermittlung extremer Sturmfluten

Eine detaillierte Beschreibung der Modellkette ist im zugehörigen Teilbericht des Abschlussberichts zu finden (BORK und MÜLLER-NAVARRA, 2005)

### 3.2 Ausgangsdaten und Vorgehen

Aus den ermittelten Sturmflutwetterlagen wurden mit Wasserstandsmodellen die Scheitelwasserstände berechnet. Die mit Membern des Teilkollektivs der Sturmflutwetterlagen in der Nähe einer konkreten Sturmflut durchgeführten Simulationen des Wasserstands werden im Folgenden als Realisierungen dieser Sturmflut bezeichnet. Abb. 7 zeigt die verwendete Modellkette mit der Anzahl der Simulationen.

In dieser Abbildung sind nur diejenigen Simulationen berücksichtigt, die nach der Entscheidung, extreme Sturmfluten in der Nähe tatsächlich eingetretener Sturmfluten zu suchen, durchgeführt wurden. Von den dazu vom DWD durchgeführten 4.500 Simulationen ergaben 37 den geforderten Effektivwind > 17 m $s^{-1}$. Bei der Wiederholung der Simulation für ausgewählte Wetterlagen erzeugten noch 36 der IFS/LM-Simulationen und 34 der reinen IFS-Simulationen einen solchen Effektivwind $W_{eff}$. Am BSH wurden nach ersten Testrechnungen nur Wetterlagen mit einem Effektivwind > 22 m $s^{-1}$ in die Voruntersuchungen einbezogen. Das waren 27 der IFS/LM-Simulationen und 32 der reinen IFS-Simulationen. Als extreme Sturmfluten wurden solche mit Wasserständen in Cuxhaven > 6 m über NN oder mit einem Stau in Cuxhaven relativ zum nächsten Gezeitenhochwasser oder Gezeitenniedrigwasser > 4,5 m gewählt. Dieses Kriterium erfüllen nur zwei der mit IFS/LM-Wetterlagen angetriebenen Staumodell-Simulationen und neun mit IFS-Wetterlagen angetriebene Staumodell-Simulationen. Entsprechend der Aussagen im Meteorologieteil wird in dieser Studie den IFS/LM-Simulationen der Vorzug gegeben. Diese extremen Sturmfluten wurden mit dem hochauflösenden Küstenmodell des BSH nachgerechnet.

Da die EPS-Rechnungen nur das eigentliche Sturmflutgeschehen erfassen, wurden für alle Sturmfluten mehrtägig Simulationen der tatsächlich eingetretenen Sturmfluten durchgeführt (BORK und MÜLLER-NAVARRA, 2005), um Anfangswerte für die Wasserstandsmodellierung im Projekt MUSE bereitzustellen.

Eine starke Unsicherheit in der Modellierung von Wasserständen besteht immer noch hinsichtlich der Parametrisierung des Impulseintrags vom Wind in die Nordsee. Deshalb wurden Sensitivitätsstudien zur Abhängigkeit der Wasserstandssimulation vom Windschubansatz bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten für die Neuberechnung der Sturmflut 1999 und für die Simulation der im Projekt ermittelten extremen Sturmflut, eine Realisierung der Sturmflut 1976, durchgeführt.

### 3.3 Windschubspannung

Ein wichtiges Element der Kopplung zwischen Atmosphäre und Ozean ist der Impulsfluss an der Meeresoberfläche. Über die Windschubspannung wirkt der Hauptantrieb für Strömung und Oberflächenwellen. Klassische Theorien für das Windprofil in der Grenzschicht Luft-Wasser basieren auf der Annahme, dass die Windschubspannung in einer wassernahen Schicht konstant ist (z.B. FOKEN, 2006). In einer dünnen Grenzschicht direkt am Boden dagegen sollen molekulare Prozesse dazu führen, dass sich Luft und Wasser dort mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen. So ergibt sich für den Wind ein logarithmisches Profil.

Der Windschubkoeffizient wird als indirektes Maß für die Oberflächenrauhigkeit verstanden. Für mittlere Windgeschwindigkeiten und neutrale Luftschichtung gibt es viele empirische Ansätze. Für die Nordsee hat sich der Ansatz nach SMITH und BANKE (1975) bewährt (GERRITSEN et al., 1988; JANSSEN 1996). Diese Formel wird im operationellen Betrieb für alle Modelle des BSH benutzt und ist auch der Standard im Projekt MUSE.

Der Parametrisierung von SMITH und BANKE (1975) liegen Daten im Bereich von 3 m $s^{-1}$ bis etwa 22 m $s^{-1}$ zu Grunde. Für diesen Bereich ist ein Anwachsen des Windschubspannungskoeffizienten mit zunehmender Windgeschwindigkeit durch viele Messungen bestätigt. Das entspricht einer Abhängigkeit der Oberflächenrauhigkeit von der Wellenhöhe. Nicht gesichert ist der Ansatz für kleine Windgeschwindigkeiten und für sehr hohe. Probleme im Bereich kleiner Windgeschwindigkeiten werden hier nicht diskutiert. Die Gültigkeit der Parametrisierung des Impulseintrags in die Nordsee bei hohen Windgeschwindigkeiten ist jedoch für die Beurteilung der Modellergebnisse von entscheidender Bedeutung. So werden bei Winden über 40 $ms^{-1}$ Wellen steiler und kürzer und der Wind spürt eher eine geschlossene glatte Oberfläche (POWELL et al., 2003). Grundlegender ist, dass mit zunehmender Windgeschwindigkeit immer mehr Wasser in die Luft spritzt und brechende Wellen Luft ins Wasser mischen. Dadurch bricht die Modellvorstellung eines Mediums, das an einem anderen haftet und dieses mitzieht, zusammen. Daher werden sich einfache empirische Ansätze in der funktionalen Beziehung ihrer Parameter ändern. Hält man das Konzept eines Windschubkoeffizienten aufrecht, so deuten Messungen auf eine Konstanz (z.B. AMOROCHO et al., 1980; EMANUEL, 2003) oder sogar eine Abnahme des Windschubkoeffizienten bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten (POWELL et al., 2003).

Die in dieser Studie verwendeten Windschubkoeffizienten haben als Funktion der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe $U_{10}$ die Form:

$$1000 \cdot c_D = a_1 + a_2 |U_{10}| + a_3 |U_{10}|^2 \text{ mit } U_{10}\text{: Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe.}$$

Neben den bekannten linearen Ansätzen ($a_3 = 0$) von WU (1982), ONVLEE (1993) und SEMTNER (1975) wurden aus den vorhandenen Daten für hohe Windgeschwindigkeiten (Abb. 8) versuchsweise zwei weitere Ansätze „red.1“ ($a_1 = 1{,}36$, $a_2 = 0{,}053$ und $a_3 = -0{,}001$ für $U_{10} > 21{,}56$ $ms^{-1}$) und „red.2“ ($a_1 = 2{,}61$, $a_2 = a_3 = -0$ für $U_{10} > 30$ $ms^{-1}$) abgeleitet. In Abb. 8 sind alle verwendeten Ansätze zusammen mit den zu Grunde liegenden Daten dargestellt. Für hohe Windgeschwindigkeiten streuen die Daten stark und es bleibt offen, ob Zusammenhänge, die in Hurrikanen über dem tiefen Ozean gefunden wurden, auch für Zyklonen über Schelfgebieten gültig bleiben.

Eine Extrapolation des Ansatzes von SMITH und BANKE (1975) ($a_1 = 0{,}63$, $a_2 = 0{,}066$ und $a_3 = 0$) ist bis zu $U_{10m} = 26$ $ms^{-1}$ akzeptiert. Während der Sturmflut von 3.12.1999 lagen die Windgeschwindigkeiten mit maximal 51 m $s^{-1}$ zeitweise deutlich über diesem Wert. Daher wurden für diese Sturmflut Neuberechnungen mit allen vorgestellten Ansätzen durchgeführt (Abb. 9). Im Bereich zwischen Bremerhaven und Wittdün sowie in Helgoland zeigt die Simulation mit dem Ansatz red.1 mit Abweichungen zwischen –0,25 m in Husum und +0,15 m in Helgoland die beste Übereinstimmung mit den beobachteten HThw. Die Simulation mit dem Ansatz von WU (1980/82) und ONVLEE (1993) zeigen für die meisten der betrachteten Pegel die größte Abweichung. Maximale Abweichung wird für beide Ansätze in Dagebüll erreicht (+0,84 m für WU, 1982 und +0,76 m für ONVLEE, 1993). Für Orte, die nicht so stark von der Sturmflut betroffen waren ist die Übereinstimmung zum Teil sehr gut. Die Simulation mit dem Ansatz von SMITH und BANKE (1975) liegen im Mittelfeld und überschätzen die Scheitelwasserstände im Bereich von Wilhelmshaven bis List sowie in Helgo-

land um 0,16 m (Wilhelmshaven) bis maximal 0,63 m (Dagebüll). Da jedoch die Neuberechnungen der Sturmflut von 1962 mit dem Ansatz von SMITH und BANKE (1975) zu einer weitgehenden Unterschätzung der Scheitelwasserstände führten (Abb. 12), wurde auf einen grundsätzlichen Wechsel im Windschubansatz verzichtet. Stattdessen wurde die Untersuchung standardmäßig mit dem Ansatz für SMITH und BANKE (1975) durchgeführt und für die extreme Sturmflut noch einmal die Variation der Scheitelwasserstände mit allen angegebenen Ansätzen dargestellt (Abb. 20 und Tab. 9).

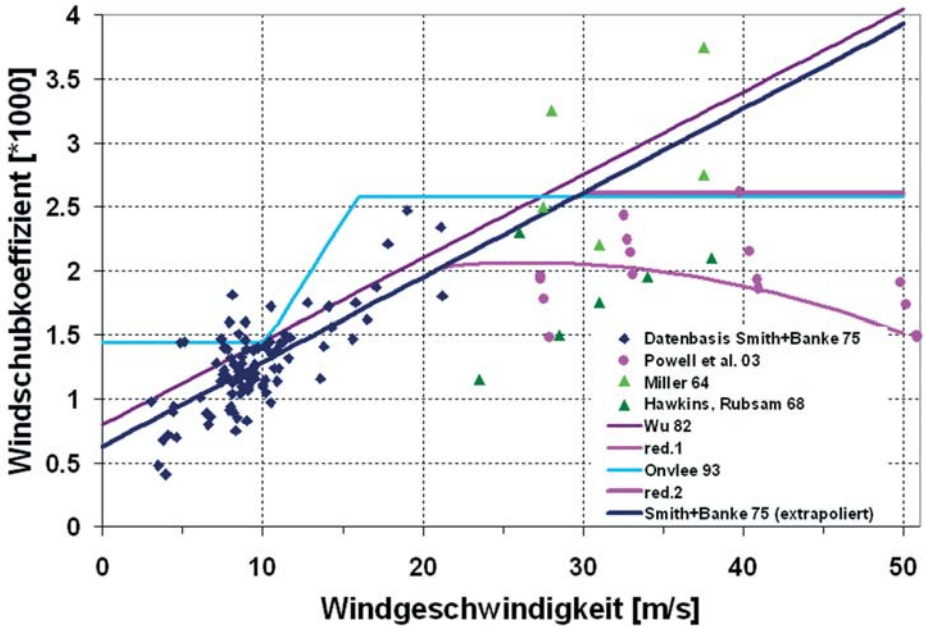


Abb. 8: Verwendete Ansätze für den Windschubkoeffizienten und deren Datengrundlage

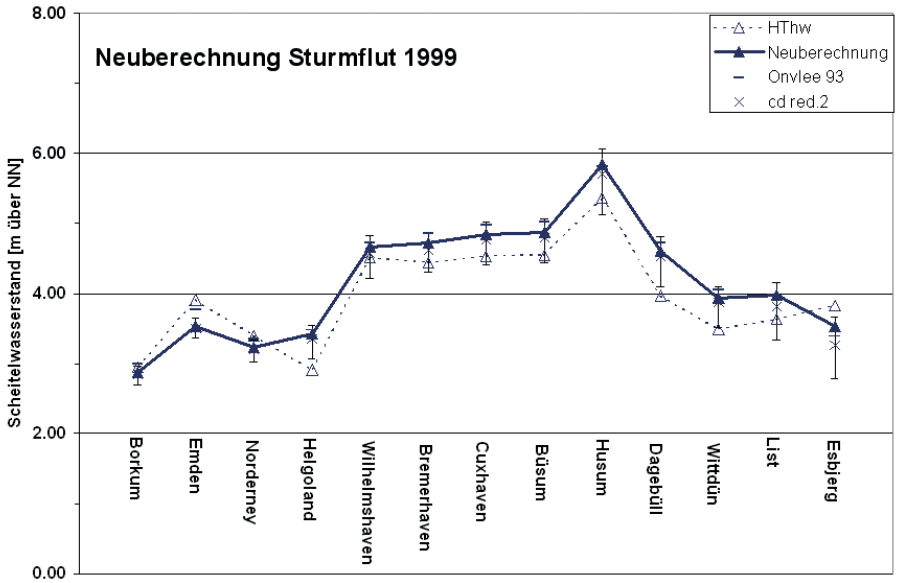


Abb. 9: Regionale Verteilung der Scheitelwasserstände bei verschiedenen Ansätzen für den Windschubspannungskoeffizienten, Neuberechnung der Sturmflut vom 3.12.1999 (IFS/LM, Küstenmodell). Bandbreiten von cd red.1 (untere Grenze) bis WU (1982) (obere Grenze)

### 3.4 Analyse der extremen Sturmfluten

Zur Identifizierung extremer Sturmfluten diente der mit dem Staumodell simulierte Wasserstand und der daraus abgeleitete Stau in Cuxhaven. Wie die Effektivwinde (Abb. 6) variiert auch der Scheitelwasserstand bei Stauwetterlagen wie 1962 wenig (Abb. 10). 1976 dagegen zeigt neben dem Scheitelwasserstand auch der zeitliche Verlauf signifikante Unterschiede für die einzelnen Realisierungen der Sturmflut (Abb. 11).

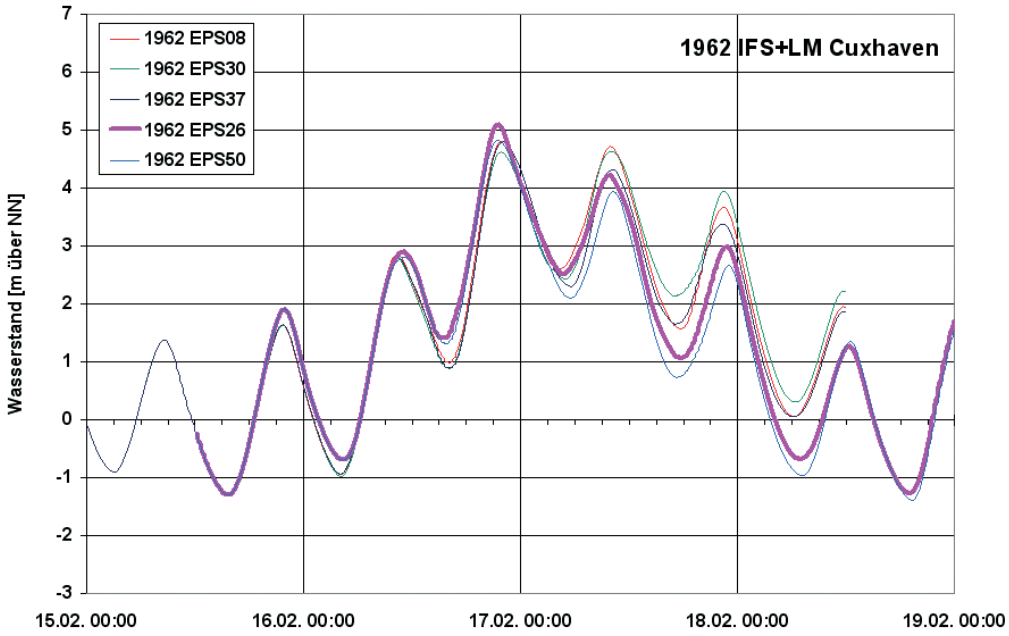


Abb. 10: Zeitliche Entwicklung des Wasserstands in Cuxhaven von Realisierungen der Sturmflut vom 16./17.2.1962 für Effektivwinde größer als 22 $ms^{-1}$ (IFS/LM, Staumodell)

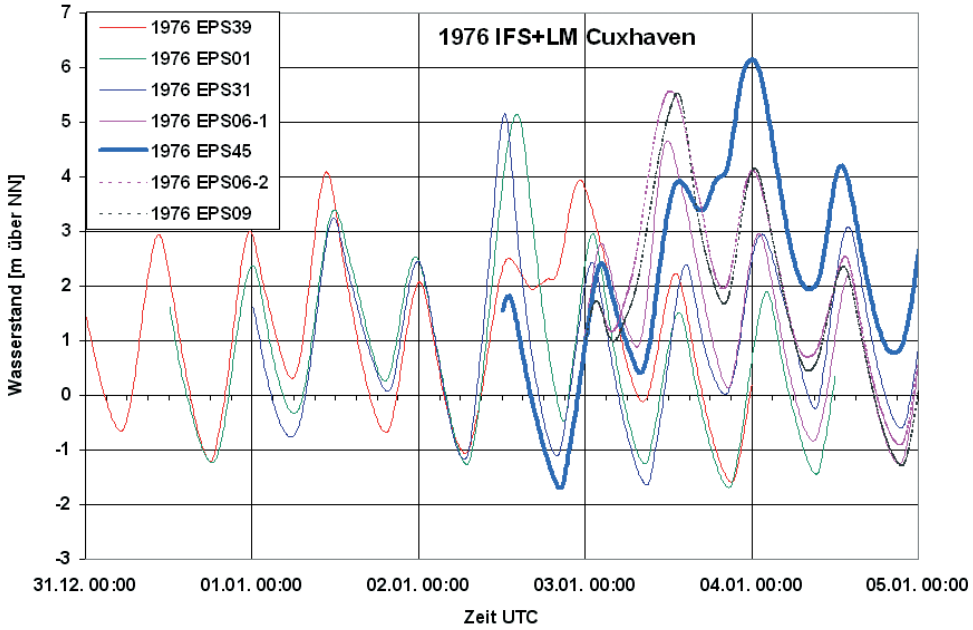


Abb. 11: Zeitliche Entwicklung des Wasserstands in Cuxhaven von Realisierungen der Sturmflut vom 3.1.1976 für Effektivwinde größer als 22 $ms^{-1}$ (IFS/LM, Staumodell)

### 3.4.1 Definition

Als extrem wird hier eine Sturmflut definiert, wenn ihr Scheitelwasserstand in Cuxhaven 6 m über NN erreicht oder übersteigt oder wenn ihr Stau in Cuxhaven relativ zum zeitlich nächsten Hoch- oder Niedrigwasser der vom Modell vorausberechneten Gezeit größer oder gleich 4,50 m ist.

Für die mit der Modellkette IFS/LM erzeugten meteorologischen Felder erfüllt diese Kriterien nur eine Realisierung der Sturmflut 1990, EPS20, sowie eine der Sturmflut 1976, EPS45.

Der maximale Effektivwind, 31,3 m $s^{-1}$, wurde für eine LM-Simulation zur Sturmflut 1999, EPS05 erreicht. Mit einem Scheitelwasserstand in Cuxhaven von 5,63 m über NN und einem Stau relativ zum Hochwasser der Modellgezeit von 4,22 m erfüllt sie nicht die Kriterien einer extremen Sturmflut. Trotzdem wurde die entsprechende Sturmflutsimulation mit dem Küstenmodell nachgerechnet, da die Sturmflut 1999 u.a. Anlass zu dieser Untersuchung gegeben hat.

Die Sturmflut 1962 ist wegen ihrer verheerenden Folgen noch immer in Erinnerung. Daher wird ihre extreme Realisierung, EPS26, ebenfalls hier diskutiert, obwohl ihre Realisierungen in Cuxhaven für die Modellkette IFS/LM nicht einmal den bisher höchsten dort beobachteten Scheitelwasserstand von 5,10 m über NN erreichen.

Die Starttermine der EPS-Simulationen, denen die extremen Realisierungen dieses Abschnitts angehören, sind in Tab. 4 zusammen mit den Eintrittszeiten der Scheitelhochwasser in Cuxhaven aufgelistet.

Tab. 4: Starttermine und Eintrittszeiten der Scheitelwasserstände (UTC) in Cuxhaven (IFS/LM, Küstenmodell und Beobachtung) für die extremen Sturmfluten

| Sturmflut | Starttermin | | Eintrittszeit HW | | Eintrittszeit HThw | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1962 EPS26 | 15.02.1962 | 12:00 | 16.02.1962 | 21:27 | 16.02.1962 | 21:40 |
| 1999 EPS05 | 03.12.1999 | 06:00 | 03.12.1999 | 18:58 | 03.12.1999 | 19:18 |
| 1990 EPS20 | 23.02.1990 | 00:00 | 27.02.1990 | 13:10 | 27.02.1990 | 00:42 |
| 1976 EPS45 | 02.01.1976 | 12:00 | 03.01.1976 | 23:55 | 03.01.1976 | 13:20 |

### 3.4.2 Sturmflut vom Windstautyp: 1962 EPS26

Typisch für die Nordsee sind Sturmfluten vom Zirkulartyp. Die Sturmflut 1962 ist neben derjenigen von 1825 die bekannteste Sturmflut vom Windstautyp. Die erzeugende Wetterlage erwies sich als relativ stabil gegenüber Störungen im Anfangsfeld der meteorologischen Simulationen. Besonders eine in der Literatur diskutierte weiter südliche verlaufende Zugbahn des Tiefdruckgebiets (ROEDIGER, 1962) war nicht unter den Realisierungen mit einem Effektivwind über 22 m $s^{-1}$. Entsprechend gering ist auch die Abweichung der Scheitelwasserstände von den beobachteten Werten für alle Küstenpegel (Abb. 12).

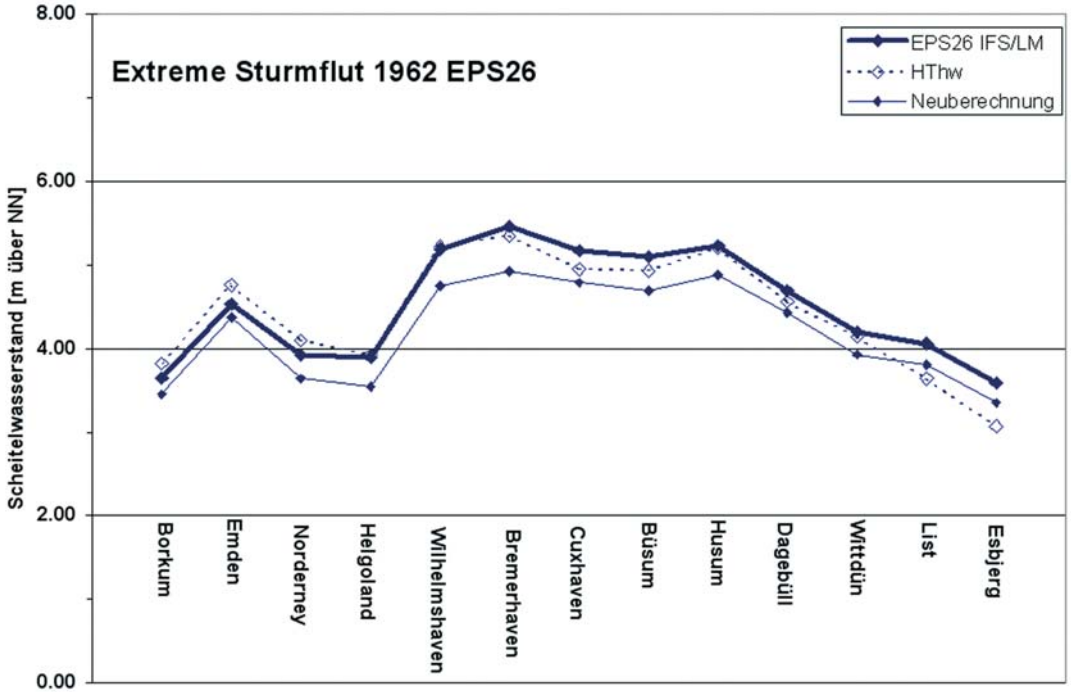


Abb. 12: Regionale Verteilung der Scheitelwasserstände für die Sturmflut 1962 (1962 EPS26, IFS/LM, Küstenmodell, und Beobachtung)

Tab. 5: Scheitelwasserstände entsprechend Abb. 12 sowie Differenzen für Küstenorte

| Ort | 1962 EPS26 | HThw | Differenz |
|---|---|---|---|
| Borkum | 3,65 | 3,82 | –0,17 |
| Emden | 4,53 | 4,76 | –0,23 |
| Norderney | 3,92 | 4,10 | –0,18 |
| Helgoland | 3,90 | 3,92 | –0,02 |
| Wilhelmshaven | 5,19 | 5,22 | –0,03 |
| Bremerhaven | 5,46 | 5,35 | 0,11 |
| Cuxhaven | 5,17 | 4,95 | 0,22 |
| Büsum | 5,10 | 4,93 | 0,17 |
| Husum | 5,23 | 5,20 | 0,03 |
| Dagebüll | 4,69 | 4,56 | 0,13 |
| Wittdün | 4,20 | 4,14 | 0,06 |
| List | 4,06 | 3,64 | 0,42 |
| Esbjerg | 3,59 | 3,07 | 0,52 |

### 3.4.3 Maximaler Effektivwind: 1999 EPS05

Der als Auswahlkriterium genutzte Effektivwind wurde für Cuxhaven als Maß für die Stauwirksamkeit des Windes entwickelt. Die Voruntersuchungen haben gezeigt, dass für die IFS/LM-Winde die Wettersituation mit dem maximalen Effektivwind, eine Realisierung des Sturms von 1999 (EPS05), weder den Windstau noch den Scheitelwasserstand in Cuxhaven maximiert. Auch sonst bestand bei den hier untersuchten Extremsturmfluten kein einfacher Zusammenhang zwischen Effektivwind und Windstau. Besonders für Sturmfluten vom Zirkulartyp mit schnell ziehenden, kleinen Tiefdruckgebieten ist das auch nicht zu erwarten.

Für 1999 EPS05 ist in Cuxhaven der Stau relativ zum zeitlich nächsten Hochwasser der Gezeit nicht extrem im Sinne der Definition in Abschnitt 3.4.1. Er übersteigt jedoch deutlich den beobachteten Wert (Abb. 13). Dies gilt auch für andere Küstenorte der Deutschen Bucht. Die Abb. 14 zeigt für die extreme Sturmflut und zum Vergleich für die Neuberechnung den für eine Zirkularsturmflut typischen Anstau des Wassers in einem schmalen Küstenbereich.

Im Gegensatz zur Sturmflut 1962 verläuft bei der Sturmflut, 1999 EPS05, die Zugbahn des Tiefdruckgebietes wirklich weiter südlich als bei der tatsächlich eingetretenen Sturmflut. Der minimale Bodenluftdruck (auf dem Gitter des Nordostatlantikmodells) war jedoch mit 959,65 hPa für die extreme Wetterlage höher als bei der Neuberechnung (952,99 hPa).

Die Scheitelwasserstände der Küstenorte liegen für die extreme Sturmflut 1999 EPS05, bis zu 1,31 m über den beobachteten Werten (Abb. 15 und Tab. 6).

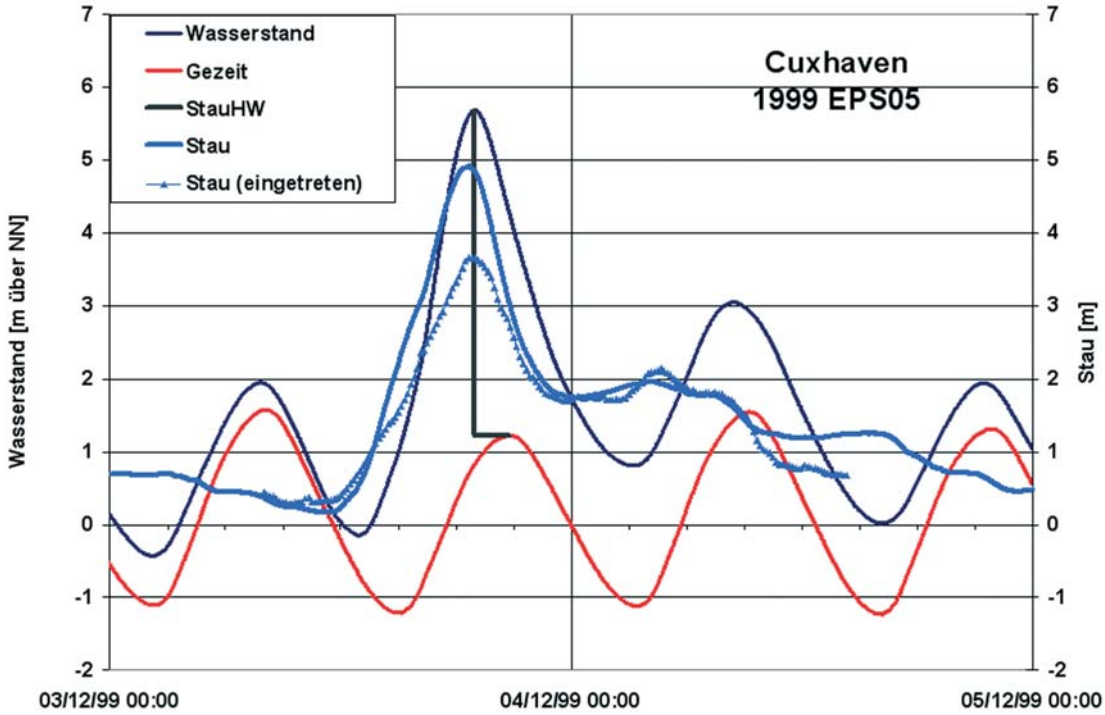


Abb. 13: Zeitliche Entwicklung des Windstaus und $Stau_{HW}$ in Cuxhaven (IFS/LM, Küstenmodell, 1999 EPS05) im Vergleich zum tatsächlich eingetretenen Stau

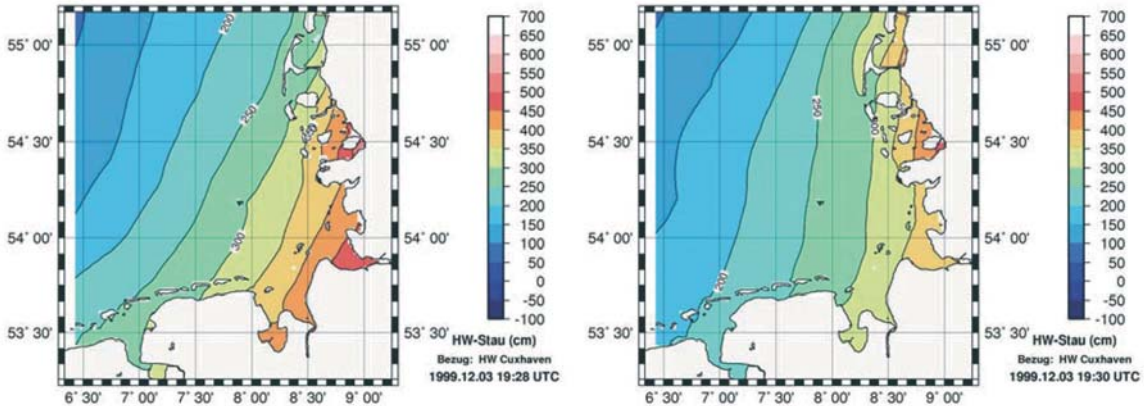


Abb. 14: Horizontale Verteilung des Staus relativ zum zeitlich nächsten Gezeitenhochwasser des jeweiligen Ortes. Links: 1999 EPS05. Rechts: 1999 Neuberechnung

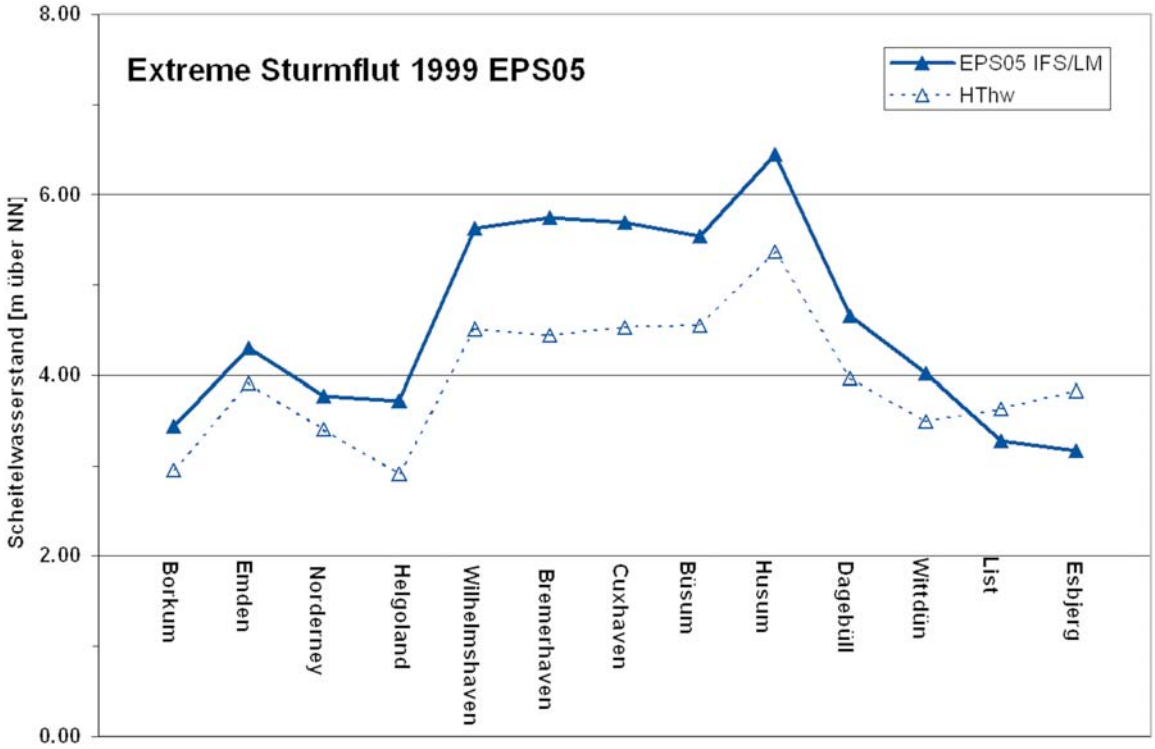


Abb. 15: Scheitelwasserstände für Küstenorte im Bereich der Deutschen Bucht. 1999 EPS05 (IFS/LM, Küstenmodell) und Beobachtung (nach MÜLLER-NAVARRA et al., 2003)

Tab. 6: Scheitelwasserstände entsprechend Abb. 15 sowie Differenzen für Küstenorte

| Ort | 1999 EPS05 | HThw | Differenz |
|---|---|---|---|
| Borkum | 3,44 | 2,95 | 0,49 |
| Emden | 4,30 | 3,91 | 0,39 |
| Norderney | 3,77 | 3,40 | 0,37 |
| Helgoland | 3,72 | 2,91 | 0,81 |
| Wilhelmshaven | 5,63 | 4,51 | 1,12 |
| Bremerhaven | 5,75 | 4,44 | 1,31 |
| Cuxhaven | 5,69 | 4,53 | 1,16 |
| Büsum | 5,54 | 4,55 | 0,99 |
| Husum | 6,45 | 5,37 | 1,08 |
| Dagebüll | 4,66 | 3,97 | 0,69 |
| Wittdün | 4,02 | 3,49 | 0,53 |
| List | 3,28 | 3,63 | -0,35 |
| Esbjerg | 3,17 | 3,83 | -0,66 |

### 3.4.4 Extremer Stau bei NW: 1990 EPS20

Die Sturmflut 1990 zeichnete sich durch eine Häufung von Sturmfluten während eines kurzen Zeitraums (zwischen 26.2. 00:32 UTC und 28.2. 01:30 UTC) aus. Entsprechend zahlreich waren die Starttermine für die EPS-Simulationen. Trotzdem ist nur eine dieser Realisationen eine extreme Sturmflut im Sinne der obigen Definition. Das Staumodell errechnet in Cuxhaven für EPS20 einen Stau bezogen auf das zeitlich nächste Niedrigwasser von 4,52 m, ein Wert knapp über den geforderten 4,50 m. Das Küstenmodell simuliert in Cuxhaven einen $Stau_{NW}$ -Wert von 4,69 m (Abb. 16 und Tab. 7).

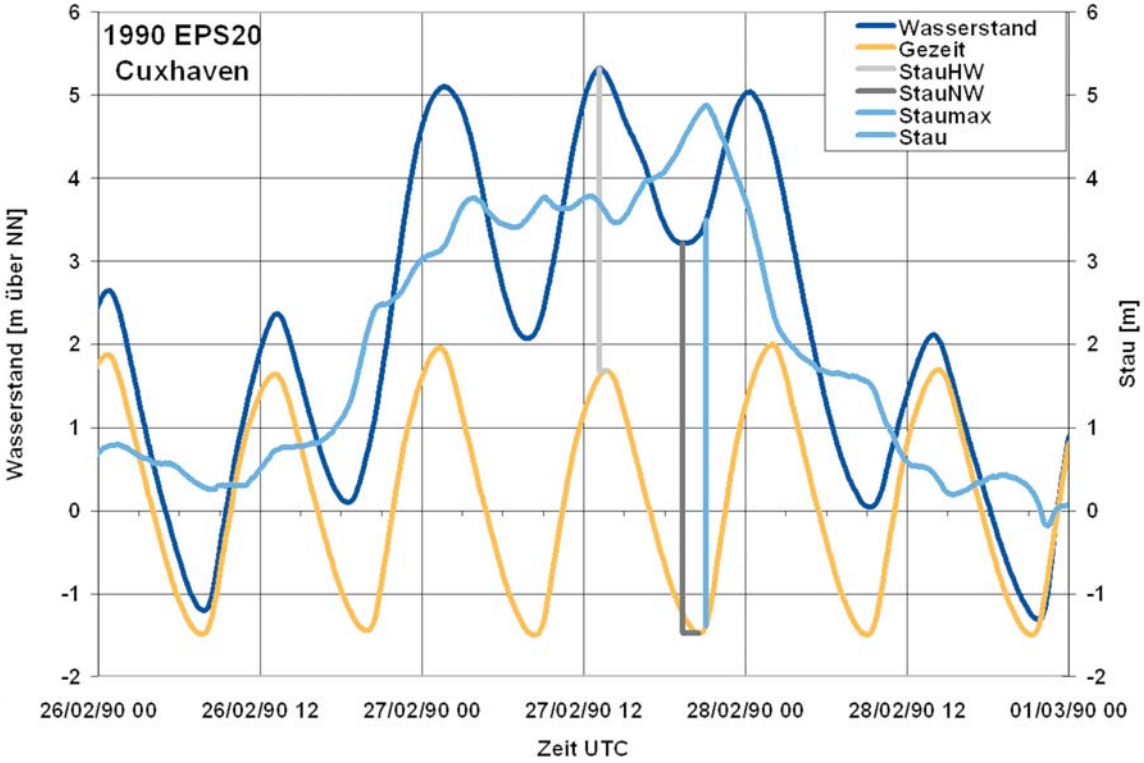


Abb. 16: Zeitliche Entwicklung von Windstau, Wasserstand und Gezeit in Cuxhaven für 1990 EPS20, sowie maximaler $Stau_{HW}$, $Stau_{NW}$ und $Stau_{max}$ (IFS/LM, Küstenmodell)

Tab. 7: Stau HW, Stau NW und maximaler Stau für Küstenorte (1990 EPS20, IFS/LM, Küstenmodell)

| | $Stau_{HW}$ | $Stau_{NW}$ | $Stau_{max}$ |
|---|---|---|---|
| Borkum | 2,91 | 4,07 | 4,28 |
| Emden | 3,53 | 4,62 | 5,46 |
| Norderney | 2,88 | 4,27 | 4,34 |
| Helgoland | 2,84 | 3,85 | 3,87 |
| Wilhelmshaven | 3,35 | 5,10 | 5,14 |
| Bremerhaven | 3,52 | 4,72 | 5,47 |
| **Cuxhaven** | **3,64** | **4,69** | **4,88** |
| Büsum | 3,56 | 4,85 | 4,87 |
| Husum | 3,97 | 4,13 | 5,17 |
| Dagebüll | 3,93 | 3,57 | 4,10 |
| Wittdün | 3,47 | 3,69 | 3,80 |
| List | 3,57 | 3,79 | 3,85 |
| Esbjerg | 3,51 | 3,09 | 3,72 |

### 3.4.5 Die extreme Sturmflut: 1976 EPS45

Für die Modellkette IFS/LM ist die extreme Sturmflut eine Realisation der Sturmflut 1976: EPS45. Sie wird hier als die extreme Sturmflut dieser Studie im Detail diskutiert.

### 3.4.5.1 Fernwelle

Das IFS, das die Randwerte für das LM erzeugt, ist ein globales Modell. Als solches liefert es in Kombination mit dem LM Antriebsdaten für das Nordostatlantikmodell, mit dem für jede Wetterlage der Wasserstand berechnet wird. Der Wasserstand am Nordrand der Nordsee läuft innerhalb der Modellkette in die Nordsee hinein. Damit hat jede Realisierung einer Sturmflut ihre eigene Fernwelle, auch die extreme Realisierung EPS45 (Abb. 17). Wick, Aberdeen und Immingham zeigen beträchtlichen Stau. Die einfache Modellvorstellung einer entgegen dem Urzeigersinn entlang der Küsten die Nordsee durchlaufenden Fernwelle (ANNUTSCH, 1977) trifft nicht immer zu. Jedenfalls sind im Einzelfall Fernwellenanteil und der Anteil des lokalen Windstaus am Gesamtstau schwer quantifizierbar. Das ist aber bei der gewählten Modellkonfiguration auch gar nicht nötig, denn letztlich interessiert am Ende nur der Scheitelwasserstand.

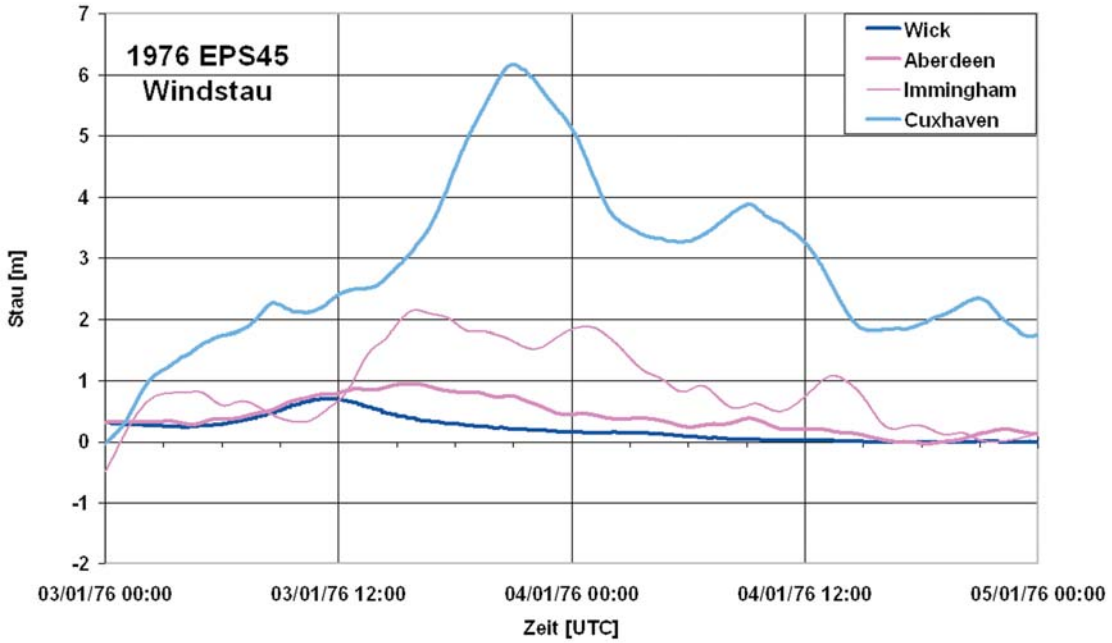


Abb. 17: Zeitliche Entwicklung des Windstaus in Cuxhaven (IFS/LM, Küstenmodell) sowie in Wick, Aberdeen und Immingham (IFS/LM, Nord- und Ostseemodell)

### 3.4.5.2 Windstau

Für die Realisierung, 1976 EPS45, ist der Windstau in Cuxhaven bezogen auf Niedrigwasser extrem und etwas größer als derjenige bezogen auf Hochwasser. Die räumliche Verteilung (Abb. 18, Tab. 8) zeigt im gesamten östlichen Teil der Deutschen Bucht extremen Windstau bezogen auf die astronomische Niedrigwasserhöhe.

Wie bei der Sturmflut vom 27./28.2.1990 entsteht bei der Sturmflut vom 3.1.1976 die extreme Sturmflut durch eine Stauwetterlage im Rücken des ursprünglichen Sturmtiefs. Während bei der Re-Analyse der Kern des Tiefdruckgebiets schon am 3.1.1976, 12.00 Uhr, die westliche Ostsee verlassen hat, verweilt er dort für die extreme Wetterlage bis zum 3.1.1976, 21.00 Uhr. Da die ursprüngliche Sturmflut vom negativen Zirkulartyp (DOLATA et al., 1983) war, entwickelt sich nach Durchzug des Tiefs in der Deutschen Bucht die extreme Sturmflut als eine vom Windstautyp. So entstand trotz der nördlicheren Zugbahn (Abb. 19) ein größerer Windstau.

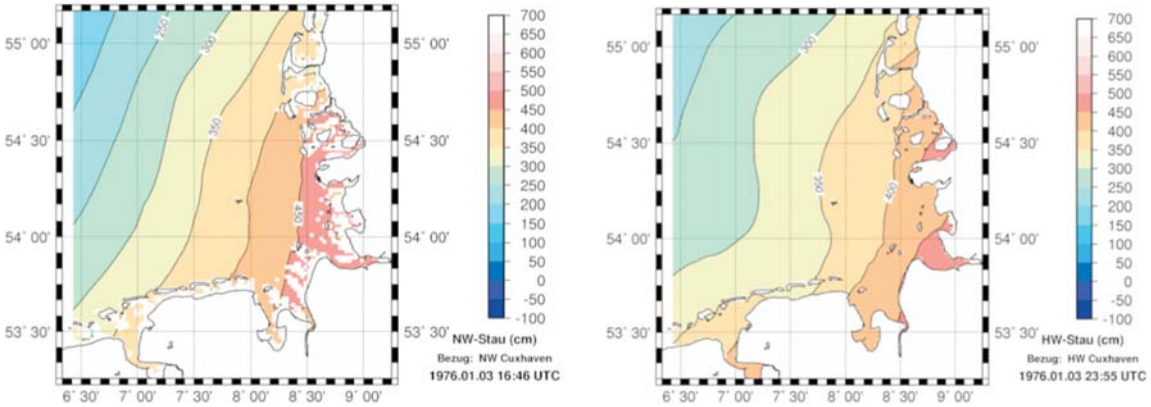


Abb. 18: Horizontale Verteilung des Staus relativ zum zeitlich nächsten Extremwert der Gezeit des jeweiligen Ortes für 1976 EPS45. Links: Relativ zur Gezeitenniedrigwasserhöhe. (In den weißen Bereichen ist der $Stau_{NW}$ nicht definiert, da dort die Gezeitenniedrigwasserhöhe wegen Trockenfalls unbestimmt ist.) Rechts: Relativ zur Gezeitenhochwasserhöhe

Tab. 8: Stau relativ zum zeitlich nächsten Niedrigwasser, Stau relativ zum zeitlich nächsten Hochwasser der Gezeit und maximaler Windstau für Küstenorte in der Deutschen Bucht (IFS/LM, 1976 EPS45, Küstenmodell). Thw-MThw und Tnw-MTnw nach (SINDERN et al., 1979). $T_{GHW}$ und $T_{GNW}$ sind die Eintrittszeiten der Scheitelwasserstände und der extremen NW relativ zu den Extremwerten der Gezeit

| | Thw-MThw | $Stau_{HW}$ | $T_{GHW}$ [h:mm] | Tnw-MTnw | $Stau_{NW}$ | $T_{GNW}$ [h:mm] | $Stau_{max}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Borkum | 2,54 | 3,58 | –1:30 | 2,52 | 3,37 | –1:38 | 4,31 |
| Emden | 3,22 | 4,42 | –2:28 | 2,94 | 3,89 | –3:08 | 6,10 |
| Norderney | 2,72 | 3,57 | –1:40 | 2,31 | 3,75 | –2:06 | 4,71 |
| Helgoland | 2,62 | 3,58 | –0:22 | 1,97 | 3,88 | –2:13 | 4,56 |
| Wilhelmshaven | 3,07 | 4,27 | –2:27 | 2,56 | 4,39 | –2:47 | 6,09 |
| Bremerhaven | 3,48 | 4,67 | –1:45 | 2,77 | 4,36 | –3:45 | 6,93 |
| Cuxhaven | 3,66 | 4,65 | –1:38 | 2,36 | 4,78 | –3:16 | 6,17 |
| Büsum | 3,63 | 4,38 | –1:20 | 2,18 | 5,35 | –2:56 | 6,17 |
| Husum | 4,11 | 4,83 | –2:39 | 1,95 | 5,26 | –1:22 | 6,87 |
| Dagebüll | 3,22 | 4,13 | –1:30 | 2,06 | 4,44 | –1:45 | 5,22 |
| Wittdün | 2,92 | 3,88 | –1:03 | 1,98 | 4,30 | –1:46 | 4,67 |
| List | 3,21 | 3,80 | –2:07 | 1,93 | 3,77 | –0:30 | 4,15 |
| Esbjerg | | 3,27 | –3:02 | | 2,78 | –1:23 | 3,98 |

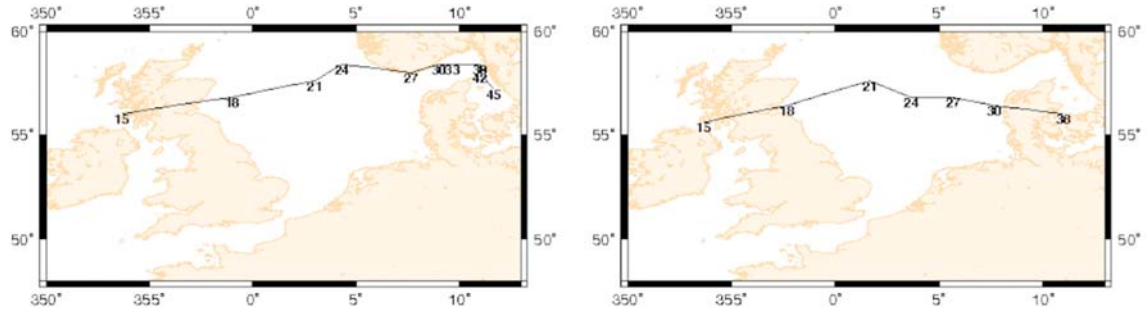

Abb. 19: Zugbahnen der Tiefdruckgebiete: Ort und Zeit minimalen Bodenluftdrucks vom 2.1.1976, 15 Uhr (15) bis zum 3.1.1976, 21 Uhr (45) bzw. 9 Uhr (36) (Nordostatlantikmodell). Links: IFS/LM,1976 EPS45. Rechts: IFS, Re-Analyse

### 3.4.5.3 Scheitelwasserstand und Windschubansatz

Die Scheitelwasserstände liegen entlang der gesamten deutschen Nordseeküste deutlich über den beobachteten HThw. Der Windschubparameter wurde entsprechend Abschnitt 3.3 variiert. Die Bandbreite der Ergebnisse (Tab. 9) ist Ausdruck der einfachen Modellierung des Impulsaustauschs zwischen Ozean und Atmosphäre in den derzeitigen Modellen des BSH und dafür, dass es nur wenige Messungen im Bereich hoher Windgeschwindigkeiten gibt.

Die Werte mit dem Ansatz von WU (1982) stellen keine obere Grenze für die Schwankungsbreite dar. Zum Beispiel wurde eine lineare Anpassung des Ansatzes von CHARNOCK, der auch in Nordseemodellen angewandt wurde, hier nicht noch einmal getestet, weil er schon bei geringen und mittleren Windgeschwindigkeiten zu hohe Wasserstände erzeugt (vergl. JANSSEN, 1996). Für 1976 EPS45 werden, anders als bei der Neuberechnung der Sturmflut vom 3.12.1999, die Wu82-Werte außer in Husum immer von den Onvlee93-Werten übertroffen. Der erste unter Berücksichtigung der Daten von POWELL et al. (2003) vorgeschlagene Ansatz (red.1) dagegen stellt mit ziemlicher Sicherheit eine untere Grenze dar.

Die Darstellung der Scheitelwasserstände (Abb. 21 und 22) ist ein wichtiges Ergebnis des BSH-Teilprojekts. Die Scheitelwasserstände, verursacht durch die extreme IFS/LM-Sturmflutwetterlage, 1976 EPS45, sind so dargestellt, dass sie leicht ablesbar sind. Der Verlauf der Linien gleichen Scheitelwasserstandes, der nicht überall gleichzeitig eintritt, ist recht einfach strukturiert. Die höchsten Wasserstände treten in Ästurarien und Buchten auf. Danach ist der Küstenabschnitt zwischen Wilhelmshaven und Husum deutlich stärker von extremen Wasserständen betroffen als weiter östlich und weiter nördlich liegende Orte.

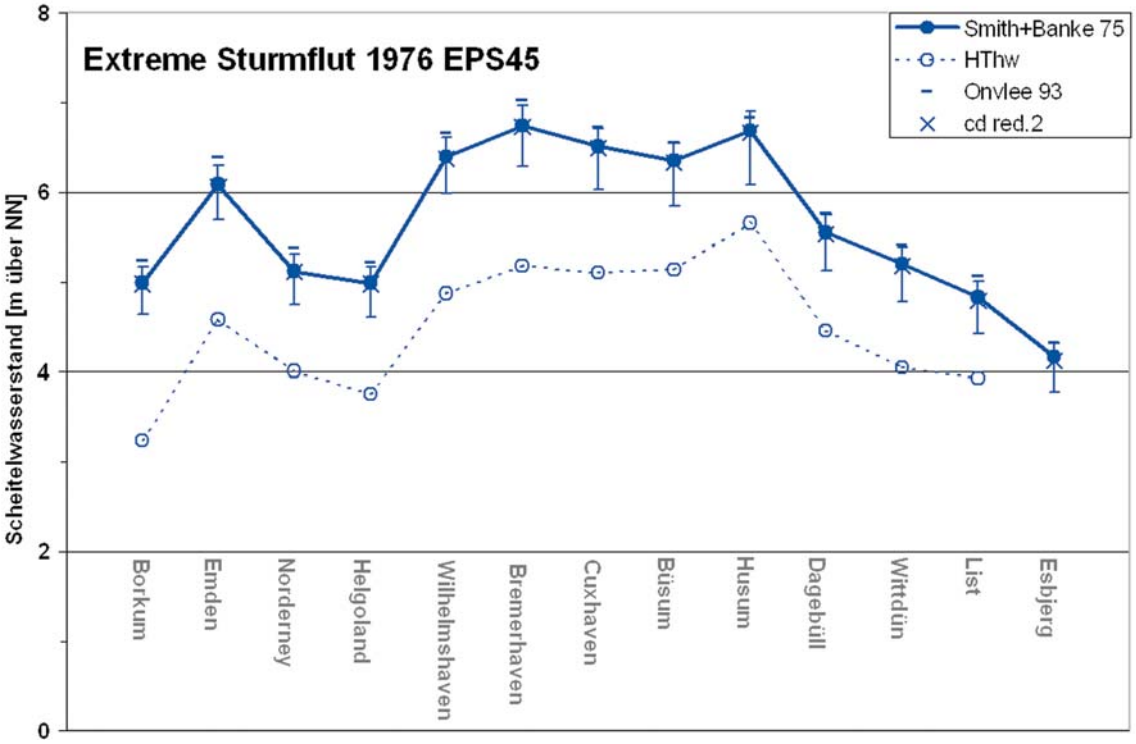


Abb. 20: Scheitelwasserstände für Küstenorte im Bereich der Deutschen Bucht (IFS/LM, Küstenmodell) mit Schwankungsbreiten entsprechend unterschiedlicher Ansätze für den Windschubspannungskoeffizienten, Bandbreiten von red.1 (untere Grenze) bis Wu82 (obere Grenze)

Tab. 9: Scheitelwasserstände [m über NN] und Schwankungsbreiten [m]

| | HThw | Wu80/82 | Onvlee93 | Smith + Banke 75 | red.2 | red.1 | Bereich relativ zu Smith + Banke 75 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Borkum | 3,24 | 5,17 | 5,23 | 4,99 | 4,98 | 4,64 | +0,24 | –0,35 |
| Emden | 4,58 | 6,30 | 6,39 | 6,09 | 6,06 | 5,70 | +0,30 | –0,39 |
| Norderney | 4,01 | 5,31 | 5,37 | 5,12 | 5,11 | 4,75 | +0,25 | –0,37 |
| Helgoland | 3,76 | 5,17 | 5,21 | 4,99 | 4,98 | 4,61 | +0,22 | –0,38 |
| Wilhelms. | 4,87 | 6,61 | 6,65 | 6,40 | 6,38 | 5,99 | +0,25 | –0,41 |
| Bremerh. | 5,18 | 6,97 | 7,02 | 6,74 | 6,73 | 6,29 | +0,28 | –0,45 |
| Cuxhaven | 5,10 | 6,71 | 6,72 | 6,51 | 6,49 | 6,03 | +0,21 | –0,48 |
| Büsum | 5,14 | 6,55 | 6,55 | 6,35 | 6,33 | 5,85 | +0,20 | –0,50 |
| Husum | 5,66 | 6,91 | 6,83 | 6,69 | 6,67 | 6,09 | +0,22 | –0,60 |
| Dagebüll | 4,46 | 5,75 | 5,76 | 5,55 | 5,53 | 5,13 | +0,21 | –0,42 |
| Wittdün | 4,05 | 5,38 | 5,40 | 5,20 | 5,18 | 4,78 | +0,20 | –0,42 |
| List | 3,93 | 5,01 | 5,06 | 4,83 | 4,79 | 4,42 | +0,23 | –0,41 |
| Esbjerg | | 4,32 | 4,32 | 4,17 | 4,12 | 3,78 | +0,15 | –0,39 |

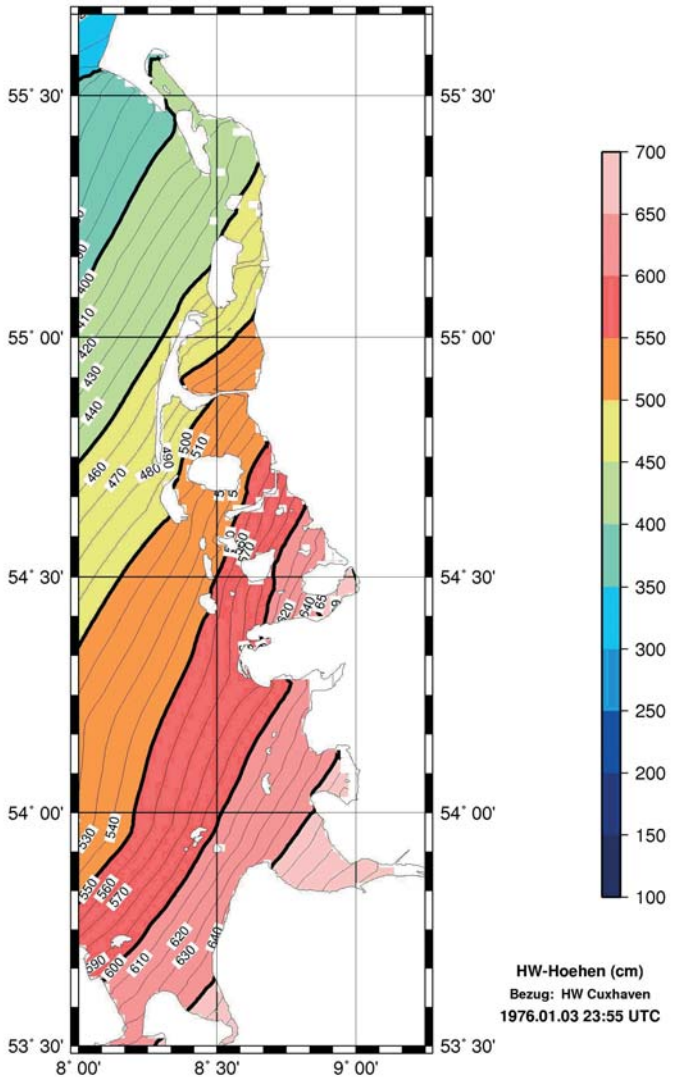


Abb. 21: Scheitelwasserstände für die Sturmflutwetterlage EPS45 1976 in der östlichen Deutschen Bucht (Küstenmodell)

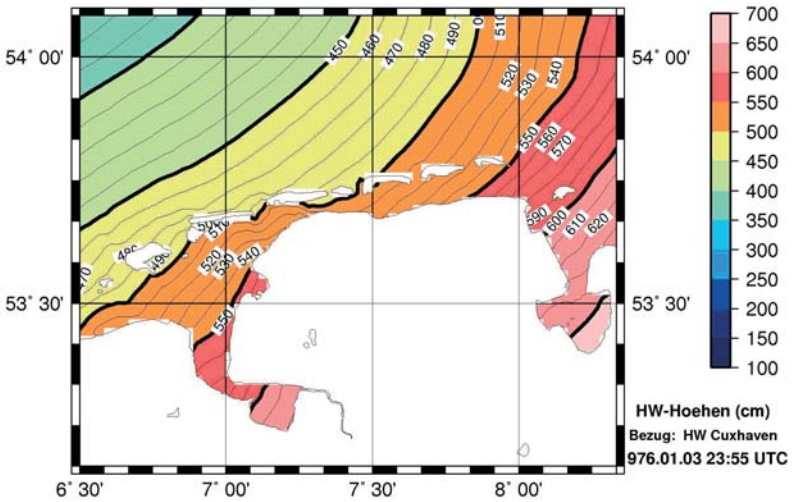


Abb. 22: Scheitelwasserstände für die Sturmflutwetterlage EPS45 1976 in der westlichen Deutschen Bucht (Küstenmodell)

### 3.4.5.4 Einordnung

Die Scheitelwerte der extremen Sturmflut 1976 EPS45 IFS/LM liegen an allen Pegelorten deutlich über allen HThw (Abb. 23). Für Husum werden ähnlich hohe Werte bei der Sturmflut 1999 EPS05 IFS/LM und in Esbjerg 1990 EPS20 IFS/LM erreicht. Übertroffen wurden die Werte teilweise von IFS-Simulationen. Im Projekt wurden jedoch die IFS/LM-Simulationen gegenüber den IFS-Läufen bevorzugt.

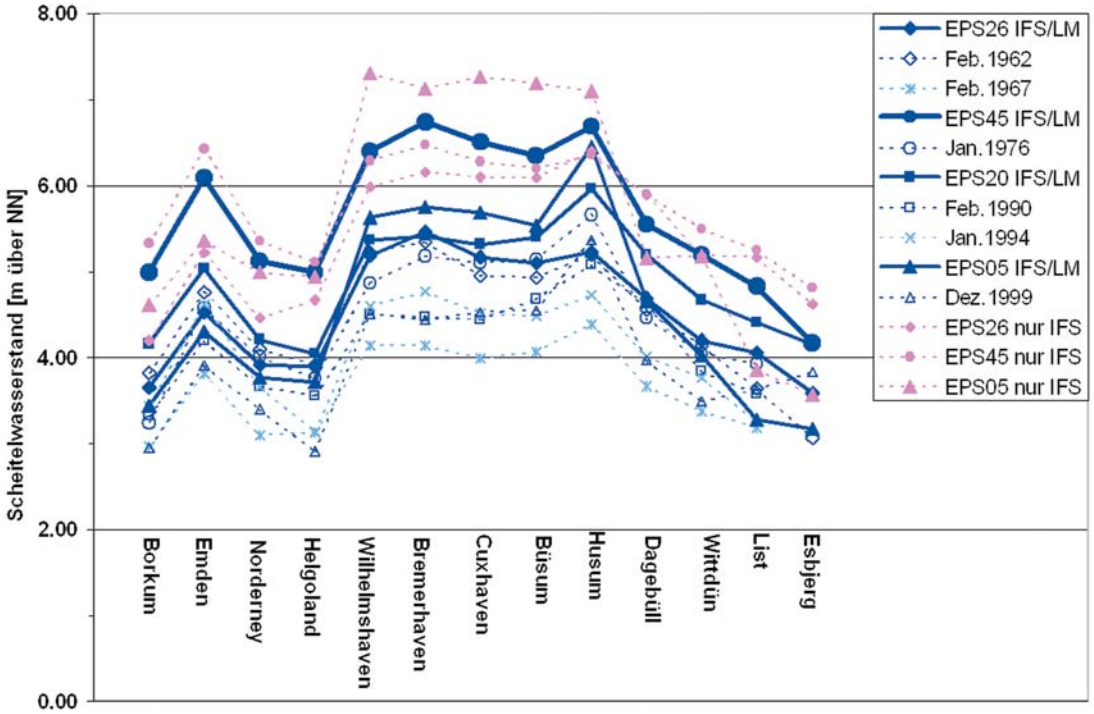


Abb. 23: Regionale Verteilung extremer Scheitelwasserstände (Küstenmodell und tatsächlich eingetretene Sturmfluten)

Die Küste, 71 (2006), 123-167



Tab. 10: Maximale Scheitelwasserstände bezogen auf NN für Küstenorte der Deutschen Bucht (IFS/LM, Küstenmodell) im Vergleich mit den Beobachtungen (bis einschließlich Juni 2005)

| Ort | 16./17.2.1962 | | 3.1.1976 | | 27.2.1990 | | 3.12.1999 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | EPS26 | HThw | EPS45 | HThw | EPS20 | HThw | EPS05 | HThw |
| Borkum | 3,65 | 3,82 | **4,99** | 3,24 | 4,16 | 3,32 | 3,44 | 2,95 |
| Emden | 4,53 | 4,76 | **6,09** | 4,58 | 5,04 | 4,20 | 4,30 | 3,91 |
| Norderney | 3,92 | 4,10 | **5,12** | 4,01 | 4,21 | 3,66 | 3,77 | 3,40 |
| Helgoland | 3,90 | 3,92 | **4,99** | 3,76 | 4,05 | 3,56 | 3,72 | 2,91 |
| Wilhelmshaven | 5,19 | 5,22 | **6,40** | 4,87 | 5,37 | 4,50 | 5,63 | 4,51 |
| Bremerhaven | 5,46 | 5,35 | **6,74** | 5,18 | 5,41 | 4,47 | 5,75 | 4,44 |
| Cuxhaven | 5,17 | 4,95 | **6,51** | 5,10 | 5,32 | 4,44 | 5,69 | 4,53 |
| Büsum | 5,10 | 4,93 | **6,35** | 5,14 | 5,40 | 4,68 | 5,54 | 4,55 |
| Husum | 5,23 | 5,20 | **6,69** | 5,66 | 5,97 | 5,08 | 6,45 | 5,37 |
| Dagebüll | 4,69 | 4,56 | **5,55** | 4,46 | 5,20 | 4,62 | 4,66 | 3,97 |
| Wittdün | 4,20 | 4,14 | **5,20** | 4,05 | 4,67 | 3,84 | 4,02 | 3,49 |
| List | 4,06 | 3,64 | **4,83** | 3,93 | 4,41 | 3,58 | 3,28 | 3,63 |
| Esbjerg | 3,59 | 3,07 | **4,17** | | 4,15 | | 3,17 | 3,83 |

### 3.5 Bewertung der hydrodynamischen Ergebnisse

Die Nordsee ist von September bis April gewöhnlich einer Reihe von Stürmen ausgesetzt. Diese ziehen meistens nördlich der Britischen Inseln oder über sie hinweg nach Osten und brauchen dabei etwa einen Tag, um Skandinavien zu erreichen. Bis zu einem gewissen Maß schützen die Britischen Inseln die Nordsee vor dem vollen Effekt der Stürme, da die einzige Richtung, aus der Wind unbeeinflusst von Landmassen die Nordsee erreicht, Norden ist. Trotzdem sind es oft aus Westen quer über die Nordsee ziehende kleine Tiefdruckgebiete, die zu extremen Sturmfluten führen. Schätzungen extremer Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeiten geben 39 m $s^{-1}$ in der nördlichen Nordsee und 32 m $s^{-1}$ für die südliche Nordsee an (HOWARTH, 2001).

Stauwirksame Wetterlagen wurden in dieser Studie über den Effektivwind, die Projektion des mittleren Windes auf WNW, ermittelt. Im Zustandsbericht der Nordsee von 2003 (LÖWE et al., 2005) wird eine Klassifizierung von Wetterlagen auf die Nordsee angewandt, die aus Luftdruckfeldern neben dem Wind auch die vorticity (Wirbelstärke) charakterisiert. Für zukünftige Untersuchungen ist zu überlegen, inwieweit sich in diesen Fällen aus einer solchen Klassifizierung ein besseres automatisches Auswahlkriterium für stauwirksame Wetterlagen entwickeln lässt.

Schon früh wurde versucht, Sturmflutwetterlagen zu unterscheiden. CORKAN (1948) beschreibt neun typische Sturmflutwetterlagen. RODEWALD (1965) gibt neun Merkmale an, die eine Entwicklung zur Sturmflutwetterlage kennzeichnen. KRUHL (1978) reduziert die Klassifizierung im Wesentlichen auf zwei Typen. Beim Skandinavientyp entwickeln sich auf der Rückseite des über Skandinavien ziehenden Sturmtiefs stauwirksame Nordweststürme über der Deutschen Bucht. Beim Jütlandtief zieht das Sturmtief direkt über die Nordsee und vertieft sich dort. HEWER (1980) charakterisiert entsprechend die Sturmfluten als vom Windstautyp bzw. als vom Zirkulartyp. DOLATA et al. (1983) unterscheiden zusätzlich einen positiven und einen negativen Zirkulartyp. Die Sturmflut vom 3.1.1976 gehört danach zum negativen Zirkulartyp.

HEWER (1980) war die erste, die aus konstruierten Extremwetterlagen mit hydrodynamisch-numerischen Modellen extreme Sturmfluten berechnete. Für die Extremflut vom Windstautyp, eine Variation der Sturmflut 1962, errechnete sie einen Scheitelwasserstand in Cuxhaven von 7,50 m, für die Extremflut vom Zirkulartyp (1976) 6,80 m.

Im Projekt MUSE wurden auf Grundlage des „Ensemble Prediction System" (EPS) realistische, aber bisher nicht eingetretene extreme Wetterlagen erzeugt. Bei diesem Verfahren erwies sich die Wetterlage 1962 als sehr stabil gegenüber einer Störung der Anfangsbedingungen. Die resultierenden Wasserstände bleiben dicht an den Beobachtungen. Maximale Scheitelwasserstände werden dagegen an allen Küstenpegeln der Deutschen Bucht von einer Realisierung des Orkans „Capella" vom 3.1.1976, EPS45, erzeugt. In Cuxhaven ist das ein Scheitelwasserstand von 6,51 m, etwa 1,40 m über dem höchsten bis zum Juni 2005 beobachteten Wert.

Für die anderen Pegel entlang der Küste liegen die Scheitelwasserstände 1 m bis 1,5 m über den am 3.1.1976 eingetretenen Werten (Tab. 10). Es zeigen sich systematische regionale Unterschiede.

Die Simulationsergebnisse übertreffen teilweise alle bisher eingetretenen Wasserstände an der deutschen Küste deutlich und sind in der Größenordnung der den etwaigen Klimaänderungen zugeschriebenen Werte (MAI, 2004). Die im Projekt MUSE simulierten Extremwerte resultieren aus Sturmflutwetterlagen, die schon beim heutigen Klima ohne weiteres entstehen können.

# 4. Extremwertstatistik

## 4.1 Grundlagen der Extremwertstatistik

Die Statistik nimmt in der Bestimmung von Bemessungsereignissen in der Hydrologie eine wichtige Rolle ein. Dabei werden neben den allgemeinen Verfahren der beschreibenden (deskriptiven) Statistik vor allem Verfahren aus der schließenden Statistik (Interferenzstatistik) zur Anwendung gebracht, um Aussagen über die extrapolierten Bereiche einer Datenreihe zu erhalten. Werden Aussagen über die Höhe oder Größe eines gesuchten Extremereignisses (z.B. Wasserstand) benötigt, werden eine oder mehrere Datenreihen einer statistischen Extremwertanalyse unterzogen.

Dazu müssen zunächst aus einer gegebenen Datenreihe Extremwerte gebildet werden. Extremwerte können sowohl Maximal- als auch Minimalwerte sein; in dem vorliegenden Projekt werden jedoch nur Maximalwerte betrachtet. Dies kann prinzipiell auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen: Entweder werden die Daten blockweise gruppiert und jeweils der Maximalwert (Gumbel-Verfahren) (PLATE, 1993) bestimmt oder es werden alle Werte über einem zuvor definierten Schwellenwert – z.B. 90-%-Quantil der Datenreihe – ermittelt (**P**eaks-**O**ver-**T**hreashold-Verfahren). Um die Daten einer statistischen Analyse zuführen zu können, werden bestimmte Anforderungen an die Daten gestellt. Die einzelnen Extremwerte müssen voneinander unabhängig (stochastisch), stationär und homogen sein und einen zeitlich konstanten Abstand (äquidistant) aufweisen. In der hydrologischen Praxis wird zur Auswahl der Extremwerte oft das Gumbel-Verfahren benutzt, in dem jeweils der Maximalwert eines Zeitintervalls bestimmt wird. Gebräuchlich ist die Verwendung von jährlichen Maximalwerten, die für jeden Pegel an der deutschen Nordseeküste und den Tideästuaren in Form der HThw-Jahreshauptwerte vorliegen. Der HThw-Wert eines Jahres ist somit der höchste

von 706 ± 2 Tidehochwasserständen (Thw) eines hydrologischen Jahres (jeweils 1. November bis 31. Oktober des darauf folgenden Jahres).

Die gängigen Verfahren der statistischen Datenanalyse von Extremwerten sind in vielfältiger Weise in der verfügbaren Literatur beschrieben.

Die wohl umfassendste Arbeit, die sich eingehend mit der statistischen Analyse von Extremwerten befasst, wurde 1958 von E. Gumbel vorgelegt und stellt heute noch für viele Bereiche der Extremwertstatistik die Grundlage dar. GUMBEL (1958) definiert drei Klassen von Extremwertverteilungen und erläutert detailliert deren Ermittlung und Anwendungsmöglichkeiten.

In DVWK (1999) werden ein Überblick und Empfehlungen zur statistischen Analyse von Extremwerten im Bereich der Hochwasserabflüsse im Binnenbereich gegeben. Die prinzipielle Methodik ist jedoch auch auf die Analyse von Pegelwasserständen an den Küsten zu übertragen.

Allgemeine Ausführungen zur Extremwertstatistik und deren Anwendung auf Wasserstände sind z.B. in CHOW (1964), JENSEN (1985), MANIAK (1992), PLATE (1993), DYCK und PESCHKE (1995) und JENSEN et al. (2003) zu finden.

Weitergehende Hinweise zur Extremwertanalyse von Daten an den deutschen Küsten werden in EAK (2002) behandelt. Hier findet sich eine Übersicht der gängigen anzuwendenden Verteilungsfunktionen und deren Parameterbestimmung. Insbesondere wird hier festgestellt (Zitat EAK, 2002): *„Die Bewertung extremer Ereignisse muss immer auch die Betrachtung physikalisch möglicher Grenzzustände mit einschließen.“*

Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von Aufsätzen, die sich mit speziellen Fragestellungen zu dieser Thematik beschäftigen. JENSEN und FRANK (2003) vergleichen mehrere Verfahren zur Ermittlung von Bemessungswasserständen mit Eintrittswahrscheinlichkeiten von $P = 10^{-4}$ und geben einige Empfehlungen. In JENSEN et al. (2003) werden ergänzend dazu neuere Verfahren vorgestellt, die aus dem Bereich der Erdbebenstatistik stammen.

Neuere Untersuchungen befassen sich zudem mit der so genannten „instationären Extremwertstatistik“. Bei diesen Verfahren werden die Parameter der Verteilungsfunktionen nicht durch einen stationären Ausdruck beschrieben, sondern durch eine zeitlich abhängige Funktion. Ausführungen dazu finden sich in BARDOSSY und PAKOSCH (2005), STRUPCZEWSKI, SING und FELUCH (2002), JENSEN, FRANK, MUDERSBACH und BLASI (2005). Weitere Ausführungen sind im zugehörigen Teilbericht des Abschlussberichtes zu finden (JENSEN UND MUDERSBACH, 2005).

## 4.2 Definition des Begriffs Wahrscheinlichkeit

Der Begriff der Wahrscheinlichkeit wird in vielen Bereichen verwendet und wird daher teilweise unterschiedlich definiert. Aus diesem Grund finden sich im Folgenden einige Ausführungen zum Verständnis des Begriffs „Wahrscheinlichkeit“ im vorliegenden Kontext.

Wenn von der Wahrscheinlichkeit eines Wasserstandes gesprochen wird, so muss zunächst festgestellt werden, ob die Unter- oder Überschreitungswahrscheinlichkeit gemeint ist. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit ist das komplementäre Ereignis zur Unterschreitungswahrscheinlichkeit und ergibt sich aus:

$$P_{Ü} = 1 - P_{U}$$

Die Unter- oder Überschreitungswahrscheinlichkeit gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass ein bestimmtes Ereignis innerhalb einer bestimmten Zeitspanne mindestens einmal unter- oder überschritten wird. In der vorliegenden Arbeit werden die Wahrscheinlichkeiten immer auf die Zeitspanne 1 Jahr [1a] angegeben.

Die Begriffe Überschreitungswahrscheinlichkeit, Eintrittswahrscheinlichkeit und Eintrittsrate sind gleichwertig, solange der Bezugszeitraum von 1 Jahr [1a] zugrunde gelegt wird.

Alternativ zu der Angabe einer Überschreitungswahrscheinlichkeit wird oftmals der Begriff „Jährlichkeit [a]“ verwendet, der sich bei einem Bezugszeitraum von 1a aus dem Kehrwert der Überschreitungswahrscheinlichkeit ergibt, so wird z.B. ein Ereignis mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von $P_Ü = 10^{-4}/a$ oftmals auch als das 10.000-jährliche Ereignis beschrieben.

Diese alternative Bezeichnung ist zwar mathematisch korrekt, jedoch wird oftmals damit impliziert, dass es sich hierbei um eine Prognose für die nächsten 10.000 Jahre handelt. Diese Interpretation ist falsch; es handelt sich lediglich um eine Aussage zur Überschreitungswahrscheinlichkeit bezogen auf ein Jahr. Es wird mit solchen Aussagen somit keine Prognose für die Zukunft erstellt. Aufgrund dieser möglichen Fehlinterpretationen wird empfohlen, nicht den Begriff Jährlichkeit, sondern nur die oben eingeführten Begriffe der Unter- oder Überschreitungswahrscheinlichkeit bzw. Eintrittswahrscheinlichkeit zu verwenden.

### 4.3 Beschreibung des ProMUSE-Verfahrens

In der Literatur zur Ermittlung von Bemessungsereignissen (z.B. DVWK, 1999) sind eine Vielzahl von Verteilungsfunktionen angegeben, die für die Analyse der Extremwert-Datensätze herangezogen werden können. Es wird in jedem Fall empfohlen, die Daten mit mehreren Verteilungsfunktionen zu analysieren, um dann anhand der Anpassungsgüteparameter und der visuellen Kontrolle zu einer Festlegung für eine Verteilungsfunktion zu gelangen.

In der Regel haben alle angegebenen Verteilungsfunktionen die Beschränkung, dass Extrapolationen nur bis zum 2- bis 3-fachen der beobachteten Zeitspanne zulässig sind. Bis zu diesem Bereich liefern alle Funktionen in der Regel nur geringe bis mäßige Abweichungen, darüber hinaus können extreme Unterschiede in den Berechnungen auftreten, weshalb die angegebene Beschränkung zwingend notwendig ist.

In der Praxis liegen Pegelbeobachtungen von maximal 100 bis 150 Jahren vor, was dazu führt, dass maximal auf mittlere Wiederkehrintervalle von 300 bis 450 Jahren ($P_Ü = 3 \cdot 10^{-3}/a$ bis $2 \cdot 10^{-3}/a$) extrapoliert werden kann. Mittlerweile ist jedoch in einigen Regelwerken die Forderung nach der Angabe von Ereignissen mit deutlich kleineren Überschreitungswahrscheinlichkeiten (z.T. $< P_Ü = 10^{-3}/a$, $10^{-4}/a$) enthalten (z.B. DIN 19700). Ebenso werden in benachbarten Ländern bereits seit einiger Zeit (z.B. Niederlande) Küstenschutzstrategien nach solchen Ereignissen ausgelegt (PHILIPPART et al., 1995). Diese Forderung kann mit den bisher angegebenen Verfahren nicht erfüllt werden. Teilweise sind in der Literatur Faktoren angegeben, mit denen z.B. von einem 100-jährlichen Ereignis auf ein 1.000-jährliches Ereignis (z.B. Faktor 1,3) geschlossen werden kann (z.B. DIN 19700). Diese Vorgehensweise ist jedoch nur als grobe Schätzung anzusehen, die keine physikalische Begründung beinhaltet.

Bei der Verwendung von Verteilungsfunktionen sollte beachtet werden, dass es bei allen Ereignissen (z.B. Wasserstand, Windgeschwindigkeit, Erdbebenstärke) die physikalisch abgeleitete Erkenntnis gibt, dass die Werte nicht ins Unermessliche steigen können, sondern obere Maximalwerte vorhanden sein müssen.

Am einsichtigsten ist diese Erkenntnis bei der Betrachtung von Erdbebenstärken auf der „nach oben offenen Richter-Skala". Ein Punkt mehr auf der Richterskala bedeutet einen etwa zehnfach höheren Ausschlag und die 32-fache Energiefreisetzung. Aufgrund ihrer Definition ist die Richterskala nach oben theoretisch unbegrenzt, die physischen Eigenschaften der Erdkruste machen ein Auftreten von Erdbeben der Stärke 9,5 oder höher nahezu unmöglich, da das Gestein nicht genug Energie speichern kann, sondern sich vor Erreichen dieser Stärke entlädt.

Auch im Bereich der Wasserstände an der Küste ergeben sich physikalisch bedingte Obergrenzen aus den Gleichgewichtsbedingungen. Der sturmfluterzeugende Wind kann das Wasser nur dann aufstauen, wenn eine ausreichende Schubspannung an der Grenzschicht zwischen Wasser und Luft vorhanden ist. Mit zunehmender Windstärke und damit zunehmender Wellen- und Gischtbildung nimmt die Schubspannung deutlich ab, wodurch das Wasser nicht weiter aufgestaut werden kann (POWELL et al., 2003). Diese maximal möglichen Zustände lassen sich durch physikalisch-konsistente meteorologische und ozeanographische Modelle abschätzen. Aufgrund dieser Tatsache ist die Anwendung von Extremwertfunktionen mit Berücksichtigung einer oberen Grenze sinnvoll.

Die Grundlage des ProMUSE-Verfahrens bildet die Allgemeine Extremwertverteilung (AE, *engl.: GEV*), deren Verteilungsfunktion allgemein in der Form

$$F(x) = \begin{Bmatrix} \exp\left[-\left(1-\tau\cdot a(x-b)\right)^{1/\tau}\right] & \text{für } \tau \neq 0 \\ \exp\left[-\exp(-a(x-b))\right] & \text{für } \tau = 0 \end{Bmatrix}$$

gegeben ist. Die Allgemeine Extremwertverteilung beinhaltet drei verschiedene Extremwertverteilungen:

- GUMBEL-Typ I für $\tau = 0$
- GUMBEL-Typ II oder FRECHET-Typ für $\tau < 0$
- GUMBEL-Typ III oder WEIBULL-Typ für $\tau > 0$

Die klassische Referenz zu diesen Extremwertverteilungsfunktionen ist GUMBEL (1958). ROSENHAUER und AHORNER (1991) verwenden diesen Ansatz zur Ermittlung von Erdbebeneintrittsraten.

Die Allgemeine Extremwertverteilung ist eine dreiparametrige Funktion, die durch die direkte Verwendung des Erwartungswertes $\mu$, der Standardabweichung $\sigma$ und des Form- bzw. Krümmungsparameters $\tau$ angegeben werden kann zu

$$F(x) = \exp\left[-\left(f_1 - f_2 \cdot \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{1/\tau}\right]$$

mit den Abkürzungen

$$f_1 = \Gamma(1+\tau)$$
$$f_2 = \sqrt{\Gamma(1+2\tau) - \Gamma^2(1+\tau)}$$

Die Bestimmung der Allgemeinen Extremwertverteilung konzentriert sich damit auf die Parameterschätzung für den Erwartungswert μ, die Standardabweichung σ und den Krümmungsparameter τ. Dabei ist darauf zu achten, dass die Parameterschätzung möglichst biasfrei (erwartungstreu) erfolgt. Da für das Projekt MUSE eine spezielle Anpassung der Schätzung des Krümmungsparameters τ über einen Maximalwert erfolgte, wird die verwendete Verteilungsfunktion im Folgenden mit ProMUSE-Verteilung bezeichnet (JENSEN und MUDERSBACH, 2005).

### 4.4 Datengrundlagen

Für die Untersuchungen wurden die Daten von neun deutschen Nordseepegeln analysiert (Abb. 1). Für die vorliegende Aufgabe eignet sich insbesondere die Verwendung von jährlichen Werten (Jahreshauptzahlen) der höchsten Tidehochwasserstände (HThw). Zur Homogenisierung der Daten wird die zugehörige Zeitreihe der mittleren Tidehochwasserstände (MThw) verwendet. Alle Jahreshauptwerte liegen jeweils für das hydrologische bzw. wasserwirtschaftliche Jahr vor, welches vom 1.11. eines Jahres bis zum 31.10. des Folgejahres reicht. Innerhalb der projektbegleitenden KFKI-Gruppe wurde sich darauf verständigt, dass die Daten der folgenden Pegel analysiert werden:

- Emden (1901–2004)
- Norderney (1901–2004)
- Bremerhaven (1901–2004)
- Helgoland (1911–2004)
- Cuxhaven (1849–2004)
- Husum (1868–2004)
- Büsum (1871–2004)
- Dagebüll (1874–2004)
- List (1931–2004)

Die vorliegenden Jahreshauptzahlen sind in das Höhenbezugssystem „Normal-Null [cmNN]“ umgerechnet worden, wobei die zeitlich variablen Höhenlagen der Pegelnullpunkte berücksichtigt wurden. Für die analysierten Pegel sind in Tab. 11 die höchsten simulierten Daten des BSH im Vergleich zu den bisher höchsten Beobachtungsdaten (HHThw) dargestellt.

Tab. 11: Ergebnisse der Wasserstandsmodellierung

| Pegel | HHThw [cmNN] | simulierter max. Wasserstand nach BSH [cmNN] | Abweichungen durch unterschiedliche Windschubspannungsansätze [cmNN] | Bemerkung |
|---|---|---|---|---|
| Emden | $517_{1906}$ | 609 | 570 … 639 | EPS45-1976, IFS-LM-Wind |
| Norderney | $410_{1962}$ | 512 | 475 … 537 | EPS45-1976, IFS-LM-Wind |
| Bremerhaven | $535_{1962}$ | 674 | 629 … 702 | EPS45-1976, IFS-LM-Wind |
| Helgoland | $392_{1962}$ | 499 | 461 … 521 | EPS45-1976, IFS-LM-Wind |
| Cuxhaven | $510_{1976}$ | 651 | 603 … 672 | EPS45-1976, IFS-LM-Wind |
| Husum | $566_{1976}$ | 669 | 609 … 691 | EPS45-1976, IFS-LM-Wind |
| Büsum | $514_{1976}$ | 635 | 585 … 655 | EPS45-1976, IFS-LM-Wind |
| List | $404_{1982}$ | 483 | 442 … 506 | EPS45-1976, IFS-LM-Wind |
| Dagebüll | $472_{1982}$ | 555 | 513 … 576 | EPS45-1976, IFS-LM-Wind |

### 4.5 Parameter der Verteilungsfunktion

Wie oben erläutert, ergibt sich die ProMUSE-Verteilungsfunktion zu:

$$\lambda \cdot t = (f_1 - f_2 \cdot \frac{x-\mu}{\sigma})^{\frac{1}{\tau}}$$

mit den Parametern $f_1$, $f_2$, $\mu$, $\sigma$, und $\tau$.

In Tab. 12 sind diese Parameter für die untersuchten Pegel angegeben. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich diese Parameter selbstverständlich nur mit den zugrunde gelegten Daten ergeben. Werden die Datenreihen aktualisiert, so sind die hier aufgeführten Parameter neu zu bestimmen.

Tab. 12: Parameter der ProMUSE-Verteilungsfunktion

| Pegel | Parameter der ProMUSE-Verteilungsfunktion | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $f_1$ | $f_2$ | $\mu$ | $\sigma$ | $\tau$ |
| Emden (1901–2004) | 0,9299 | 0,1825 | 364,3841 | 55,8349 | 0,1696 |
| Norderney (1901–2004) | 0,9363 | 0,1547 | 303,5658 | 44,3786 | 0,1403 |
| Bremerhaven (1901–2004) | 0,9501 | 0,1178 | 386,6257 | 53,6535 | 0,1032 |
| Cuxhaven (1849–2004) | 0,9567 | 0,1009 | 358,8156 | 51,4710 | 0,0870 |
| Helgoland (1911–2004) | 0,9509 | 0,1155 | 275,9447 | 41,2907 | 0,1011 |
| Büsum (1871–2004) | 0,9493 | 0,1197 | 359,4407 | 51,8887 | 0,1054 |
| Husum (1868–2004) | 0,9347 | 0,1592 | 394,3388 | 59,2945 | 0,1449 |
| Dagebüll (1874–2004) | 0,9258 | 0,1857 | 340,2784 | 50,5881 | 0,1730 |
| List (1931–2004) | 0,9253 | 0,1873 | 272,0028 | 49,4027 | 0,1747 |

### 4.6 Auswertungen für den Pegel Cuxhaven

Im Folgenden wird die detaillierte Darstellung der statistischen Analyse exemplarisch für den Pegel Cuxhaven vorgestellt. Mit den weiteren Pegeln wurde analog verfahren; eine zusammenfassende Darstellung und Bewertung der Ergebnisse ist im nächsten Abschnitt gegeben. Neben der ProMUSE-Verteilung wurde zum Vergleich der Ergebnisse jeweils eine Anpassung mit der Allgemeinen Extremwertverteilung (GEV) vorgenommen, jedoch ohne spezielle Berücksichtigung eines oberen Grenzwertes. Dabei wurden zwei verschiedene Parameterschätzverfahren angewendet: Maximum-Likelihood-Estimation (MLE) und Probability-Weighted Moments (PWM).

Der Pegel Cuxhaven hat eine HThw-Zeitreihe von 1849 bis 2004. Der Pegel Cuxhaven ist damit der Pegel mit der längsten Zeitreihenaufzeichnung an der deutschen Nordseeküste. Aufgrund der qualitativ hochwertigen Datenreihe und der, bezogen auf das Gebiet der Deutschen Bucht, zentralen Lage des Pegels, nimmt dieser eine Sonderstellung innerhalb der untersuchten Pegel ein. Den Ergebnissen des Pegels Cuxhaven wird daher ein besonderes Gewicht gegeben, da dieser als Referenz- oder Vergleichspegel für vielfältige Aufgabenstellungen herangezogen wird. Diese Zeitreihe wurde mit dem 19-jährigen Mittel des entsprechenden MThw homogenisiert, welches einen linearen säkularen Anstieg von $s_{T(1849–2004)}$ = 0,26 cm/Jahr aufweist (Abb. 24). Die Homogenisierung erfolgte auf das Jahr 2004, weshalb die Werte

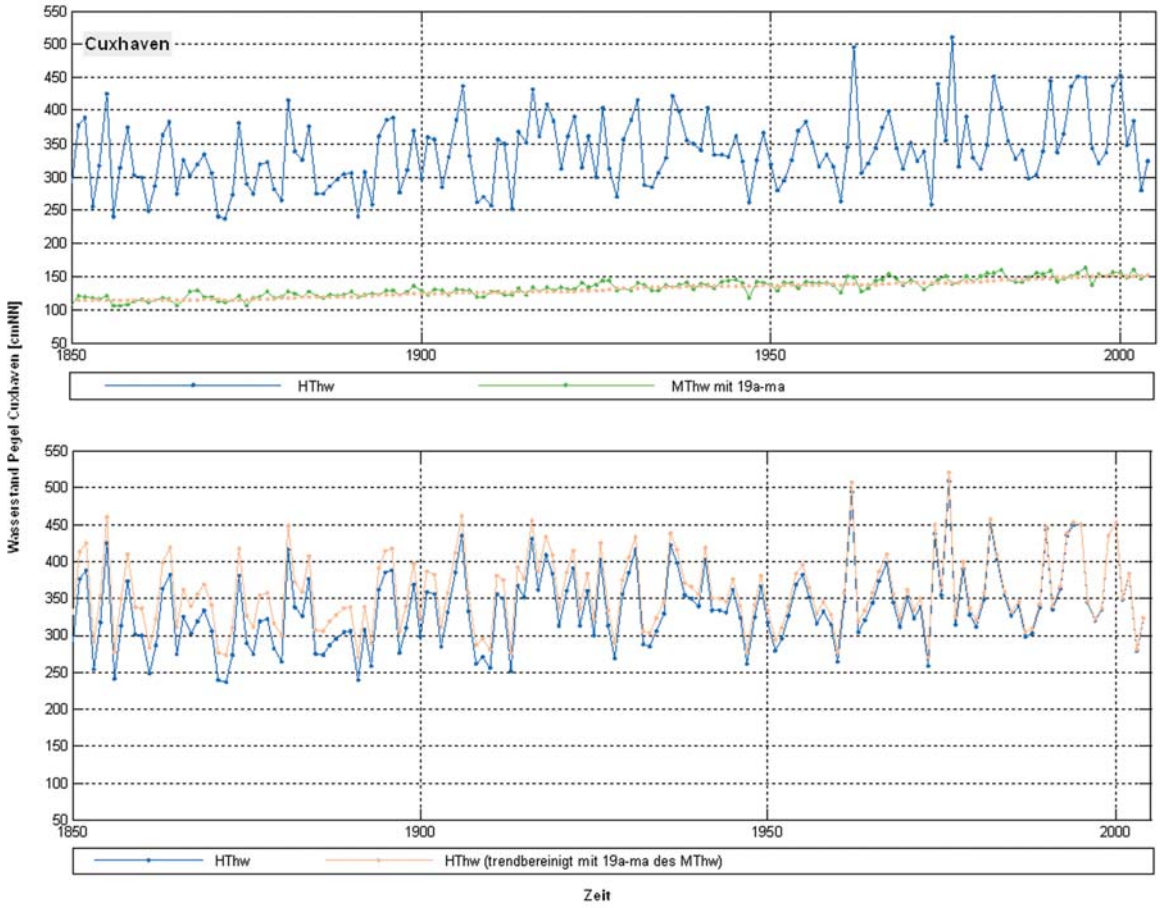


Abb. 24: HThw- und MThw-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven mit Trendbereinigung

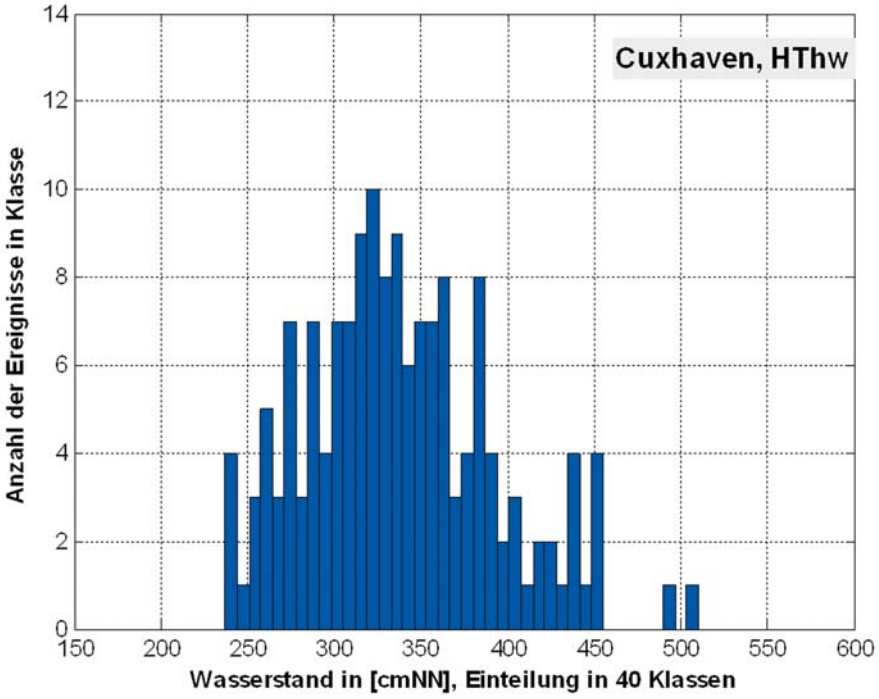


Abb. 25: Histogramm der HThw-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven

vor 2004 leicht erhöht werden. Die jährlichen Extremwerte (HThw) weisen die Häufigkeitsverteilung nach Abb. 25 auf.

Die Ergebnisse der statistisch-probabilistischen Analyse sind der Abb. 26 und Tab. 13 zu entnehmen. Der modellierte Maximalwert des BSH liegt mit $W_{BSH}$ = 651 cmNN um 141 cm über dem bisher beobachteten Höchstwert im Jahr 1976 mit $HHThw_{1976}$ = 510 cmNN.

Die angewendeten Verteilungsfunktionen beschreiben alle in ähnlicher Weise die HThw-Zeitreihe. Die ProMUSE-Funktion liegt etwas über den GEV-Verteilungen, jedoch sind die Unterschiede nicht signifikant. Bis in den Bereich des $10^{-4}$/a-Ereignisses verlaufen die Funktionen fast deckungsgleich und so ergeben sich auch beim $10^{-4}$/a-Ereignis lediglich Differenzen von 3 bis 12 cm. Der Verlauf der GEV-Verteilungen (ohne Berücksichtigung eines oberen Grenzwertes) ist jedoch stark abhängig von der vorliegenden Datenreihe. Auswertungen an anderen Pegelstandorten haben zum Teil deutliche Abweichungen ergeben, wohingegen die ProMUSE-Verteilung auch bei Vorliegen einzelner Extremwerte ein sehr robustes Verhalten aufweist. Weitere Ausführungen und vergleichende Betrachtungen hierzu sind dem Abschlussbericht des Forschungsvorhabens MUSE zu entnehmen (JENSEN und MUDERSBACH, 2005)

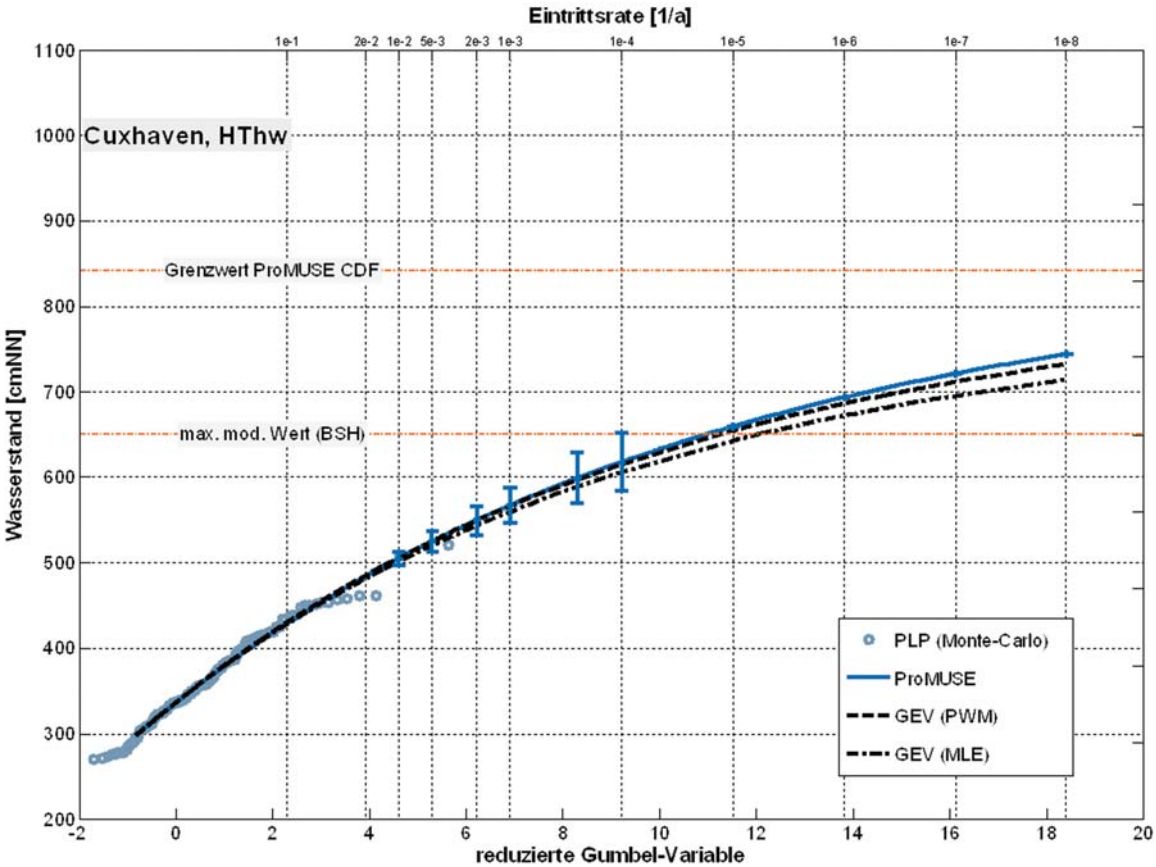


Abb. 26: Statistisch-probabilistische Analyse der HThw-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven

Tab. 13: Ergebnisse der statistisch-probabilistischen Analyse der HThw-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven

| **Pegel:** | Cuxhaven, HThw | | |
|---|---|---|---|
| **Maximalwert (BSH):** | 651 cmNN | **math. Grenzwert:** | 842 cmNN |

| **Wahrscheinlichkeit $P_Ü$** | **ProMUSE [cmNN]** | **Streubreite [cmNN]** | **GEV (PWM) [cmNN]** | **GEV (MLE) [cmNN]** |
|---|---|---|---|---|
| $1{,}00 \cdot 10^{-2}$ | 505 | 496 ... 513 | 506 | 502 |
| $5{,}00 \cdot 10^{-3}$ | 525 | 513 ... 536 | 526 | 521 |
| $2{,}00 \cdot 10^{-3}$ | 550 | 533 ... 566 | 550 | 544 |
| $1{,}00 \cdot 10^{-3}$ | 567 | 547 ... 588 | 567 | 560 |
| $2{,}50 \cdot 10^{-4}$ | 599 | 570 ... 629 | – | – |
| $1{,}00 \cdot 10^{-4}$ | 618 | 584 ... 652 | 615 | 606 |

## 4.7 Bewertung der Ergebnisse der Extremwertanalyse

Die Ergebnisse der statistisch-probabilistischen Analyse der Wasserstandsdaten sind in Abb. 27 und Tab. 14 dargestellt. Bei der Darstellung der Wasserstände ist unmittelbar zu erkennen, dass die Wasserstände an den Inselpegeln signifikant niedriger ausfallen, als an den Festlandpegeln. Dies ist u.a. durch die größeren Wassertiefen vor den Inseln zu erklären und physikalisch bedingt. Die Wahrscheinlichkeit des bisher höchsten beobachteten Wasserstands an den Pegeln (HHThw) liegt bei allen Pegeln im Bereich von $10^{-2}$/a bis $5 \cdot 10^{-3}$/a. Die

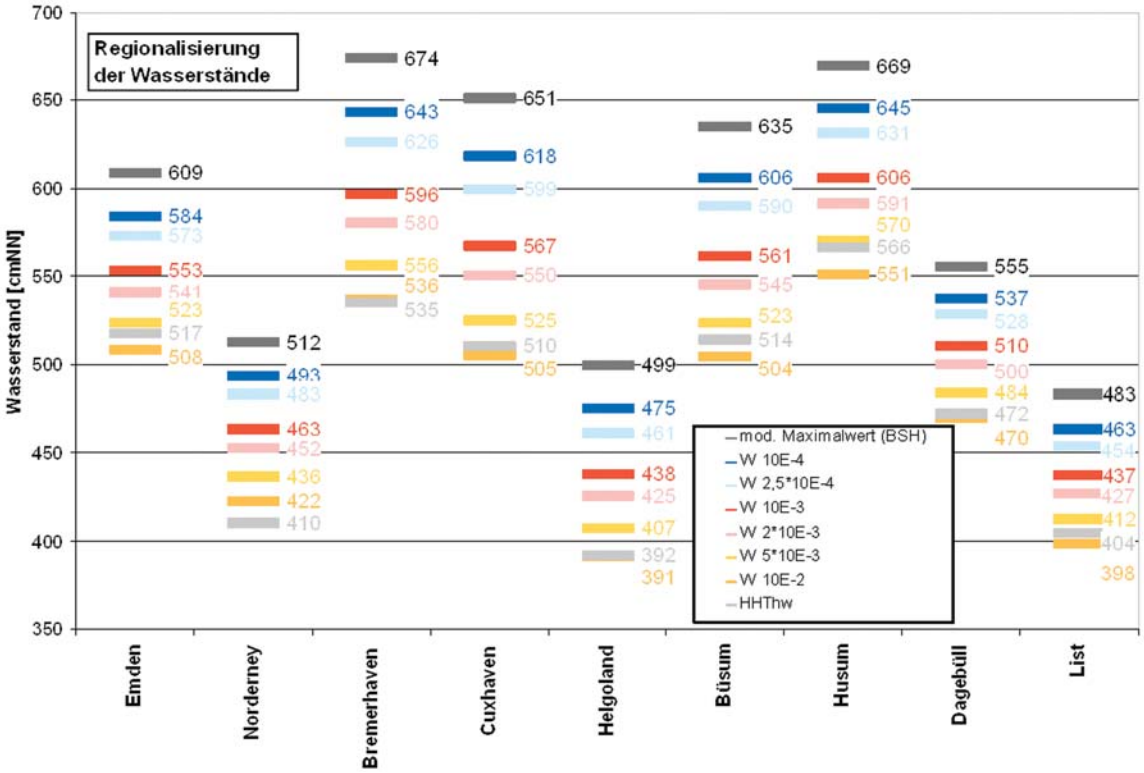


Abb. 27: Ergebnisse der statistisch-probabilistischen Analyse aller untersuchten Nordseepegel

Tab. 14: Zusammenfassende Darstellung der berechneten Wasserstände mit Eintrittswahrscheinlichkeiten

| Pegel | Zeitspanne | HHThw | HHThw (beschickt auf Jahr 2004) | mod. Maximal-wert BSH | $P_Ü$ $1 \cdot 10^{-2}$ | $P_Ü$ $5 \cdot 10^{-3}$ | $P_Ü$ $2 \cdot 10^{-3}$ | $P_Ü$ $1 \cdot 10^{-3}$ | $P_Ü$ $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ | $P_Ü$ $1 \cdot 10^{-4}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | [cmNN] | [cmNN] | [cmNN] | [cmNN] | [cmNN] | [cmNN] | [cmNN] | [cmNN] | [cmNN] |
| **Emden** | 1901 - 2004 | $517_{1906}$ | $535_{1906}$ | 609 (570 ... 639) | 508 (499 ... 516) | 523 (511 ... 534) | 541 (524 ... 557) | 553 (533 ... 574) | 573 (544 ... 603) | 584 (550 ... 618) |
| **Norderney** | 1901 - 2004 | $410_{1962}$ | $420_{1962}$ | 512 (475 ... 537) | 422 (413 ... 430) | 436 (424 ... 447) | 452 (435 ... 468) | 463 (443 ... 484) | 483 (454 ... 513) | 493 (459 ... 527) |
| **Bremerhaven** | 1901 - 2003 | $535_{1962}$ | $548_{1962}$ | 674 (629 ... 697) | 536 (527 ... 544) | 556 (544 ... 567) | 580 (563 ... 596) | 596 (576 ... 617) | 626 (597 ... 656) | 643 (609 ... 677) |
| **Cuxhaven** | 1849 - 2004 | $510_{1976}$ | $521_{1976}$ | 651 (603 ... 672) | 505 (496 ... 513) | 525 (513 ... 536) | 550 (533 ... 566) | 567 (547 ... 588) | 599 (570 ... 629) | 618 (584 ... 652) |
| **Helgoland** | 1911 - 2004 | $392_{1962}$ | $400_{1962}$ | 499 (461 ... 521) | 391 (382 ... 399) | 407 (395 ... 418) | 425 (408 ... 441) | 438 (418 ... 459) | 461 (432 ... 491) | 475 (441 ... 509) |
| **Büsum** | 1871 - 2004 | $514_{1976}$ | $526_{1976}$ | 635 (585 ... 655) | 504 (495 ... 512) | 523 (511 ... 534) | 545 (528 ... 561) | 561 (541 ... 582) | 590 (561 ... 620) | 606 (572 ... 640) |
| **Husum** | 1868 - 2004 | $566_{1976}$ | $581_{1976}$ | 669 (609 ... 691) | 551 (542 ... 559) | 570 (558 ... 581) | 591 (574 ... 607) | 606 (586 ... 627) | 631 (602 ... 661) | 645 (611 ... 679) |
| **Dagebüll** | 1874 - 2004 | $472_{1982}$ | $484_{1982}$ | 555 (513 ... 576) | 470 (461 ... 478) | 484 (742 ... 495) | 500 (483 ... 516) | 510 (490 ... 531) | 528 (499 ... 558) | 537 (503 ... 571) |
| **List** | 1931 - 2004 | $404_{1962}$ | $414_{1982}$ | 483 (442 ... 506) | 398 (389 ... 406) | 412 (400 ... 423) | 427 (410 ... 443) | 437 (417 ... 458) | 454 (425 ... 484) | 463 (429 ... 497) |

Wasserstände an den vier zentralen Festlandpegeln Bremerhaven, Cuxhaven, Husum und Büsum liegen in etwa auf einem Niveau, die beiden äußeren Pegel Dagebüll und Emden weisen ein etwas geringeres Wasserstandsniveau auf. Dies ist plausibel, da die sturmflutträchtige Windrichtung von ca. 295° zu maximalen Wasserständen im zentralen Bereich der Deutschen Bucht führt und die Wasserstände nach Norden bzw. Süd-Westen hin abfallen. In Abb. 28 sind für die $10^{-4}$/a-Ereignisse die Streubreiten der ProMUSE-Ergebnisse durch Fehlerbalken angegeben. Dabei ist zu erkennen, dass der maximal modellierte Wert in der Regel noch innerhalb dieses Streubereiches liegt. Diese Aussageunschärfe lässt sich mit den bisher möglichen Verfahren nicht weiter einschränken und bedarf einer pragmatischen Entscheidung bei der Verwendung dieser Werte für konkrete Planungsmaßnahmen

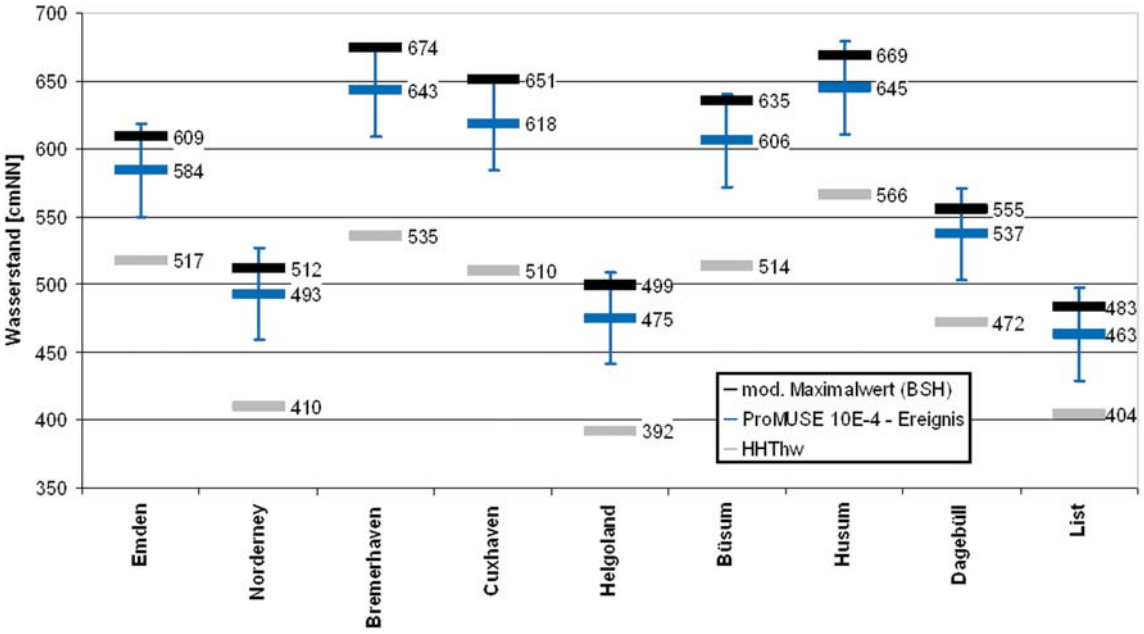


Abb. 28: Ergebnisse der $10^{-4}$/a-Ereignisse mit den HHThw und modellierten maximalen Wasserständen

## 5. Zusammenfassende Bewertung

Sturmfluten sind Naturereignisse, die wegen der intensiven Nutzung des Küstenraumes zu schweren Schäden führen können. Sowohl der Küstenschutz als auch die Katastrophenabwehr basieren auf der Analyse extremer Fluten. Aufgrund zunehmender Verstädterung, Besiedelung und Industrialisierung exponierter Regionen sind weltweit die volkswirtschaftlichen Schäden bei Naturkatastrophen in den letzten Jahrzehnten um ein Vielfaches gestiegen (Kron, 2005).

Ausgelöst durch das Sturmtief Anatol im Dezember 1999 und den katastrophalen Sturmfluten in den vergangenen Jahrzehnten (z.B. in den Jahren 1962 und 1976) sind aktuell wieder Fragen nach möglichen Höhen von Sturmfluten laut geworden.

Das Ziel des Vorhabens „Modellgestützte Untersuchung von Sturmflutwasserständen mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten (MUSE)“ war die numerische Berechnung von physikalisch möglichen Wetterlagen bzw. Windfeldern, die zu extremen Sturmflutereignissen an der deutschen Nordseeküste führen können und die Berechnung der daraus resul-

tierenden Wasserstände in der Deutschen Bucht sowie die statistisch-probabilistische Einordnung dieser Ergebnisse hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeiten.

Zur Modellierung der Sturmflutwetterlagen und der Nordseewasserstände wurden die Modelle verwendet, die auch zur täglichen Wetter- und Wasserstandsvorhersage vom DWD, EZMW und vom BSH im Routinebetrieb verwendet werden. Damit war sichergestellt, dass bewährte Verfahren benutzt wurden und keine aufwendigen Neuentwicklungen von Modellwerkzeugen erforderlich waren. Das Aufspüren von Wetterlagen, die höhere Scheitelwerte des Wasserstandes als bisher eingetreten erzeugen, war sehr aufwendig. Letztlich wurden Fälle als Variation bekannter Sturmflutwetterlagen gefunden, wobei sich eine Variation der Wetterlage zu Beginn des Jahres 1976 als maximal erwies. Die Scheitelwasserstände während der Sturmflut am 2./3. Januar 1976 wurden durch eine in den Anfangswerten veränderte Variante lokal um bis zu 1,4 m übertroffen.

Die statistische Einordnung von extremen Ereignissen beruht auf der Analyse mittels Extremwertverteilungen und deren Extrapolation. Dabei ist bei den üblichen statistischen Verfahren die Extrapolationszeitspanne auf das 2- bis 3-fache der Beobachtungszeitspanne begrenzt. Darüber hinaus ergeben sich große Unsicherheiten in den Ergebnissen, wodurch eine Abschätzung von Ereignissen mit Überschreitungswahrscheinlichkeiten $P_Ü < 2–10^{-3}/a$ nur sehr unzureichend möglich ist. Liegen hingegen Informationen über die Höhe sehr extremer Ereignisse und deren Eintrittswahrscheinlichkeit durch numerische Simulationen vor, so können diese in der statistischen Analyse berücksichtigt werden, indem iterativ Ereignisse mit niedrigerem $P_Ü$ ermittelt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird dazu ein modifiziertes Verfahren der Allgemeinen Extremwertverteilung *(engl.: GEV)* verwendet, bei dem eine obere Grenze vorgegeben werden kann; dieses Verfahren wird mit ProMUSE-Verfahren bezeichnet.

Mit den vorliegenden Daten konnten die Überschreitungswahrscheinlichkeiten der Wasserstände von neun deutschen Nordseepegeln im Bereich von $P_Ü = 10^{-2}/a$ bis $10^{-4}/a$ angegeben werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die bisher aufgetretenen Höchstwasserstände (HHThw) jeweils im Bereich von etwa $P_Ü = 10^{-2}/a$ einzuordnen sind und die Wasserstände mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von $P_Ü = 10^{-4}/a$ etwa 60 bis 110 cm über diesen Werten liegen. Ergänzende Monte-Carlo-Simulationen ergaben, dass eine Auswertung mit dem ProMUSE-Verfahren auch beim Vorhandensein singulärer Extremereignisse belastbare Ergebnisse liefert (z.B. JENSEN und MUDERSBACH, 2005).

Neben der Analyse der aufgetretenen Wasserstände wurden Windstauwerte statistisch ausgewertet. Prinzipiell eignet sich das ProMUSE-Verfahren auch sehr gut für diese Analyse, jedoch ergeben sich bei der Rückführung der Windstauergebnisse auf extreme Scheitelwasserstände bisher noch nicht ausreichend beantwortete Fragen, so dass für praktische Anwendungen die statistische Analyse der beobachteten Wasserstände bevorzugt wird.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens MUSE bilden eine wesentliche Grundlage für viele Fragen des Küsteningenieurwesens, da die Überschreitungswahrscheinlichkeiten der Eingangsbelastungsgröße Wasserstand für viele Küstenorte nun auch basierend auf physikalischen Prinzipien angegeben werden können.

Die vorliegenden Ergebnisse können damit auch für die Verifikation der Bemessungswasserstände an der Nordseeküste und der Fortschreibung der Sicherheitskonzepte (z.B. Generalplan Küstenschutz Schleswig-Holstein) genutzt werden. Weiterhin sind die Ergebnisse für eine Umsetzung der geplanten *Richtlinie des Europäischen Parlaments und Rates über die Bewertung und Bekämpfung von Hochwasser* (KOM, 2006) von Bedeutung. Für den Bereich der südlichen Ostsee werden zurzeit im interdisziplinären Verbundprojekt

„Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der deutschen Ostseeküste (Akronym: MUSTOK)“ entsprechende Analysen mit den hier vorgestellten Methoden durchgeführt.

## 6. Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Während des Projektes konnten nicht alle Fragen zu extremen Sturmflutereignissen an der deutschen Nordseeküste bearbeitet und beantwortet werden. Die vielen Diskussionen innerhalb und auch außerhalb der Projektgruppe zeigen, dass die Erforschung der verschiedenen Einflussfaktoren und deren Wirkung auf das Sturmflutgeschehen noch nicht abgeschlossen ist und weiterhin Forschungsbedarf vorhanden ist.

Mit den vorliegenden Ergebnissen können die Belastungsgrößen und deren Eintrittswahrscheinlichkeit innerhalb einer Risikoanalyse besser angegeben werden. Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der kombinierten Einwirkung von Seegang und Wasserstand. Die Ansätze für den Energieeintrag des Windes auf die Wasseroberfläche hinsichtlich Seegang und Windstau sind weiter zu entwickeln.

Die verwendeten Modelle unterliegen einem kontinuierlichen Entwicklungsprozess, weshalb die vorliegenden Ergebnisse auch zukünftig mit weiterentwickelten Modellen verifiziert werden müssen.

Weiterhin besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der zeitlichen Abhängigkeiten der angegebenen Wahrscheinlichkeiten. Es müssten Aussagen darüber getroffen werden können, wie sich die Wahrscheinlichkeiten innerhalb eines Planungszeitraumes verändern, um dies in die Analysen mit einzubeziehen. Hier könnten Verfahren der instationären Extremwertstatistik einen Beitrag leisten, die jedoch derzeit nur wenig erforscht sind.

Bei der Frage der zeitlichen Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeiten müssen dann auch mögliche Klimavariationen berücksichtigt werden, indem Szenarien hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Eintrittswahrscheinlichkeit extremer Ereignisse analysiert werden.

## 7. Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), vertreten durch Dr. Norbert Blum vom Projektträger Jülich, für die gewährte Finanzierung (Förderkennzeichen 03KIS039). Ein besonderer Dank gilt dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die Unterstützung des Projektes in der Antragsphase und die fachliche Begleitung während der Bearbeitungsphase. Wir danken BD Frank Thorenz als Forschungsleiter Küste des KFKI und Dr. habil. Gabriele Gönnert als Obfrau der projektbegleitenden Gruppe. Vielfältige Anregungen kamen aus dem Kreise der Projektgruppenmitglieder Dipl.-Ing. Norbert Schaller, Dr. Elisabeth Rudolph, Dipl.-Meteorol. Gudrun Rosenhagen, Dipl.-Meteorol. Heiner Schmidt, Dipl.-Ing. Hans-Gerd Coldewey, Prof. Dr.-Ing. Andrea Töppe, Dipl.-Ing. Hanz Dieter Niemeyer und Dipl.-Ozeanogr. Ralph Annutsch, denen wir dafür zu großem Dank verpflichtet sind.

## 8. Schriftenverzeichnis

AMOROCHO, J. und DEVRIES, J. J.: A New Evaluation of the Wind Stress Coefficient Over Water Surfaces. Journal of Geophysical Research, 85, C1, 433–442, 1980.

ANNUTSCH, R.: Wasserstandsvorhersage und Sturmflutwarnung. Seewart 38, 185–204, 1977.

BARDOSSY, A. und PAKOSCH, S.: Wahrscheinlichkeiten extremer Hochwasser unter sich ändernden Klimaverhältnissen, Wasserwirtschaft, Heft 7–8, Wiesbaden, 2005.

BORK, I. und MÜLLER-NAVARRA, S.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten (MUSE) – Teilprojekt 2: Sturmflutsimulationen, Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 03KIS039 (KFKI Fördernummer 78), Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg, 2005.

BUIZZA, R.; MILLER, M. und PALMER, T. N.: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 125, 2887–2908, 1999.

CHOW, V. T.: Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Company, New York, 1964.

CORKAN, R. H.: Storm Surges in the North Sea. H.O. Misc. 15072, Vol. 1–2, 1948, o.S. DEFANT, F., FECHNER, H., SPETH, P.: Synoptik und Energetik der Hamburger Sturmflutwetterlage vom Februar 1962. Berichte des Deutschen Wetterdienstes , ISBN 3-88148-102-8, 1972.

DICK, S.: Die Sturmflut am 3. Dezember 1999 – Fallstudien mit dem Windstaumodell des BSH. Vortrag auf dem Sturmflut-Workshop der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, Dienststelle Hamburg), 16.11.2000.

DICK, S.; KLEINE, E.; MÜLLER-NAVARRA, S. H. and KOMO, H.: The operational circulation model of BSH (BSHcmod) Model description and validation. Berichte des BSH Nr. 29/2001.

DIN 19700: Stauanlagen DIN 19700-10 bis DIN 19700-13, Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN, Beuth-Verlag, 2004.

DOLATA, L. F.; ROECKNER, E. and BEHR, H.: Prognostic Storm Surge Simulation with a Combined Meteorological/Oceanographic Model. In: J.Sündermann (E.), Circulation and Contaminant Fluxes in the North Sea. Springer-Verlag Berlin, 266–278, 1983.

DVWK: Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen, DVWK-Merkblatt 251/1999, Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, 1999a.

DYCK, S. und PESCHKE, G.: Grundlagen der Hydrologie, Verlag für Bauwesen, 3. Aufl., Berlin, 1995.

EAK: Empfehlungen für Küstenschutzwerke (EAK 2002), DIE KÜSTE, H. 65, Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Boysen & Co., Heide, 2002.

EMANUEL, K.: A Similarity Hypothesis for Air-Aea Exchange at Extreme Wind Speeds. Journal of Atmospheric Sciences, 60, 1420–1428, 2003.

FOKEN, TH.: Angewandte Meteorologie, 2. Aufl., Springer, Berlin und Heidelberg, 2006.

GERRITSEN, H. and BIJLSMA, A. C.: Modelling of tidal and winddriven flow: The Dutch Continental Shelf Model. Computer Modelling in Ocean Engineering. Schrefler & Zienkiewicz (ed.), Balkerna, Rotterdam, 331–338, 1988.

GUMBEL, E. J.: Statistics of Extremes, Columbia University Press, New York. 1958.

HEWER, R.: Untersuchungen zur Entwicklung von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste auf der Basis hydrodynamisch-numerischer Modelle. Diplomarbeit, Universität Hamburg, 1980.

HOWARTH, M. J.: North Sea circulation. Encyclopedia of Ocean Sciences, ed. J. H. Steele, S. A. Thorpe, K. K. Turekian, Vol. 4, 1912–1921, 2001.

JANSSEN, F.: Auswirkungen unterschiedlicher Windschubspannungsansätze auf die Qualität von Wasserstandsvorhersagen mit einem numerischen Nordseemodell. Diplomarbeit im Fach Ozeanographie, Universität Hamburg, 165 S., 1996.

JENSEN, J.: Über instationäre Entwicklungen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste. Mitteilungen Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig, H. 88, 1985.

JENSEN, J.; FRANK, T.; ZIMMERMANN, C.; MAI, S.; ROSENHAUER, W.; MEISWINKEL, R. und BARG, G.: Neue Verfahren zur Abschätzung von seltenen Sturmflutwasserständen, HANSA, Nr. 11, 140. Jahrgang, Hamburg, 2003.

JENSEN, J. und FRANK, T.: Abschätzung von Sturmflutwasserständen mit sehr kleinen Überschreitungswahrscheinlichkeiten, Die Küste, H. 67, 2003.

JENSEN, J.; FRANK, T.; MUDERSBACH, C.; BLASI, C.: Statistical Analysis of Extreme Hydrological Data, Proceedings of the 7. International MEDCOAST 2005-Conference, Kusadasi, Turkey, 2005.

JENSEN, J. und MUDERSBACH, CH.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten (MUSE) – Teilprojekt 3: Statistisch-probabilistische Extremwertanalyse, Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 03KIS039 (KFKI Fördernummer 78), Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) an der Universität, Siegen, 2005.

JUNG, T.; KLINKER, E. and UPPALA, S.: Reanalysis and reforecast of three major Euripean storms of the twentieth century using ECMWF forecasting system. Part I: Analyses and deterministic forecasts. Meteorol. Appl. 11, 343–361, 2004.

KALNAY, E.; KAMAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, G. and ZHU, Y.: The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. Bulletin of the American Meteorological Society, 77, 3, 437–471, 1996.

KLEINE, E.: Die Konzeption eines numerischen Verfahrens für die Advektionsgleichung. Literaturübersicht und Details der Methode im operationellen Modell des BSH für Nordsee und Ostsee. Eigenverlag E. Kleine, Hamburg, 106 S., 1993.

KLEINE, E.: Das operationelle Modell des BSH für Nordsee und Ostsee. Konzeption und Übersicht. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 126 S., 1994.

KOZIAR, CH. und RENNER, V.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten (MUSE) – Teilprojekt 1: Numerische Berechnung physikalisch konsistenter Wetterlagen mit Atmosphärenmodellen, Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 03KIS039 (KFKI Fördernummer 78), Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach, 2005.

KOM: Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und Bekämpfung von Hochwasser, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, SEK (2006) 66, Brüssel, 2006.

KRON, W.: Hochwasser, in: Wetterkatastrophen und Klimawandel – Sind wir noch zu retten?, Münchener Rück, 2005.

KRUHL, H.: Sturmflut – Wetterlagen. promet, 8. Jahrgang, Heft 4, 6–8, 1978.

LOEWE, P.; SCHMOLKE, S.; BECKER, G.; BROCKMANN, U.; DICK, S.; ENGELKE, C.; FROHSE, A.; HORN, W.; KLEIN, H.; MÜLLER-NAVARRA, S.; NIES, H.; SCHRADER, D.; SCHULZ, A.; THEOBALD, N. und WEIGELT, S.: Nordseezustand 2003. Berichte des BSH, Nr. 38, 217 S., 2004.

MAI, S.: Klimafolgenanalyse und Risiko für eine Küstenzone am Beispiel der Jade-Weser-Region. Diss. Universität Hannover, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Mitteilungen Heft 91, 275 S., 2004.

MANIAK, U.: Hydrologie und Wasserwirtschaft, 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, 1992.

MÜLLER-NAVARRA, S. H. and GIESE, H.: Improvements of an empirical model to forecast wind surge in the German Bight. DHZ, 51, Nr. 4, 385–405, 1999.

MÜLLER-NAVARRA, S. H.; LANGE, W.; DICK, S. and SOETJE, K. C.: Über die Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage: Hydrodynamisch-numerische Modelle der Nord- und Ostsee und ein empirisch-statistisches Verfahren für die Deutsche Bucht. promet, Jahrg. 29, Nr. 1–4, 117–124, 2003.

MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Sturmfluten – Land unter an Nord- und Ostsee. In: Entfesselte Elemente – Der Mensch und die Kräfte der Natur. S. 92 – 99. Wissen-Media-Verl., Gütersloh. 480 S., 2005.

MÜLLER-NAVARRA, S. H.; BORK, I.; JENSEN, J.; KOZIAR, CH.; MUDERSBACH, CH. und RUDOLPH, E.: Modellstudien zur Sturmflut und zum Hamburg-Orkan 1962, HANSA 143, 66–82, 12/2006.

NDR: Dokumentation des Norddeutschen Rundfunks über die Sturmflutnacht vom 16./17. Februar 1962. ISBN 3-935157-51-7, 2004.

ONVLEE, J. R. N.: The performance of drag relations in the WAQUA storm surge model. koninklijk nederlands meteorologisch intitut, Technical reprort TR-149, De Bilt, 25 S., 1993.

PETERSEN, M. und RHODE, H.: Sturmflut. Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe. Karl Wachholtz Verlag, Neumünster, 1991.

PHILIPPART, M. E.; DILLINGH, D. and PWA, S. T.: De basispeilen langs de Nederlandse Kust – de ruimtelijke verdeling en overschrijdingslijnen, rapport RIKZ-95.008 Ministerie van Ver-

keer en Waterstaat, Directorat-Generaal Rijkswaterstaat, Rijkinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), 1995.

PLATE, E. J.: Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1993.

POWELL, M. D.; VICKERY, P. J. and REINHOLD, T. A.: Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. Nature, 422, 279–283, 2003.

RODEWALD, M.: Zur Entstehungsgeschichte von Sturmflut-Wetterlagen in der Nordsee. Die Küste, Jahrgang 13, 1–60, 1965.

ROEDIGER, G.: Entwicklung und Verlauf der Wetterlage vom 16./17. Februar 1962. Die Küste, Jahrgang 10, Heft 1, 1–4, 1962.

ROSENHAUER, W. und AHORNER, L.: Spezielle Untersuchungen zur Magnituden-Häufigkeits-Relation für die seismische Risikoanalyse. Kolloquium Erdbeben-Ingenieurwesen, Nationale Gruppe für Erdbebeningenieurwesen, Telegrafenberg, Potsdam und Deutsche Gesellschaft für Erdbeben-Ingenieurwesen und Baudynamik e.V. (DGEB), Potsdam, 1991.

SMITH S. D. and BANKE E. G.: Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. Quart. J. R. Met. Soc. 101, 665–673, 1975.

STUPCZEWSKI, W. G.; SING, V. P. and FELUCH, W.: Non-stationary Approach to at-site Flood Frequency Modelling I. Maximum Likelihood Estimation. Journal of Hydrology, 248, 123–142, 2002.

WU, J.: Wind-Stress Coefficient Over Sea Surface From Breeze to Hurricane. Journal of Geophysical Research, Vol. 87, No. C12, 9704–9706, 1982.