

## Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordsee (MUSE)

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen<sup>1</sup>  
Dipl.-Ing. Christoph Mudersbach<sup>1</sup>  
Dr. rer. nat. Sylvin Müller-Navarra<sup>2</sup>  
Dipl.-Oz. Ingrid Bork<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universität Siegen, Fachbereich Bauingenieurwesen; <sup>2</sup>Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Hamburg

### Einleitung

Im Zeitraum von 2002 bis 2005 wurde das Forschungsvorhaben MUSE (Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten, 03KIS039) durchgeführt. Das vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) begleitete Projekt ist eine Gemeinschaftsarbeit des Deutschen Wetterdienstes (DWD) des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen.

Das Ziel des Projektes war die Simulation von extremen Sturmfluten in der Deutschen Bucht (Abbildung 1) und die Zuordnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine Modellkette zwischen dem Deutschen Wetterdienst und dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie entwickelt, die eine Simulation von physikalisch-konsistenten Sturmflutwetterlagen erlaubt.

### Methodik und Ergebnisse

Zu Beginn des Projektes wurden Kriterien erarbeitet, die ein Windfeld (bodennaher Horizontalwind) erfüllen muss, damit es zu einem

signifikanten Anstieg des Wasserstandes in der Deutschen Bucht kommt. Als sturmflutwirksames Windereignis wurde u.a. die Richtung WSW bis NNW (247,5° - 337,5°) ab einer Windstärke 8 (ca. 17 m/s) ermittelt. Daraufhin wurden die Vorhersagearchive des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW, UK) rechnergestützt gesichtet und entsprechende Wetterlagen herausgefiltert. Diese wurden mit dem Ensemble-Prediction-System (EPS) des EZMW nachgerechnet und die Member mit den höchsten Windgeschwindigkeiten anschließend durch das Lokalmodell (LM) des Deutschen Wetterdienstes höher aufgelöst.

Die so modellierten Sturmflutwetterlagen wurden über eine bestehende Schnittstelle zum Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) transferiert, wo mittels eines Wasserstandsvorhersagemodells die zugehörigen Wasserstände in der Deutschen Bucht berechnet wurden. Für die Wasserstandsberechnungen des BSH waren im Vorfeld umfangreiche Verifikationsanalysen zur Verwendung eines geeigneten Windschubspannungsansatzes für hohe Windgeschwindigkeiten notwendig.

Die höchsten modellierten Wasserstände an der Deutschen Bucht ergaben sich aus den Anfangsbedingungen der Sturmflutwetterlage des Jahres 1976. Innerhalb der stochastischen Variation der Randbedingungen der Sturmflut von 1976 im EPS, ergab ein Member einen extrem hohen maximalen Effektivwind (richtungsbezogen auf Deutsche Bucht) von  $v_{\max} = 29,5$  m/s. Eine Re-Analyse des tatsächlich aufgetretenen Windfeldes der 1976'er Sturmflut ergibt zum Vergleich eine maximale Effektivgeschwindigkeit von  $v_{\max,Re} = 21,6$  m/s. Aufgrund der physikalischen Konsistenz der meteorologischen Modelle kann damit festgestellt werden, dass die Windgeschwindigkeiten der 1976'er Sturmflut durchaus um ca. 8 m/s höher hätten sein können

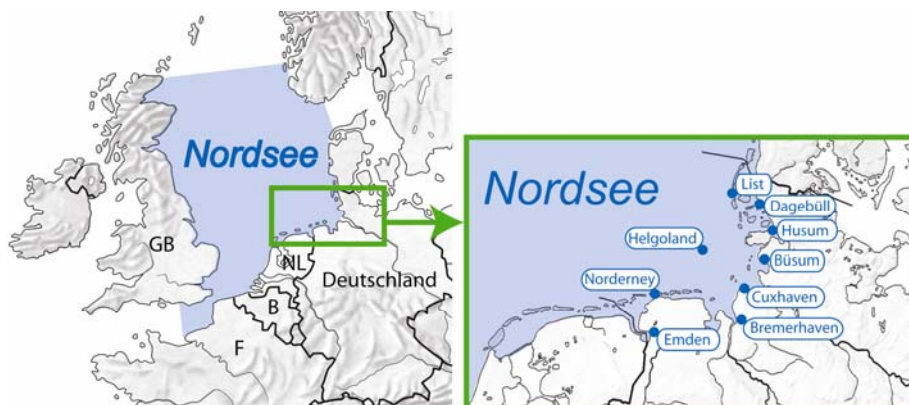


Abb. 1: Untersuchungsgebiet des Forschungsvorhabens MUSE

Die Wasserstandssimulationen ergeben maximale modellierte Wasserstände in der Deutschen Bucht,

die 0,8 bis 1,4 m über den bisher höchsten Wasserständen (HHThw) liegen. Am Pegel Cuxhaven ergibt sich ein maximal modellierter Wasserstand von  $HW_{\max.\text{mod.}} = 651 \text{ cmNN}$ . Das HHThw aus dem Jahr 1976 beträgt zum Vergleich  $HHThw_{1976} = 510 \text{ cmNN}$ . Die Ergebnisse aller maximalen modellierten Wasserstände sind in Abbildung 2 zu sehen. Diese Wasserstände sind die höchsten modellierten Sturmflutwasserstände im Rahmen dieses Forschungsvorhabens; es ist jedoch nicht auszuschließen, dass diese Werte niemals überschritten werden können. Dies wird auch in der statistisch-probabilistischen Analyse berücksichtigt, wo diesen Ereignissen eine Wahrscheinlichkeit von  $P_{\bar{U}} > 0$  zugeordnet wird.

An die statistisch-probabilistische Analyse der Wasserstandsdaten wurden folgende Anforderungen gestellt:

- Verwendung aller qualitativ hochwertigen HThw-Daten eines Pegels
- Berücksichtigung des modellierten Extremwasserstandes
- Reduzierung der Extrapolationsvarianz im Bereich sehr kleiner Wahrscheinlichkeiten ( $P_{\bar{U}} < 10^{-3}$ )
- Wasserstände können nicht beliebig ansteigen

Um diese Anforderungen erfüllen zu können, musste eine Verteilungsfunktion verwendet werden, die zusätzliche Informationen im Bereich sehr kleiner Eintrittswahrscheinlichkeiten berücksichtigen kann. Dazu wurde die 3-parametrische Allgemeine Extremwertverteilung (AE, engl.: GEV) verwendet, die sich im Bereich sehr kleiner Wahrscheinlichkeiten asymptotisch einem Grenzwert nähert. Die wesentliche Aufgabe bestand in der Bestimmung des Krümmungsparameters  $\tau$ ,

der in einer ersten Näherung aus dem maximal modellierten Wasserstand und einer zugeordneten geschätzten Eintrittswahrscheinlichkeit aus dem EPS ( $P_{\bar{U},\text{Schätzung}} = 1,5 \cdot 10^{-5}$ ) ermittelt wird. Diese erste Näherung wird durch weitere Iterationsschritte weiter verbessert.

In Abbildung 2 sind für alle untersuchten Pegel die ermittelten  $10^{-4}$ -Ereignisse mit den zugehörigen Unsicherheitsbereichen angegeben. Eine detaillierte Ergebnisdarstellung ist dem Abschlussbericht des Forschungsvorhabens zu entnehmen.

## Bewertung

Die Ergebnisse und Methoden des Vorhabens zeigen, dass mit der Anwendung moderner Modellierungssysteme und angepasster mathematisch-statistischer Verfahren, eine verbesserte Abschätzung der Wasserstände im Bereich sehr kleiner Eintrittswahrscheinlichkeiten erreicht werden kann, die nicht nur auf den mathematischen Eigenschaften der verwendeten Verteilungsfunktionen, sondern auf physikalischen Zusatzinformationen im Bereich der sehr seltenen Eintrittswahrscheinlichkeiten beruht.

Es kann empfohlen werden, eine solche Vorgehensweise zusätzlich zur üblichen statistischen Datenauswertung hinzuzuziehen, um abgesicherte Entscheidungsgrundlagen zu erhalten.

## Dank

Wir danken allen Projektbeteiligten für die sehr konstruktive und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Dieses KFKI-Forschungsvorhaben wurde finanziell vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03KIS039 gefördert.

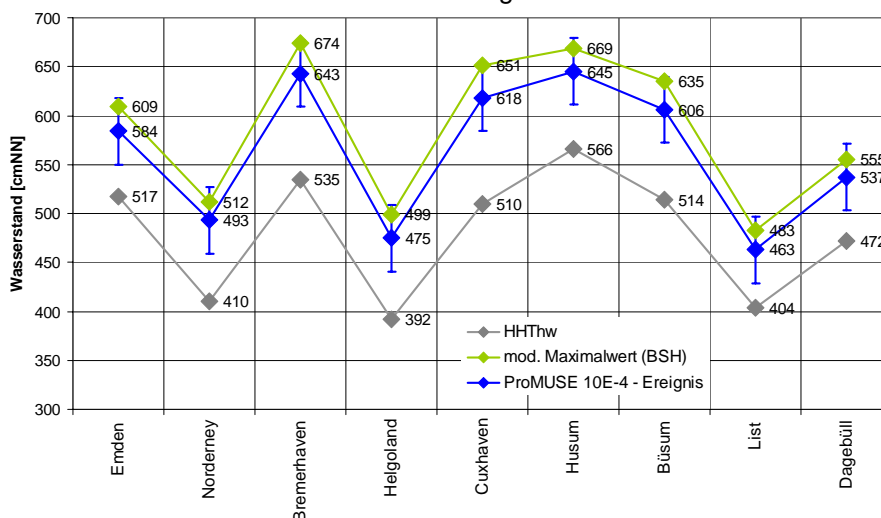


Abb. 2: Ergebnisdarstellung maximal modellierter Wasserstände und  $10^{-4}$ -Ereignisse