

Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten extremer Sturmflutwasserstände an der Deutschen Ostseeküste

Dipl.-Ing. Christoph Mudersbach¹ und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen¹

¹Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen, 57068 Siegen, Fon (0271) 740 2627
e-Mail: christoph.mudersbach@uni-siegen.de

Kurzfassung

Die statistische Einordnung extremer Sturmflutereignisse an der Deutschen Ostseeküste ist für Küstenschutzaufgaben von zentraler Bedeutung. In dem Forschungsvorhaben MUSTOK sind an 10 Pegeln der Deutschen Ostseeküste Analysen mit Hilfe von extremwertstatistischen Verfahren durchgeführt worden, wobei neben den beobachteten Daten auch historische Ereignisse und modellierte Extremwasserstände mit berücksichtigt wurden. In der vorliegenden Ausarbeitung sind die Datengrundlagen und vorläufigen Ergebnisse am Beispiel des Pegels Wismar dargestellt.

1 Einleitung

Das KFKI-Forschungsvorhaben **Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)** wird seit Juli 2005 bearbeitet und zum Ende des Jahres 2009 abgeschlossen. Im März 2008 ist etwa 9 Monate vor Abschluss des Forschungsvorhabens ist ein öffentlicher Workshop mit dem Titel „Sturmflutgefährdung der Ostseeküste“ in Rostock mit dem Ziel durchgeführt worden, die bis dahin gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse mit der Fachöffentlichkeit zu diskutieren. Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten extremer Sturmfluten an der Deutschen Ostseeküste, wozu beobachtete Wasserstandsdaten, historische Ereignisse und innerhalb des Forschungsvorhabens mit hydrodynamischen Modellen ermittelte Wasserstandsdaten verwendet werden. Die in diesem Beitrag dargestellten Ergebnisse spiegeln in kompakter Form den Kenntnisstand zum Zeitpunkt des Workshops wieder und sind daher vorläufige Ergebnisse, die von den endgültigen abwei-

chen können. Die Abschlussberichte des Forschungsvorhabens sind nach Abschluss der Laufzeit u.a. unter folgender Internetseite abrufbar:

www.fwu.uni-siegen.de/wb/forschung/projekte/mustok

2 Datengrundlagen

Für die statistische Analyse extremer Wasserstände sind die Daten von 10 Pegeln an der Deutschen Ostseeküste analysiert worden (Abbildung 1):

Flensburg, Kappeln, Eckernförde, Kiel-Holtenau, Neustadt i.H., Travemünde, Wismar, Warnemünde, Stralsund und Sassnitz

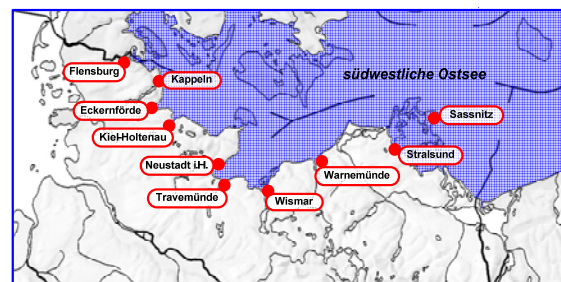


Abbildung 1: Karte der analysierten Pegel an der Deutschen Ostseeküste

Für die genannten Pegel liegen Jahreshauptwerte der jährlichen Höchstwasserstände (HW) und des mittleren Wasserstandes (MW) vor, wobei die verfügbaren Zeitreihen einen unterschiedlichen Umfang aufweisen (Flensburg 1921-2006, Kappeln 1901-2006, Eckernförde 1921-2006, Kiel-Holtenau 1901-2006, Neustadt i.H. 1921-2006, Travemünde 1826-2006, Wismar 1910-2006, Warnemünde 1910-2006, Stralsund 1931-2006, Sassnitz 1946-2006). Zudem sind an einigen Pegeln insbesondere in den Kriegsjahren Datenlücken vor-

handen, die über Korrelationsrechnungen zu benachbarten Pegeln geschlossen wurden.

In einer zusammenfassenden Betrachtung der Pegeldata ergeben sich je nach Lage des Pegels lokale Unterschiede und Besonderheiten. Der mittlere Wasserstand liegt im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes ca. 3 bis 5 cm unter dem mittleren Wasserstand des weiter östlich gelegenen Teils (Abbildung 2). Dies ist durch die permanente Neigung der Wasseroberfläche der Ostsee zu erklären (HUPFER ET AL. 2003).

Die Mittelwerte der HW-Zeitreihen von 1951 bis 2006 weisen große Schwankungen an den Pegeln auf. Es ist zu erkennen, dass die Pegel im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes im Mittel höhere Sturmflutwasserstände aufweisen, als im östlichen Teil. Des Weiteren ergibt sich für die Lage des Pegels zur Küstenlinie ein signifikanter Unterschied. Die Pegel Flensburg, Eckernförde, Kiel-Holtenau, Neustadt i.H., Travemünde und Wismar liegen jeweils im Inneren einer Bucht oder Förde, in der sich Windstauwirkungen stärker ausprägen und somit auch die Wasserstände höher auflaufen (*Buchtenstau*). Dieser Effekt ist an Pegeln, die mehr an der offenen Küstenlinie positioniert sind (Kappeln, Warnemünde, Sassnitz), nicht zu erkennen. Eine Besonderheit stellt in diesem Zusammenhang der Pegel Stralsund dar, der aufgrund seiner Lage in einem Buchtenbereich theoretisch auch höhere Sturmflutwasserstände erwarten lassen könnte, jedoch ist die weiter östliche Lage des Pegels für einen geringeren Windstau verantwortlich. Nach HUPFER ET AL. (2003) ist der maximal mögliche Windstau im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes wesentlich geringer, als im weiter westlich gelegenen Teil. HUPFER ET AL. (2003) nehmen aufgrund der unterschiedlich lokalen Ausprägungen von Wasserständen eine Unterteilung in Pegel an Innenküsten (I) und Außenküsten (A) vor, welche auch für die vorliegende Auswertung übernommen wird:

Flensburg (I), Eckernförde (I), Kiel (I), Neustadt i.H. (I), Travemünde (I), Wismar (I), Kappeln (I), Stralsund (I), Sassnitz (A), Warnemünde (A)

In Abbildung 3 sind die linearen Trends der zur Verfügung stehenden Ostsepegel von Flensburg entlang der Küstenlinie bis Sassnitz aufgetragen. Die Trends der MW-Zeitreihen liegen zwischen 0,4 und 1,5 mm/a, wobei tendenziell im westlichen Untersuchungsgebiet die höheren Trends vorzufinden sind. Die Identifikation und Trennung der isostatischen und eustatischen Effekte in Bezug zum relativen

Meeresspiegelanstieg in der südwestlichen Ostsee ist nicht zweifelsfrei geklärt und kann auch im Rahmen der hier vorliegenden Bearbeitung nicht detailliert beantwortet werden. Entscheidend ist jedoch anzumerken, dass die Größenordnungen der Trends der MW-Zeitreihen in Bezug auf die Ermittlung von extremen Wasserständen nur von untergeordneter Bedeutung sind. Die Trends der HW-Zeitreihen schwanken in einem relativ großen Bereich von -0,3 bis 4,4 mm/a, was weniger in eustatischen und isostatischen Effekten, sondern vielmehr in der stochastischen Eigenart einer Extremwertzeitreihe begründet ist.

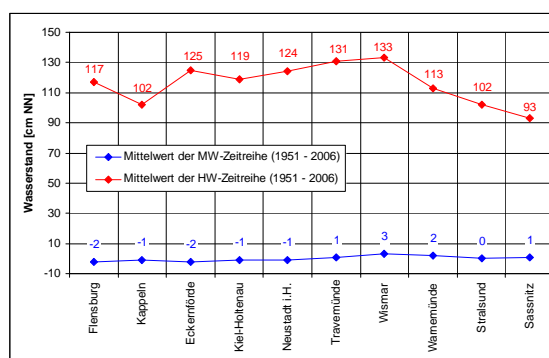


Abbildung 2: Längsschnitt von Flensburg bis Sassnitz der Mittelwerte der MW- und HW-Zeitreihen von 1951 bis 2006

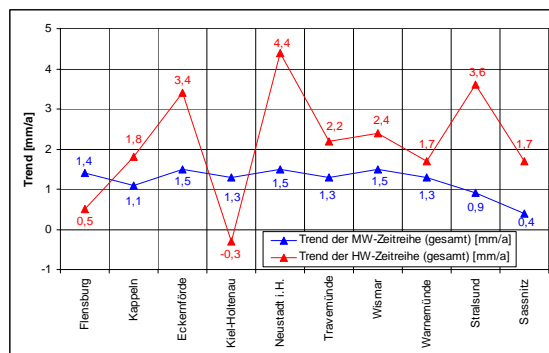


Abbildung 3: Längsschnitt von Flensburg bis Sassnitz der linearen Trends der MW- und HW-Zeitreihen

3 Historische Daten

Neben der Analyse von beobachteten Pegeldata ist die Einbeziehung von historischen Daten an der Ostsee von besonderer Bedeutung, um eine statistische Einordnung von extremen Wasserständen vornehmen zu können. Dies ist deswegen von Bedeutung, da die Sturmflut vom 12./13. November 1872 an der gesamten Deutschen Ostseeküste zu extrem hohen Wasserständen geführt hat, dieser Wert

jedoch nicht in den Zeitraum der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen fällt und damit nicht in den Zeitreihen enthalten ist – mit Ausnahme des Pegels Travemünde – und nur als historisch überlieferter Wert zur Verfügung steht. Weiterhin sind aus der früheren Überlieferung historische Hochwasserstandsmarken an verschiedenen Pegeln bekannt, die ebenfalls extreme Wasserstände erreicht haben und als Zusatzinformationen in die Analysen mit einbezogen werden sollten.

Erste Überlieferungen über extreme Sturmflutwasserstände an der Ostsee stammen aus dem Jahr 1044 n.Chr., danach finden sich Angaben zu Sturmfluten in den Jahren 1304 und 1320. Es folgt wiederum eine größere zeitliche Lücke bis ins 17. Jahrhundert, wo ab dem Jahr 1625 einige detailliertere Aufzeichnungen zu hohen Wasserständen zu finden sind. Die Wasserstände sollen bei den genannten Ereignissen zwischen 2 m und >3 m über dem Mittelwasser gelegen haben. Ab dem 19. Jahrhundert liegen für viele Pegel genauere Aufzeichnungen vor, am Pegel Travemünde sogar schon regelmäßig aufgezeichnete Wasserstandswerte. Bei den historischen Ereignissen muss beachtet werden, dass in der Regel nicht die Höhe des Wasserstandes der Grund für die Überlieferung war, sondern vielmehr die damit einhergehenden katastrophalen Schäden oder Todesopfer. So kann es vorkommen, dass ein eher niedriger Wasserstand, der zu schweren Schäden geführt hat, auch als katastrophale Sturmflut überliefert wird. Ebenso bleiben eventuell extrem hohe Ereignisse, die zu keinen Schäden geführt haben unerwähnt. Eine Zusammenstellung der in der Literatur vorhandenen historischen Wasserstandsmarken der untersuchten Pegel kann dem Abschlussbericht entnommen werden.

Neben den Unsicherheiten der Höhenangaben von historischen Sturmfluten infolge einer nicht detaillierten Höhenmessung muss beachtet werden, dass die Höhenangaben in der Regel in Zentimetern oder Metern über Mittelwasser (MW) erfolgten, dies jedoch kein zeitlich konstanter Wert ist. Aufgrund des positiven Trends des Mittelwassers zwischen 0,4 und 1,5 mm/a an den untersuchten Pegeln, liegt das Mittelwasserniveau für zurückliegende Zeiträume in der Regel unterhalb von 0 mNN. Betrachtet man die Entwicklung des Mittelwassers des Pegels Travemünde, so ergibt sich ein langfristiger Trend von 1826 bis 2006 von 1,3 mm/a, der dazu führen würde, dass bei einer Extrapolation dieses Trends in die Vergangenheit, der Mittelwasserstand um 1700 etwa 35 cm unter

NN liegt. Damit müsste eine Wasserstandsmarke aus dem Jahr 1700 um ca. 35 cm reduziert werden, um einen korrekten Bezug zu NN-Höhen zu erhalten. Ein etwas anderes Bild stellt sich dar, wenn ein Trend aus der MW-Zeitreihe von 1826 bis 1900 berechnet wird. Hier ergibt sich ein zu vernachlässigender Trend von 0,09 mm/a, so dass das Niveau für das Mittelwasser in dieser Zeitspanne näherungsweise als zeitlich konstant angesehen werden kann. Das Mittelwasser des Pegels Travemünde für den Zeitraum 1826 bis 1900 liegt ca. 15 cm unter NN, weshalb bei der Umrechnung auf NN-Höhen eine Korrektur von 15 erfolgen müsste. In der Literatur finden sich jedoch auch hierzu widersprüchliche Angaben. So wird z.B. in JENSEN UND TÖPPE (1990) für den Pegel Flensburg im Jahr 1694 ein Wasserstand von 270 cm ü.MW angegeben. Im GENERALPLAN KÜSTENSCHUTZ DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (2001) findet sich ein Wert von 270 cm ü.NN für das gleiche Ereignis. Hier hat offenbar keine entsprechende Umrechnung zwischen den Höhenbezugssystemen stattgefunden.

Für eine statistische Analyse müssen Wasserstände prinzipiell auf das der Auswertung zugrunde liegende Bezugsjahr (hier: 2006) beschickt werden. Die Beschickung ist eine Korrektur der Wasserstände auf das im Bezugsjahr vorhandene Mittelwasserniveau. Als Bezugsjahr wird in der vorliegenden Auswertung das Endjahr der Pegelzeitreihe verwendet. (Beispiel: Wenn der mittlere Wasserstand der Ostsee von 1850 bis 2006 um ca. 20 cm gestiegen ist, dann kann davon ausgegangen werden, dass ein Sturmflutwasserstand aus dem Jahr 1850 mit 150 cmNN im Jahr 2006 170 cmNN betragen könnte.) Aufgrund der ohnehin vorhandenen Unsicherheiten von historischen Extremwerten werden diese über eine vereinfachte generalisierte Mittelwasserentwicklung der Ostsee auf das Jahr 2006 beschickt (Abbildung 4). Dabei wird angesetzt, dass bis zum Jahr 1850 das Mittelwasser 20 cm unter Normalnull liegt und von 1850 bis 2006 mit einer Steigung von 1,3 mm/a auf 0 mNN ansteigt (Anmerkung: Die Wasserstandsdaten der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen werden nicht mit der vereinfachten Entwicklung des Mittelwassers beschickt, sondern mit dem tatsächlichen Verlauf des Mittelwassers des jeweiligen Pegels!).

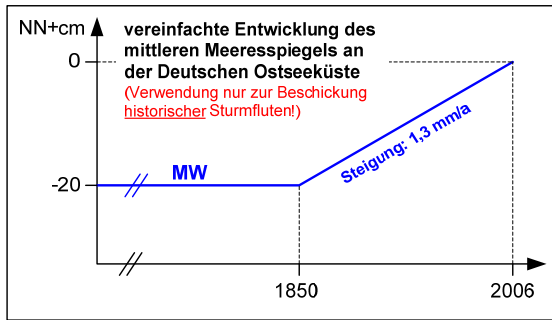


Abbildung 4: Vereinfachte Entwicklung des mittleren Meeresspiegels an der Deutschen Ostseeküste zur Beschickung historischer Wasserstandsaufzeichnungen

4 Vorfüllung

Als Vorfüllung (*auch: Füllungsgrad*) der Ostsee wird der gemittelte Wasserstand der Ostsee über einen Zeitraum von Tagen bis Wochen angesehen. Dagegen wird als mittlerer Füllungsgrad der gemittelte Wasserstand über einen längeren Zeitraum (Jahre und mehr) definiert. Aufgrund von Variationen des Ein- oder Ausstromes durch Belte und Sund kann der mittlere Wasserstand der Ostsee steigen oder sinken (HUPFER ET AL. 2003). So wird durch eine über Tage oder Wochen anhaltende Windlage aus westlicher Richtung Wasser von der Nordsee in die Ostsee transportiert, was zu einem Auffüllen des Ostseebeckens führt. Entgegengesetzte Windfelder bedingen ein geringeres Wasservolumen in der Ostsee. HUBER (2000) gibt an, dass nach Erfahrungen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) eine Vorfüllung der Ostsee eine Mittelwassererhöhung um bis zu 50 cm verursachen kann. HUPFER ET AL. (2003) bestätigen diese Aussage im Wesentlichen und geben zusätzlich an, dass neben einer Erhöhung des Wasserstandes um 50 – 60 cm auch ein Absinken des Wasserstandes in der gleichen Größenordnung möglich ist.

HEYEN ET AL. (1996) kommen zu dem Schluss, dass die Ost-Westkomponente des Windschubes im Übergangsbereich von Nord- und Ostsee sowohl für Wasserstandsschwankungen in der Ostsee als auch in der Deutschen Bucht verantwortlich ist. JANSSEN (2002) analysiert durch die Auswertungen von 54 Pegelzeitreihen den Zusammenhang zwischen dem Wasserstand in der Nordsee und dem der Ostsee, insbesondere wird die Beeinflussung der Wasserstandsschwankung der Ostsee durch jene der Nordsee analysiert. Durch eine Kompo-

nentenanalyse der Zeitreihen zeigt JANSSEN (2002), dass sich die Wasserstände in Nord- und Ostsee in ihren langperiodischen Wasserstandsschwankungen ähnlich verhalten. JANSSEN (2002) führt weiter aus, dass ein Zusammenhang zwischen den Wasserstandsschwankungen und der Stärke zonaler Winde über der Nordsee besteht. Starke westliche Winde führen zu einem Anstau des Wassers in der Deutschen Bucht sowie in der nordöstlichen Ostsee. Gleichzeitig wird der Wasserstand in der Beltsee erniedrigt, was einen barotropen Druckgradienten von der Nord- in die Ostsee erzeugt und somit einen Einstrom in die Ostsee begünstigt. Auf diese Weise wirken Schwankungen im zonalen Wind sowohl direkt auf den Wasserstand der Ostsee als auch indirekt über den Wasserstand in der Nordsee.

KOPPE (2001) führt aus, dass der Füllungsgrad der Ostsee durch die Höhe des Oberflächenwasserzuflusses sowie durch den Wasseraustausch mit der Nordsee bestimmt wird. Wegen der vornehmlich im östlichen Teil der Ostsee mündenden abflussreichen Flüsse und aus der Dominanz der Windrichtungen W bzw. SW neigt sich der Wasserspiegel der Ostsee unter mittleren Bedingungen von Ost nach West. Nach WEISE (1990) beträgt die mittlere Neigung des Wasserspiegels zwischen Timmendorfer auf Poel ($11^{\circ}23'$ geogr. Länge) und Ueckermünde ($14^{\circ}03'$ geogr. Länge) $3,46$ cm pro geographischem Längengrad, so dass der Wasserspiegel in Ueckermünde im Mittel rund 9 cm über dem von Timmendorf liegt. Bei über mehrere Tage wirkenden Starkwinden aus westlichen Richtungen kommt es zum verstärkten Einstrom von Nordseewasser und damit zu einem erhöhten Füllungsgrad der Ostsee. Der Prozess des Auffüllens der Ostsee dauert im Mittel zehn bis fünfzehn Tage an und erhöht den Wasserstand relativ zum Mittelwasserstand um bis zu 20 cm am Pegel Landsort (Insel südlich von Stockholm gelegen) (BAERENS, HUPFER 1995 in KOPPE 2001).

HUBER (2000) führt zusätzlich aus, dass in der Ostsee im Mittel ein permanentes Gefälle des Meeresspiegels von Norden nach Süden vorhanden ist. HUBER (2000) gibt die Größenordnung dieser Wasserspiegeldifferenz von St. Petersburg bis zur westlichen Ostsee mit ca. 15 cm an, welche durch den mittleren Windstau infolge der vorherrschenden Winde aus westlicher bis südwestlicher Richtung und dem vorhandenen Dichteunterschied zwischen Nord- und Südteil der Ostsee durch Zufluss von Süßwasser im nördlichen Teil resultiert.

HUPFER ET AL. (2003) geben die mittlere Neigung zwischen den äußersten Enden des Bottischen und Finnischen Meerbusens und den Übergängen zur Beltsee mit 18 – 20 cm an. Dabei unterliegt diese grundsätzliche Oberflächenstruktur jahreszeitlichen Schwankungen.

In HUPFER ET AL. (2003) sind Wasserstandwerte am Pegel Landsort von 1899 bis 1993 hinsichtlich des Füllungsgrades analysiert worden. Es zeigt sich, dass im Mittel ab dem 24. Tag vor dem Sturmflutscheitelwasserstand eine signifikante Abweichung vom mittleren Füllungsgrad auftritt.

Die Analyse der Vorfüllung der Ostsee ist auch Bestandteil des vorliegenden Forschungsvorhabens, da eine mögliche Vorfüllung von bis zu 50 cm (s.o.) ein signifikanter Anteil eines extremen Sturmflutereignisses sein kann.

Für die Analyse der Vorfüllung eignet sich der Pegel Landsort – südlich von Stockholm –, da er sich in etwa im Knotenbereich der am häufigsten auftretenden einknotigen Eigenschwingung befindet, so dass dort der jeweilige Füllungsgrad der Ostsee und die eintretenden Volumenänderungen in den Wasserstandsschwankungen günstig widerspiegelt werden (HUPFER ET AL. 2003).

Da keine einheitliche Definition des Begriffs Vorfüllung existiert, musste diese zunächst im Projekt erfolgen. Nach umfangreicher Literaturrecherche, Abstimmungsgesprächen in der Projektgruppe und Sensitivitätsuntersuchungen wurde eine Vorfüllung definiert als eine Wasserstandserhöhung um mindestens 15 cm ü.MW über mehr als 20 Tage Dauer am Pegel Landsort.

Die Zeitreihe des Pegels Landsort von 1886 bis 2006 (1-Stunden-Werte) wurde hinsichtlich dieser Definition analysiert, wobei zunächst ein Tiefpassfilter (gleitendes Mittel über 21 Tage) angewendet wurde. In der Zeitreihe von 1886 bis 2006 wurden 145 Vorfüllungsereignisse identifiziert, wobei mittlere Wasserstandserhöhungen von 15 cm (per Definition) bis etwa 40 cm erreicht werden. Die Vorfüllungsereignisse haben Dauern von 20 Tagen (per Definition) bis hin zu 119 Tagen. Aufgrund der zugrunde liegenden Zeitreihe über 121 Jahre tritt ein Vorfüllungsereignis im Mittel 1,2 mal pro Jahr auf und erreicht als Mittelwert über alle Vorfüllungsereignisse eine Höhe von 25 cm ü.MW. Mit den vorliegenden Untersuchungen werden frühere Analysen im Wesentlichen bestätigt.

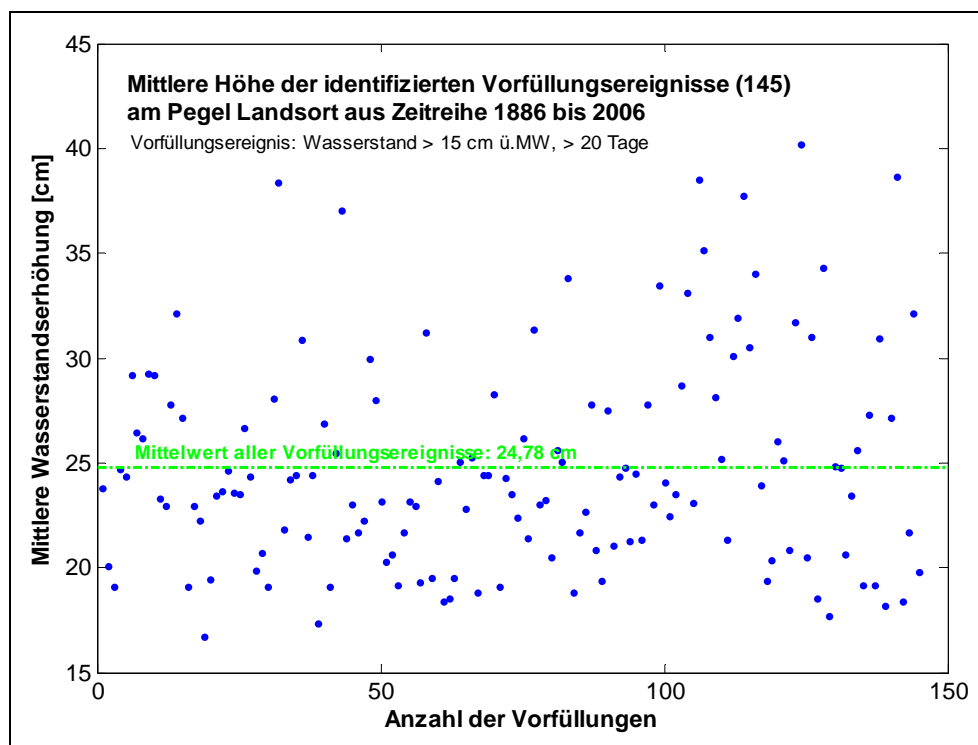


Abbildung 5: Auswertung der Vorfüllungsereignisse am Pegel Landsort

Für die Entstehung eines extremen Sturmflutereignisses ist die Frage von Bedeutung, ob eine sturmflutwirksame Wetterlage und ein hohes Vorfüllungsereignis zusammentreffen können und diese Effekte additiv überlagert werden dürfen. Dazu muss die Frage geklärt werden, ob eine statistische Abhängigkeit zwischen einem sturmflutwirksamen Ereignis und einer Vorfüllung besteht. Zunächst kann angenommen werden, dass durch vorwiegend vorherrschende Zugbahnen der Tiefdruckgebiete von West nach Ost einige Tage vor dem eigentlichen Sturmflutereignis westliche Winde vorhanden sind, die Wasser von der Nordsee in die Ostsee drängen und es somit zu einem Wasserstandsanstieg kommen kann. Aufgrund der gewählten Definition eines Vorfüllungsereignisses werden diese eher kurzfristigen Effekte über Stunden oder wenige Tage jedoch nicht als Vorfüllung angesehen. Denkbar sind hingegen Situationen, in denen eine langanhaltende Wetterlage mit westlichen Winden vorherrschte und Wasser in die Ostsee gedrängt hat und dies zusätzlich von einer Vb-Wetterlage überlagert wird. Ein begründeter Zusammenhang zwischen der lang anhaltenden Wetterlage mit westlichen Winden und dem Auftreten der Vb-Wetterlage kann nicht direkt hergestellt werden, womit von einer Unabhängigkeit dieser Ereignisse ausgegangen werden kann.

Für einen statistischen Nachweis der Abhängigkeit oder Unabhängigkeit von Vorfüllung und sturmflutwirksamer Tiefdruckwetterlage werden zum Beispiel eine Zeitreihe aller Vorfüllungsereignisse und eine Zeitreihe aller

Sturmflutereignisse am Pegel Landsort benötigt. Dies ist jedoch nicht möglich, da ein Sturmflutereignis über die Wasserstandshöhe definiert wird und somit auch eine eventuelle Vorfüllung mit enthalten sein kann. Eine Trennung dieser beiden Ereignisse auf Grundlage beobachteter Wasserstände ist daher nicht möglich.

Eine weitere Möglichkeit zur Überprüfung der statistischen Abhängigkeit liegt darin, die Vorfüllung am Pegel Landsort zu Zeitpunkten von aufgetretenen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste zu analysieren. In Abbildung 6 sind alle Sturmflutereignisse (nach BSH-Klassifikation) der Pegel Wismar und Warnemünde im Zeitraum 1904 bis 2006 dargestellt. Für die gleichen Zeitpunkte wurde die Vorfüllung am Pegel Landsort analysiert (maximaler und mittlerer Wasserstand des Vorfüllungsereignisses). Es ist zu erkennen, dass bei den meisten Sturmflutereignissen auch eine Vorfüllung am Pegel Landsort nachgewiesen werden kann, jedoch insbesondere in den Jahren 1954, 1955, 1957 und 1995 Sturmflutereignisse auftraten, ohne dass eine Vorfüllung beteiligt war. Die Tatsache, dass Sturmflutereignisse an der Deutschen Ostseeküste sowohl mit als auch ohne nachgewiesene Vorfüllung am Pegel Landsort auftreten, begründet den Umkehrschluss, dass diese beiden Ereignisse als statistisch unabhängig angenommen werden können. Ein direkter Nachweis kann im Rahmen des Forschungsvorhabens MUSTOK nicht geführt werden und bildet einen zukünftigen Forschungsbedarf.

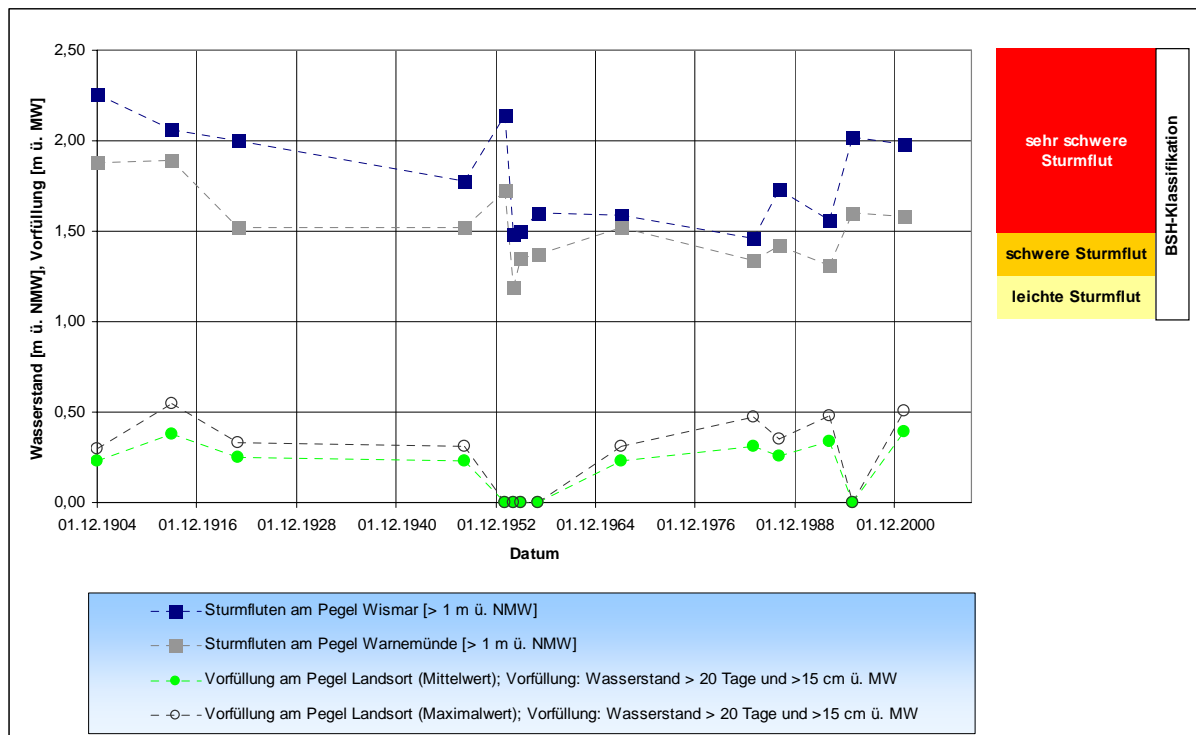


Abbildung 6: Zusammentreffen von Sturmflutereignissen in Wismar und Warnemünde und Vorfüllungsereignissen in Landsort

5 Statistische Analyse

5.1 Methodik

Die Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten extremer Sturmflutwasserstände wird mit Hilfe von Verfahren der Extremwertstatistik vorgenommen. Dabei wird in der Regel die Zeitreihe der zu untersuchenden Extremwerte (z.B. jährliche Höchstwerte) der Größe nach geordnet und es werden empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeiten zugeordnet. An diese Daten werden mit speziellen mathematischen Schätzverfahren Verteilungsfunktionen angepasst, die das Datenkollektiv bestmöglich beschreiben sollen. Diese Funktionen können in den Bereich sehr kleiner Eintrittswahrscheinlichkeiten extrapoliert werden.

Bei der hier durchgeführten Extremwertstatistik findet der Ansatz nach GRINGORTEN (MAIDMENT 1993) für die Bestimmung der empirischen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten Anwendung. Als Extremwertverteilungsfunktion wird die ProMUSE-Verteilung angenommen, die auf der Allgemeinen Extremwertverteilung beruht. Die Momente der ProMUSE-Funktion werden über die L-Momente bestmöglich geschätzt.

Neben der Verteilungsfunktion selbst wird der 95%-Konfidenzbereich angegeben, der den Bereich definiert, innerhalb dessen der wahre Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% liegt.

Neben den beobachteten Werten werden die historischen Wasserstandsdaten und die modellierten Höchstwerte in die statistische Analyse mit einbezogen, um insbesondere im Bereich der sehr kleinen Eintrittswahrscheinlichkeiten (Jährlichkeit > 500 Jahre, Eintrittswahrscheinlichkeit $< 2 \cdot 10^{-3}/a$) aussagekräftige Ergebnisse ableiten zu können. Für weitere Ausführungen zur Methodik der statistischen Analyse wird auf den Abschlussbericht verwiesen.

In der vorliegenden Ausarbeitung werden die vorläufigen Ergebnisse der statistischen Auswertungen am Beispiel des Pegels Wismar dargestellt.

5.2 Ergebnisse für den Pegel Wismar

Für den Pegel Wismar liegen die Zeitreihen der jährlichen Höchstwasserstände (HW) und des mittleren Wasserstandes (MW) von 1910 bis 2006 vor. Der mittlere Wasserstand weist einen langjährigen Trend von 1,5 mm/a auf, während die Hochwasserzeitreihe einen Trend von 2,4 mm/a hat (Abbildung 7).

In einem ersten Schritt wurden die beobachteten jährlichen Höchstwerte (HW) einer extremwertstatistischen Analyse unterzogen (Abbildung 8). Dabei wurden die Daten der HW-Zeitreihe mit dem 19-jährigen gleitenden Mittel der MW-Zeitreihe auf das Jahr 2006 beschriftet. Mit dieser Methodik lassen sich auf Grundlage der 97-jährigen Zeitreihe nach statistischen Grundsätzen Ereignisse mit einer Jährlichkeit von bis zu 300 Jahren abschätzen. Darüber hinaus können die Unsicherheiten in den Ergebnissen relativ groß werden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden jedoch auch hier die Ergebnisse bis zu einer Jährlichkeit von 10.000 Jahren extrapoliert.

Für den Pegel Wismar existieren Aufzeichnungen historischer Sturmflutereignisse ab dem Jahr 1304. Für die Berücksichtigung von historischen Ereignissen in der Extremwertstatistik muss ein Schwellenwert definiert werden, oberhalb dessen Ereignisse als historisch bewertet werden. Dieser Schwellenwert wurde aufgrund von Sensitivitätsstudien auf 260 cmNN festgelegt, womit drei Ereignisse (1625: 284 cmNN, 1694: 284 cmNN, 1872: 297 cmNN) in der statistischen Analyse Berücksichtigung finden. Aufgrund der allgemein größeren Unsicherheit historisch überlieferter Wasserstandsmarken gehen diese mit einer geringeren Gewichtung in die Analyse ein. In Abbildung 9 ist das Ergebnis der Extremwertstatistik mit Einbeziehung der historischen Wasserstandswerte dargestellt. Die grünen Markierungen repräsentieren die historischen Ereignisse.

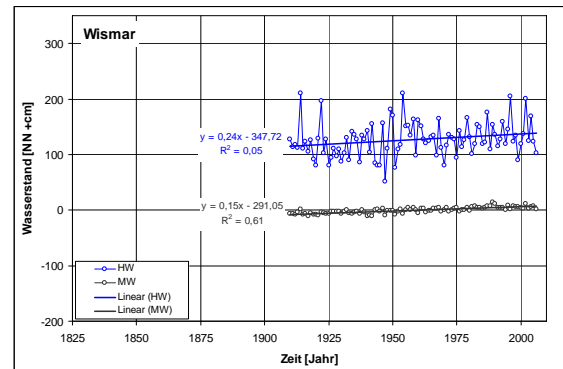


Abbildung 7: Zeitreihen des jährlichen Höchstwasserstandes (HW) und mittleren Wasserstandes (MW) am Pegel Wismar von 1910 bis 2006

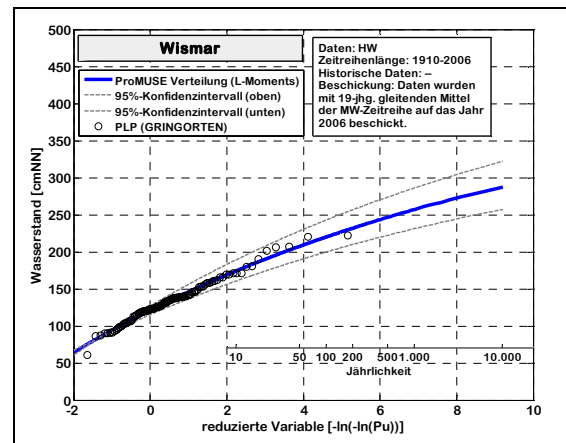


Abbildung 8: Extremwertstatistik der HW-Zeitreihe des Pegels Wismar

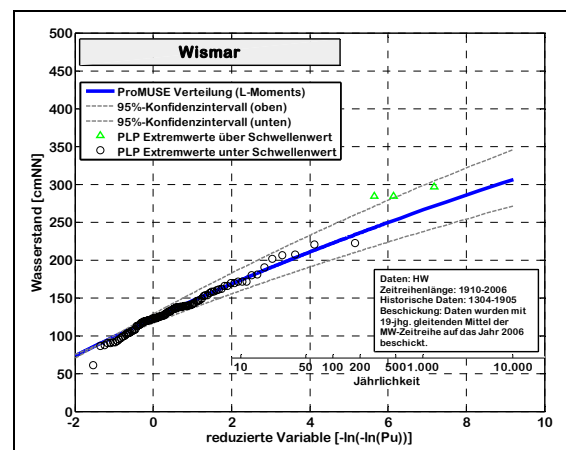


Abbildung 9: Extremwertstatistik der HW-Zeitreihe und historischer Ereignisse am Pegel Wismar

Die Berechnungen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Hamburg mit hydrodynamischen Modellen haben maximale Wasserstände am Pegel Wismar von 2,54 mNN ergeben (MÜLLER-NAVARRA UND BORK 2008). Dieser Wasserstand ist der höchste resultierende Wasserstand aus der Gesamtheit aller im Projekt untersuchten Wetterlagen (11,8 Mio. Vorhersagestunden aus Berechnungen mit dem Ensemble Prediction System des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage). Damit kann diesem Ereignis eine mittlere Eintrittsrate von $P_E = 7,4 \cdot 10^{-4}/a$ zugeordnet werden. Dieser modellierte Wert lässt sich in die statistische Analyse integrieren, womit insbesondere die Aussagen im Bereich der sehr kleinen Eintrittswahrscheinlichkeiten auf Grundlage physikalisch möglicher extremer Zustände verbessert werden können. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 10 dargestellt.

Wie in Abschnitt 4 dargestellt, kann begründet angenommen werden, dass ein Vorfüllungs- und Sturmflutereignis als statistisch unabhängig angesehen werden können. Im Rahmen einer Sensitivitätsstudie ist daher dem maximal ermittelten Wert von 254 cmNN eine mittlere Vorfüllung in Höhe von 25 cm zugeschlagen worden. Aufgrund der Tatsache, dass ein Vorfüllungsereignis in guter Näherung im Mittel einmal pro Jahr auftritt wird hierdurch die Eintrittsrate des Ereignisses nicht beeinflusst. Die resultierende Verteilungsfunktion weist Abweichungen auf und besitzt fast keine Krümmung mehr.

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der extremwertstatistischen Untersuchungen zusammengestellt. Es kann festgestellt werden, dass sich zwischen den einzelnen Datengrundlagen Unterschiede beim 100-jährlichen Wasserstand von 12 cm und beim 10.000-jährlichen Wasserstand von 38 cm ergeben.

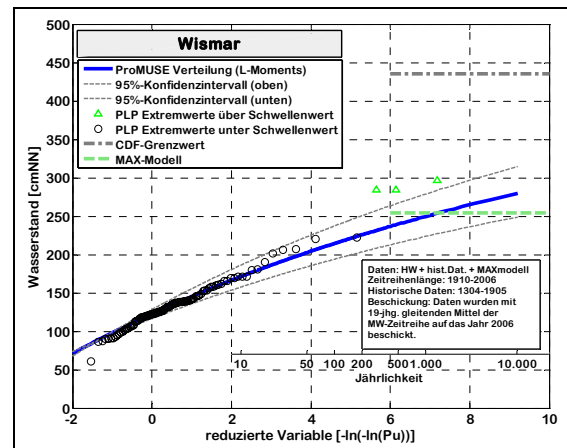


Abbildung 10: Extremwertstatistik der HW-Zeitreihe, historischer Ereignisse und modellierter Höchstwerte am Pegel Wismar

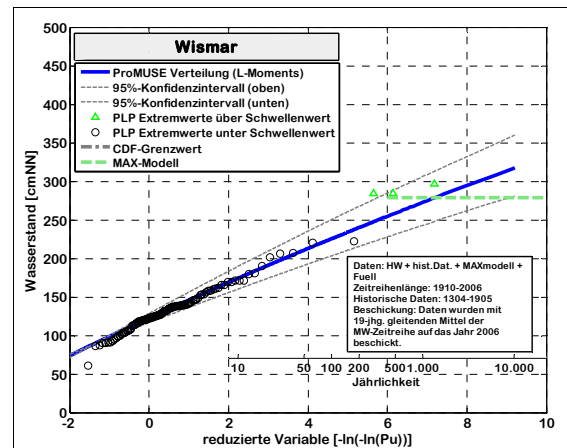


Abbildung 11: Extremwertstatistik der HW-Zeitreihe, historischer Ereignisse und überlagerter Vorfüllung am Pegel Wismar

Tabelle 1: vorläufige Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Wismar

Pegel Wismar				
Jährlichkeit	Daten: HW	Daten: HW, historische Daten	Daten: HW, historische Daten, modellierter Höchstwert (254 cmNN)	Daten: HW, historische Daten, modellierter Höchstwert (254 cmNN), Vorfüllung (25 cm)
[Jahre]	[cmNN]	[cmNN]	[cmNN]	[cmNN]
100	220	222	214	226
200	232	236	226	240
500	247	253	240	259
1.000	257	266	250	273
4.000	276	291	268	300
10.000	288	306	280	318

6 Bewertung der Ergebnisse

Die bisherigen (vorläufigen!) Ergebnisse für den Pegel Wismar zeigen, dass die Einbeziehung von historischen Wasserstandsdaten in die statistische Analyse praktikabel durchführbar ist und hinsichtlich der Einordnung seltener Extremereignisse ein geeignetes Hilfsmittel darstellt. Weiterhin führt die Berücksichtigung von physikalisch möglichen modellierten Extremwerten zu einer belastbareren Extrapolation der Verteilungsfunktion in den Bereich der sehr kleinen Eintrittswahrscheinlichkeiten, wenngleich die Ergebnisse sich nicht grundsätzlich von den Ergebnissen auf Grundlage der beobachteten Daten unterscheiden. Das 95%-Konfidenzintervall der Extremwertstatistik auf alleiniger Grundlage der beobachteten HW-Zeitreihe für das 10.000-jährliche Ereignis liegt bei 257 bis 322 cmNN und umschließt somit die Ergebnisse der weiteren Analysen.

Weitere Verifizierungen und Ergebnisdarstellungen für die anderen untersuchten Pegelstandorte können dem Abschlussbericht des Forschungsvorhabens MUSTOK entnommen werden.

Das KFKI-Forschungsvorhaben „Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)“ wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) von 2005 bis 2008 gefördert.

Literatur

- Heyen, H., Zorita, E. und von Storch, H. (1996): Statistical downscaling of winter monthly mean North Atlantic sea-level pressure to sea-level variations in the Baltic Sea, *Tellus*, 48A
- Huber, K. (2000): Hochwasserstände an Nord- und Ostseeküsten, in: *Risikomanagement im Küstenraum*, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Heft 85
- Hupfer, P., Harff, J., Sterr, H. und Stigge, H.-J. (Hrsg.) (2003): *Die Wasserstände an der Ostsee, Entwicklungen – Sturmfluten – Klimawandel*, Die Küste, Heft 66
- Janssen, F. (2002): *Statistische Analyse mehrjähriger Variabilität der Hydrographie in Nord- und Ostsee*, Dissertation, Universität Hamburg
- Jensen, J. und Töppe, A. (1990): *Untersuchungen über Sturmfluten an der Ostsee unter spezieller Berücksichtigung des Pegels Travemünde*, DGM 34, Heft 1/2
- Koppe, B. (2001): *Hochwasserschutzmanagement an der deutschen Ostseeküste*, Dissertation, Universität Rostock
- Land Schleswig-Holstein (2001): *Generalplan Küstenschutz – Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig Holstein*
- Maidment, D.R. (ed.) (1993): *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill, New York
- Müller-Navarra, S. und Bork, I. (2008): *Sturmflutsimulationen*, Beitrag zum Workshop „Sturmflutgefährdung der Ostseeküste“, Rostock
- Weise, H. (1990): *Rezente vertikale Erdkrustenbewegungen im südlichen Ostseeraum*. Veröff. Zentralinst. Physik der Erde Potsdam, Nr. 115