

Extremwertstatistische Analyse von historischen, beobachteten und modellierten Wasserständen an der deutschen Ostseeküste

Von CHRISTOPH MUDERSBACH und JÜRGEN JENSEN

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

Die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen stellt eine Grundaufgabe der Hydrologie dar. Für Bemessungsaufgaben im Küsteningenieurwesen sind insbesondere die Eintrittswahrscheinlichkeiten von extrem hohen oder niedrigen Wasserstandsereignissen von Bedeutung. Diese werden durch extremwertstatistische Methoden ermittelt, wobei häufig Wahrscheinlichkeitsaussagen zu Wasserständen getroffen werden sollen, die bisher noch nicht eingetreten sind. Basierend auf der Allgemeinen Extremwertverteilung wurde eine Methodik entwickelt, mit der beobachtete Daten, historische Wasserstände und modellierte Extremereignisse zusammen analysiert werden können, um eine verlässlichere Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten seltener Ereignisse zu erhalten. Es wurden 10 Pegel an der schleswig-holsteinischen und mecklenburg-vorpommerschen Ostseeküste hinsichtlich extremer Wasserstände ausgewertet. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass durch die integrierte extremwertstatistische Analyse von beobachteten, historischen und modellierten Wasserständen eine verbesserte Beurteilung der Eintrittswahrscheinlichkeiten extremer Sturmfluten erfolgen kann. Die vorliegenden Untersuchungen beziehen sich ausschließlich auf den gegenwärtigen klimatischen Zustand. Eventuelle Änderungen im hydrologischen System der Ostsee infolge eines Klimawandels sind nicht berücksichtigt und müssen in weiterführenden Forschungsarbeiten analysiert werden.

S c h l a g w ö r t e r

Ostsee, Sturmflut, Extremwertstatistik, Jährlichkeit, Vorfällung, Pegelwasserstände, Zeitreihen

S u m m a r y

The determination of exceedance probabilities of water levels is one of the main engineering tasks in hydrology. For design purposes in coastal engineering the exceedance probabilities of rare events are of special importance. This can be done by using extreme value statistics, which allow an extrapolation of the water levels beyond the range of observation. In the present study, an extreme value approach was developed, which enables to combine observed data, historical records as well as modelled extreme floods into one statistical analysis. This approach is based upon the Generalized Extreme Value distribution and leads to a better assessment of the exceedance probabilities of rare events at the German Baltic Sea coastline. The water level data of 10 gauges at the German Baltic Sea coastline were investigated. The results point out, that the applied statistical method leads to an improvement of the statistical analyses of storm surges in the Southern Baltic Sea. The investigations refer to present climate state. Possible changes in the hydrologic system due to climate changes have to be investigated in further research activities.

K e y w o r d s

Baltic Sea, storm surge, extreme value statistics, return period, initial water level, water level data, time series

I n h a l t

1. Einleitung und Aufgabenstellung	132
2. Beschreibung der Forschungsaufgabe	132
3. Systembeschreibung Ostsee	133
3.1 Lage und Hydrographie	133
3.2 Isostatik, Eustatik und mittlere Wasserstände	134
3.3 Wasserstände in der Ostsee	135
4. Pegeldaten	135
4.1 Lage und Beschreibung der verwendeten Pegel	135
4.2 Historische Extremwerte	137
5. Analyse der Vorfüllung der Ostsee	140
6. Methodik der Extremwertstatistik	142
7. Datenauswertungen	143
7.1 Modellierte Extremereignisse	143
7.2 Vorbemerkungen zu den Pegelauswertungen	145
7.3 Flensburg	146
7.4 Eckernförde	147
7.5 Kiel-Holtenau	149
7.6 Neustadt i.H.	150
7.7 Travemünde	151
7.8 Wismar	153
7.9 Warnemünde	154
7.10 Stralsund	155
7.11 Sassnitz	156
7.12 Greifswald	157
8. Diskussion der Ergebnisse	158
9. Zusammenfassung	159
10. Schriftenverzeichnis	160

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Extreme Sturmflutereignisse gefährden sowohl die deutsche Nordsee- als auch die Ostseeküste. Dabei sind die Küstengebiete aufgrund der intensiven Nutzung in der Regel sehr anfällig gegenüber solchen Ereignissen. Der Küstenschutz orientiert sich daher maßgeblich an extremen Ereignissen, wobei zum einen ein möglichst hohes Schutzniveau erreicht werden soll, zum anderen jedoch auch ökologische, ökonomische und touristische Ansprüche berücksichtigt werden müssen. Ein Schutz der Küsten gegen jede erdenklich hohe Sturmflut ist nicht möglich, womit bei allen Maßnahmen zugleich ein Restrisiko verbleibt, welches quantifiziert werden muss. Dies kann durch die detaillierte Analyse der Sturmflutereignisse und Zuordnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten erfolgen.

Dem Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen oblag im KFKI-Verbundprojekt „Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der deutschen Ostseeküste (MUSTOK)“ die Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten von Sturmflutereignissen. Dabei wurden neben den beobachteten Wasserstandsdaten auch historische Extremereignisse und von den Projektpartnern berechnete synthetische Sturmflutereignisse in die Analysen mit einbezogen.

2. Beschreibung der Forschungsaufgabe

Die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen stellt eine Grundaufgabe der Hydrologie dar. Für Bemessungsaufgaben im Küsteningenieurwesen sind insbesondere die Eintrittswahrscheinlichkeiten von extrem hohen oder niedrigen Wasserstands-

ereignissen von Bedeutung. Dies wird durch eine Anwendung von extremwertstatistischen Methoden erreicht, wobei häufig Wahrscheinlichkeitsaussagen zu Wasserständen getroffen werden sollen, die bisher noch nicht eingetreten sind. Die ermittelte Extremwertverteilung muss demzufolge extrapoliert werden. Grundsätzlich basieren alle bekannten extremwertstatistischen Methoden auf der Analyse von beobachteten Daten. Um die Extrapolation der Verteilungsfunktionen nicht nur mathematisch, sondern auch physikalisch zu begründen, können neben den regelmäßig aufgezeichneten Wasserständen auch historische Sturmfluten oder über numerische Modelle berechnete Extremereignisse in die Statistik mit einbezogen werden. Die vorliegende Forschungsaufgabe bestand darin, für die deutsche Ostseeküste eine entsprechende Methodik zu entwickeln, mit der beobachtete Daten, historische Wasserstandsmarken und modellierte Extremereignisse in die Extremwertstatistik integriert werden können (Abb. 1), um eine verlässlichere Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten zu erreichen.

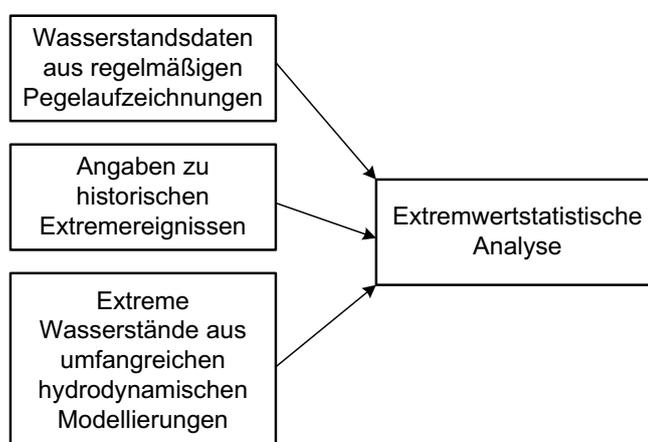


Abb. 1: Verwendete Datengrundlagen für die Extremwertstatistik

Die vorliegenden Untersuchungen basieren im Wesentlichen auf beobachteten und historischen Wasserständen, die von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) des Bundes zu Verfügung gestellt wurden, und auf numerischen Modelluntersuchungen, die im Rahmen des Projektes durchgeführt wurden (SCHMITZ, 2007; BENKEL u. MEINKE, 2008; BORK u. MÜLLER-NAVARRA, 2009). Weiterhin bildeten vorhergehende Arbeiten zu extremen Wasserständen an der deutschen Nordseeküste (JENSEN, 2000; JENSEN et al., 2006) eine wesentliche Grundlage. Detailliertere Ausführungen der hier vorgestellten Arbeiten sind dem Abschlussbericht des Forschungsvorhabens zu entnehmen, welcher im Internet als Download zur Verfügung steht (MUDERSBACH u. JENSEN, 2009).

3. Systembeschreibung Ostsee

3.1 Lage und Hydrographie

Die heutige Ostsee hat eine Fläche von ca. 415.000 km² (einschl. Kattegat) und eine Tiefe von bis zu 459 m (Landsortief, südlich Stockholm), wobei die mittlere Tiefe etwa 52 m beträgt. Das Volumen wird mit ca. 22.000 km³ beziffert und ist nur über Belte und Sunde indirekt über die Nordsee mit dem Atlantischen Ozean verbunden und gilt daher

als kleines, intrakontinentales Nebenmeer des Atlantischen Ozeans (HUPFER et al., 2003).

Die Salinität der Ostsee nimmt von Westen nach Nordosten ab; im Skagerrak und Kattegat sind Salzgehaltswerte von 25 PSU (2,5 %) zu finden, im nordöstlichen Bereich sind demgegenüber lediglich Werte von 3 bis 5 PSU (0,3 %–0,5 %) vorhanden. Das Ostseebecken besteht aus einer Reihe von Teilbecken, die durch Schwellen voneinander getrennt sind. Die wesentlichen Becken sind die Mecklenburger Bucht (mittlere Tiefe: 25 m), das Arkonabecken (mittlere Tiefe: 50 m), das Bornholmbecken (mittlere Tiefe: 100 m), das Gotlandbecken (mittlere Tiefe: 230 m) und der Bottnische Meerbusen (mittlere Tiefe: 120 m). Eine besondere hydrographische Bedeutung für die südwestliche Ostsee hat die Darßer Schwelle, die einen sprunghaften Höhenwechsel im Bodenprofil darstellt und nördlich von Rostock liegt. Die Darßer Schwelle stellt die Trennung zwischen Belt und Arkonabecken dar. Die wesentlichen Zuflüsse der Ostsee sind die Oder (Deutschland, Polen), Weichsel (Polen), Memel (Litauen, Russland), Düna (Lettland), Newa (Russland) und Torneälven (Schweden).

3.2 Isostatik, Eustatik und mittlere Wasserstände

Nach MEYER (2002) beginnt die Geschichte der Ostsee ca. 13.000 BP (Before Present). Die Entwicklung des Meeresspiegels ist ab ca. 8.000 BP durch einen schnellen Anstieg des Meeresspiegels gekennzeichnet, welcher als Littorina-Transgression bezeichnet wird. Während dieser Phase waren Anstiegsraten des Meeresspiegels von bis zu 2,5 cm/Jahr vorhanden, was zu einem „Ertrinken“ der Küste führte (MEYER, 2002). Die nördliche Ostsee ist dagegen bis in die Gegenwart durch anhaltende Regression gekennzeichnet. Diese unterschiedliche Entwicklung spiegelt sich in gegenläufigen typischen Meeresspiegelkurven für die südliche und östliche Ostsee wieder (Abb. 2).

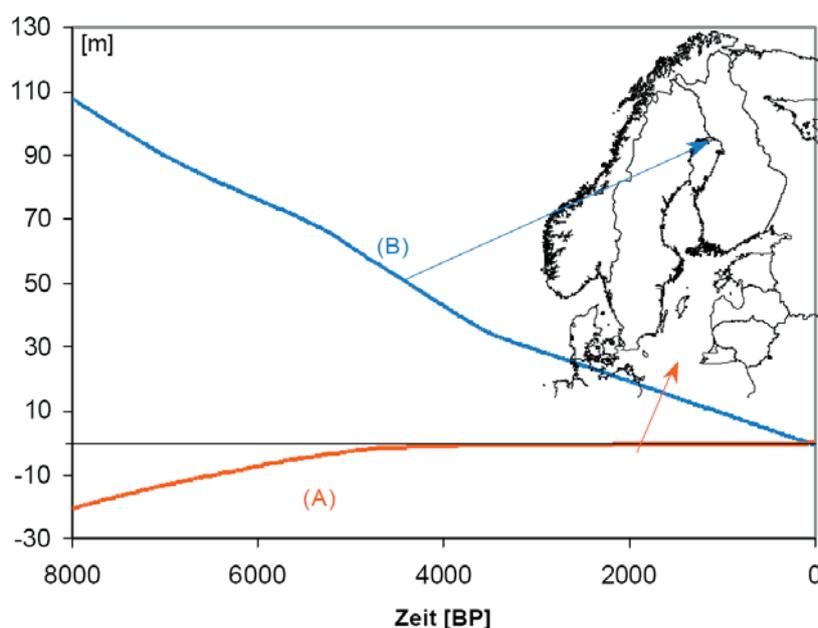


Abb. 2: Vergleich typischer Relativ Sea Level (RSL)-Kurven aus dem südlichen (A) und nördlichen (B) Teil der Ostsee (MEYER, 2002)

Die rezenten Erdkrustenbewegungen des baltischen Raumes sind durch eine Landhebungszone im nördlichen Bereich geprägt, mit maximalen Hebungswerten im nördlichen Bottnischen Meerbusen von über 8 mm/Jahr. Diese Hebungszone ist von einer Landsenkungszone gürtelartig umgeben, welche die südliche und südöstliche Ostsee beeinflusst (HUPFER et al., 2003). In der Senkungszone sind im Mittel Werte von $-0,5$ bis $-1,0$ mm/Jahr zu finden, die auch für die deutsche Ostseeküste gültig sind. In der Danziger Bucht (Polen) sind maximale Senkungswerte von $-3,0$ mm/Jahr zu finden. Durch eine Landhebung oder Landsenkung ergibt sich eine relative Änderung des mittleren Meeresspiegels. Ein Landsenkungsprozess (isostatischer Effekt) führt somit zu einem relativen Meeresspiegelanstieg, der zusätzlich von einem eustatischen Effekt (z.B. Meeresspiegelanstieg durch Temperaturanstieg infolge Klimaänderung) überlagert werden kann. Eine Trennung dieser beiden Einflüsse ist nicht möglich, jedoch können durch verschiedene Annahmen Abschätzungen der isostatischen Effekte erfolgen. HUPFER et al. (2003) analysierten dazu die Differenzen mittlerer Wasserstände von Pegeln in der nördlichen und südlichen Ostsee. Es wird davon ausgegangen, dass sich eustatische Effekte in einer Nord-Süd-Achse gleich ausprägen und damit vorhandene Trends in den ermittelten Differenzen auf isostatische Effekte zurückzuführen sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die Differenzen des mittleren Wasserstandes zwischen Nord und Süd konstant kleiner werden und dies zum überwiegenden Teil auf Landhebungseffekte im Norden zurückzuführen ist.

3.3 Wasserstände in der Ostsee

Die Wasserstände an den Pegeln der Ostsee entstehen aus der Überlagerung verschiedener Anteile. Dies sind (i) der Gezeiteneinfluss, (ii) der Füllungsgrad, (iii) Eigenschwingungen und (iv) Windstauwirkungen. In der vorliegenden Arbeit wurden Pegelwasserstände extremwertstatistisch ausgewertet, in denen alle genannten Anteile enthalten sind. Ausführlichere Hinweise zu Gezeiten in der Ostsee sind z.B. bei SCHMAGER et al. (2008) zu finden. In MUDERSBACH u. JENSEN (2009) sind weitergehende Analysen des Füllungsgrades am schwedischen Pegel Landsort (Abb. 6) durchgeführt worden. Detaillierte Hinweise zu Eigenschwingungen und Windstauwirkungen sind in HUPFER et al. (2003), SCHMITZ (2007) und BORK u. MÜLLER-NAVARRA (2009) enthalten.

4. Pegel daten

4.1 Lage und Beschreibung der verwendeten Pegel

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden 10 Pegel an der schleswig-holsteinischen und mecklenburg-vorpommerschen Ostseeküste hinsichtlich extremer Wasserstände ausgewertet (Abb. 3). An der schleswig-holsteinischen Küste sind dies die Pegel: Flensburg, Eckenförde, Kiel-Holtenau, Neustadt in Holstein und Travemünde. An der Küste Mecklenburg-Vorpommerns sind dies die Pegel: Wismar, Warnemünde, Stralsund, Sassnitz und Greifswald.

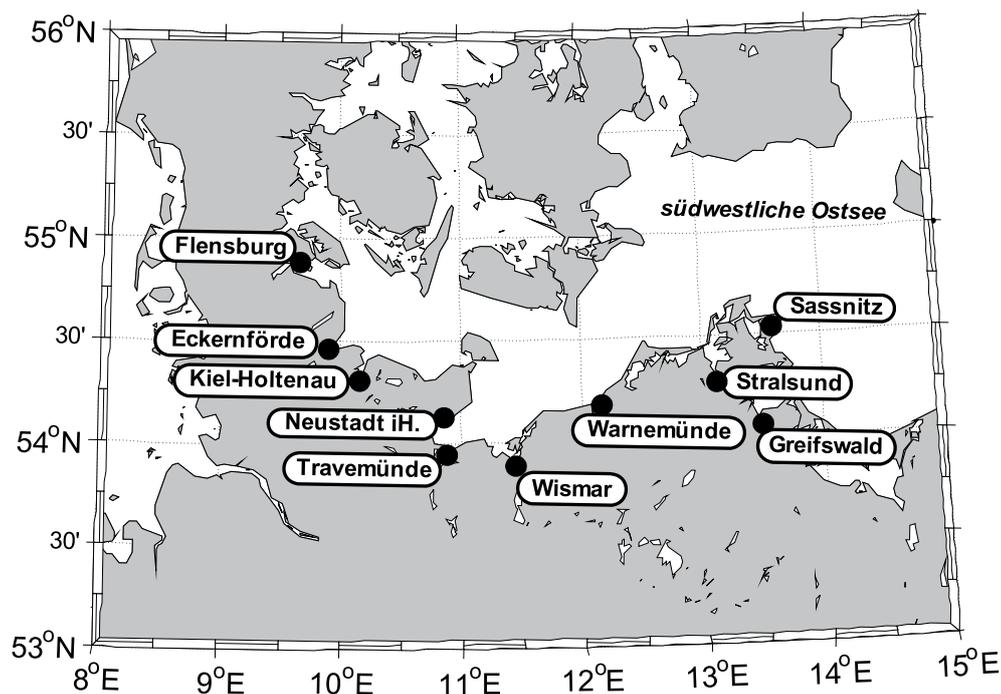


Abb. 3: Standorte der untersuchten Ostseepegel

Die Pegeldata stammen von folgenden Quellen:

- Bundesanstalt für Gewässerkunde (bfg), Koblenz
- Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (MLUR) des Landes Schleswig-Holstein, Kiel
- Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD) Nord, Kiel
- Staatliches Amt für Umwelt und Natur (StAUN), Rostock
- Staatliches Amt für Umwelt und Natur (StAUN), Stralsund
- Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen

Als Datengrundlage standen die regelmäßigen Wasserstandsaufzeichnungen zur Verfügung, die in Form der Jahreshauptwerte analysiert wurden. Die Zeitreihe der Hochwasserereignisse (HW) besteht somit aus dem höchsten Wert eines hydrologischen Jahres. Die Zeitreihe der mittleren Wasserstände (MW) ist der gemittelte Wert aller Messungen eines Jahres an einem Pegel. Vor der Einführung der automatisierten Wasserstandsmessung entspricht dieser Wert dem Wasserstand um 12 Uhr mittags. Die MW-Zeitreihe wird für die direkte Analyse der extremen Wasserstände nicht benötigt, jedoch erfolgt die Homogenisierung der HW-Zeitreihe mit dem Trend bzw. 19-jährigen gleitenden Mittelwert der MW-Zeitreihe. Die MW-Zeitreihe beinhaltet im Vergleich zur HW-Zeitreihe weniger stochastische Anteile. Da durch eine Homogenisierung im Wesentlichen der Einfluss des langfristigen Meeresspiegelanstieges korrigiert werden soll, eignet sich hierfür der Trend der MW-Zeitreihe besser als derjenige der HW-Zeitreihe. Für die Berechnung des langfristigen Trends wird statt der Verwendung eines linearen Modells die Berücksichtigung der Nodaltide mit einer Periode von 18,6 Jahren empfohlen.

Die verfügbaren Zeitreihen der Pegelaufzeichnungen sind an der deutschen Ostseeküste unterschiedlich lang. Die längste Zeitreihe weist der Pegel Travemünde auf, die 1826 beginnt. Die Mehrzahl der Pegelzeitreihen beginnt zwischen 1901 und 1921, wobei die östlichen Pegel

Stralsund und Sassnitz die kürzesten Zeitreihen aufweisen (Abb. 4). Neben den regelmäßigen Wasserstandsdaten liegen für einige Pegel zusätzlich historische Extremwerte vor, die in die Analysen mit einbezogen wurden und hinsichtlich der Abschätzung extremer Zustände wichtige Bausteine innerhalb der Projektbearbeitung darstellten (vgl. Kap. 4.2). In den Daten vorhandene Datenlücken wurden zunächst über Korrelationsrechnungen mit benachbarten Pegeln geschlossen. Alle Wasserstandsdaten wurden weiterhin auf einen einheitlichen Höhenbezug (NN) umgerechnet.

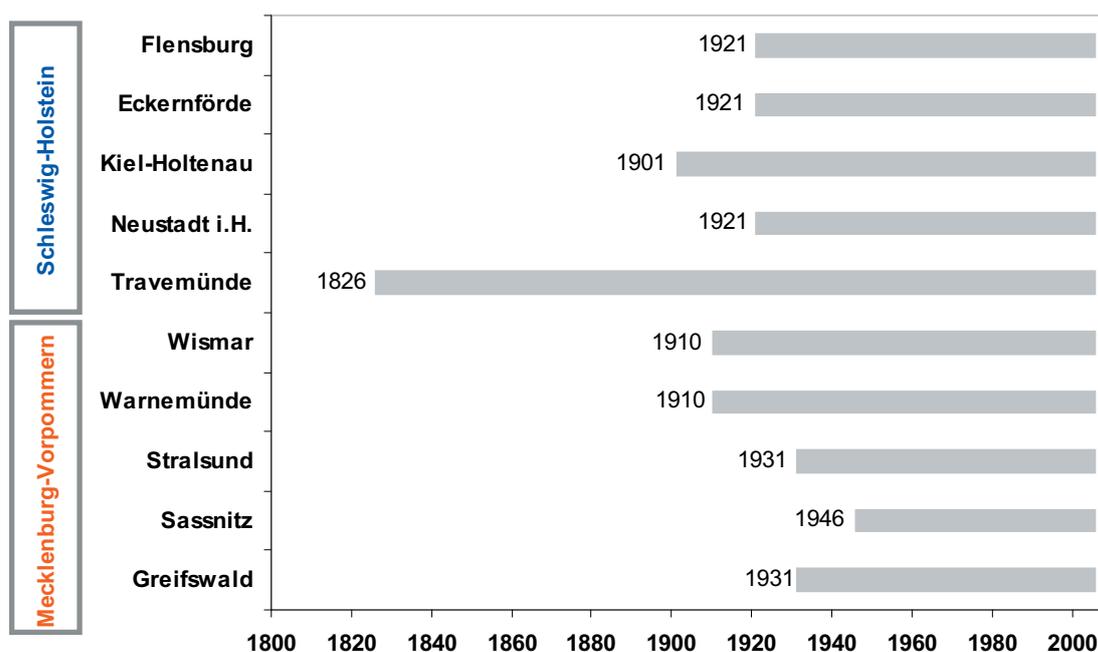


Abb. 4: Verfügbare Zeitreihenlängen der analysierten Ostseepegel

4.2 Historische Extremwerte

Neben der Analyse von beobachteten Pegeldaten ist die Einbeziehung von historischen Daten an der Ostsee von besonderer Bedeutung, um eine statistische Einordnung von extremen Wasserständen (Sturmhochwasserstände) 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 und nur als historisch überlieferter Wert zur Verfügung steht. Die einzige Ausnahme bildet hier der Pegel Travemünde. Weiterhin sind aus der früheren Überlieferung historische Hochwasserstandsmarken an verschiedenen Pegeln bekannt, wo ebenfalls extreme Wasserstände erreicht wurden.

Erste Überlieferungen über extreme Sturmhochwasserstände an der Ostsee stammen aus dem Jahr 1044 n. Chr., danach finden sich Angaben zu Sturmfluten in den Jahren 1304 und 1320 (JENSEN u. TÖPPE, 1986 und 1990). 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 zwi-

schen 2 m und >3 m über dem Mittelwasser gelegen haben. Ab dem 19. Jahrhundert liegen dann für viele Pegel genauere Aufzeichnungen vor; am Pegel Travemünde sogar schon regelmäßige 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 Menschenverluste. So kann es auch vorkommen, dass ein eher niedriger Wasserstand, der aber 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 zu den untersuchten Pegelstandorten erfolgt in Tab. 1.

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. Das Mittelwasser ist in Bezug auf NN-Höhen weder zeitlich noch örtlich eine konstante Größe. Aufgrund des positiven Trends des Mittelwassers zwischen 1 und 1,5 mm/a an den untersuchten Pegeln, liegt das Mittelwasserniveau für zurückliegende Zeiträume 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 (Abb. 5), 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 für diesen Zeitraum näherungsweise als zeitlich konstant angesehen werden kann. Das Mittelwasser für den Zeitraum 1826 bis 1900 liegt ca. 15 cm unter NN, weshalb bei der Umrechnung auf NN-Höhen lediglich eine Korrektur von 15 cm erfolgen müsste.

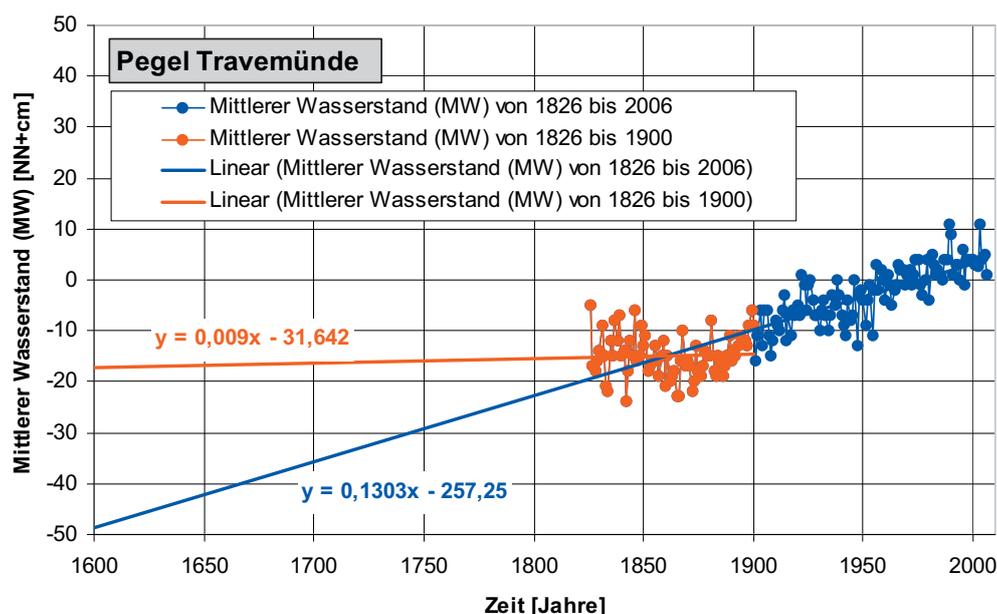


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung des Mittelwassers am Pegel Travemünde von 1826 bis 2006 mit linearen Trends von 1826–1900 und 1826–2006

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. Aufgrund der ohnehin vorhandenen Unsicherheiten von historischen Extremwerten werden diese in der vorliegenden Arbeit über eine vereinfachte generalisierte Mittelwasserentwicklung der Ostsee auf das Jahr 2006 beschickt. Dabei wird angesetzt, dass bis zum Jahr 1850 das Mittelwasser an der gesamten deutschen Ostseeküste 20 cm unter Normalnull lag und von 1850 bis 2006 mit einer Steigung von 1,3 mm/a auf 0 mNN anstieg. (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.) In Tab. 1 sind alle in der ausgewerteten Literatur zur Verfügung stehenden historischen Sturmflutereignisse im Bereich der deutschen Ostseeküste zusammengestellt, wobei zum Teil widersprüchliche Angaben vorhanden sind. Bei widersprüchlichen Angaben wurden die maßgeblichen Werte auf Grundlage von Plausibilitätsbetrachtungen zu benachbarten Pegeln ausgewählt. Die jeweils für die statistischen Analysen verwendeten und auf das Jahr 2006 beschickten Extremwerte sind in Tab. 1 fett hervorgehoben.

Tab. 1: Zusammenfassung der in der Literatur vorhandenen Größenordnungen zu historischen Extremwasserständen an den untersuchten Pegelstandorten

Schleswig-Holstein [Angaben in cm]					
Jahr	Flensburg	Eckernförde	Kiel-Holtenau	Neustadt	Travemünde
1044					210 ü.NN [1] 230 ü.NN *
1304					210 ü.NN [1] 230 ü.NN *
1320					250 ü.NN [1] 320 ü.MW [5] 320 ü.NN *
1625					280 ü.MW [1] 280 ü.NN [2] 287 ü.NMW [3] 280 ü.NN *
1694	270 ü.MW [1] 270 ü.NN [2] 270 ü.NN *				265 ü.NN [1] 285 ü.NN *
1784					260 ü.NN [1] 280 ü.NN *
1835	254 ü.MW [1] 254 ü.NN [2] 254 ü.NN *				regelmäßige Pegelmessungen
1837					regelmäßige Pegelmessungen
1864					regelmäßige Pegelmessungen
1872	327 ü.MW [1] 308 ü.NN [2] 327 ü.NN *	340 ü.MW [1] 315 ü.NN [2] 340 ü.NN *	330 ü.MW [1] 297 ü.NN [2] 330 ü.NN *		regelmäßige Pegelmessungen
1891					regelmäßige Pegelmessungen
1904	233 ü.MW [1] 223 ü.NN [2] 233 ü.NN *		regelmäßige Pegelmessungen		regelmäßige Pegelmessungen
1905			regelmäßige Pegelmessungen		regelmäßige Pegelmessungen
1908	195 ü.MW [1] 157 ü.NN [2] 195 ü.NN *		regelmäßige Pegelmessungen		regelmäßige Pegelmessungen
1914	167 ü.NN [2] 179 ü.NN *		regelmäßige Pegelmessungen		regelmäßige Pegelmessungen

Mecklenburg-Vorpommern					
[Angaben in cm]					
Jahr	Wismar	Wamemünde	Stralsund	Sassnitz	Greifswald
1044					
1304	> 250 ü. MW [5] 250 ü.NN *		> 250 ü. MW [5] 250 ü.NN *		
1320	> 250 ü. MW [5] 250 ü.NN *		> 250 ü. MW [5] 250 ü.NN *		
1625	284 ü.NMW [3] 284 ü.NN *	282 ü.NMW [3] 282 ü.NN *			
1694	284 ü.NMW [3] 284 ü.NN *				
1784					
1835					
1837	204 ü.NMW [3] 204 ü.NN *				
1864			182 ü.NMW [3] 180 ü.NN *		
1872	283 ü.NMW [3] 280 ü.NN [4] 297 ü.NN *	270 ü.NMW [3] 243 ü.NN [4] 270 ü.NN *	250 ü.NMW [3] 239 ü.NN [4] 256 ü.NN *		281 ü.NMW [3] 279 ü.NN *
1891	171 ü.NMW [3] 167 ü.NN [4] 182 ü.NN *	150 ü.NMW [3] 148 ü.NN [4] 163 ü.NN *		147 ü.NMW [3] 144 ü.NN *	
1904				212 ü.NMW [3] 209 ü.NN *	241 ü.NMW [3] 239 ü.NN *
1905	226 ü.NMW [3] 226 ü.NN *	188 ü.NMW [3] 188 ü.NN *	211 ü.NMW [3] 216 ü.NN [4] 229 ü.NN *		
1908					
1914	regelmäßige Pegelmessungen	regelmäßige Pegelmessungen	233 ü.NMW [3] 231 ü.NN *	189 ü.NMW [3] 186 ü.NN *	226 ü.NMW [3] 224 ü.NN *

[1] Jensen, J. und Töppe, A.: Untersuchungen zu Sturmfluten an der Ostsee unter spezieller Berücksichtigung des Pegels Travemünde, DGM 34. 1990, H.1/2

[2] Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein 2001

[3] Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock, pers. Mitteilung, 2007

[4] Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz des Landes Mecklenburg-Vorpommern

[5] DIE KÜSTE, Heft 66 (2003)

[6] WSA Lübeck

* auf das Jahr 2006 beschickter und im Projekt MUSTOK verwendeter Wert

5. Analyse der Vorfällung der Ostsee

Im Forschungsvorhaben MUSTOK ist eine Analyse der Vorfällungen mit dem Ziel durchgeführt worden, deren Größenordnungen anhand aktueller Wasserstandsdaten zu verifizieren. Untersuchungen von BORK u. MÜLLER-NAVARRA (2009) haben ergeben, dass die Vorfällung der Ostsee auf die Entstehung von extremen (!) Wasserständen an der deutschen Ostseeküste keinen signifikanten Einfluss hat. Diese Aussage gilt nicht für mittlere oder leicht erhöhte Wasserstände. Eine gesonderte Berücksichtigung der Vorfällung in der extremwertstatistischen Analyse muss somit nicht erfolgen.

Für die Analyse der Vorfällung eignet sich der Pegel Landsort – südlich von Stockholm (Abb. 6) –, da er sich in etwa im Knotenbereich der am häufigsten auftretenden einknotigen Eigenschwingung befindet, so dass dort der jeweilige Füllungszustand der Ostsee und die eintretenden Volumenänderungen in den Wasserstandsschwankungen günstig widerspiegelt werden (HUPFER et al., 2003).

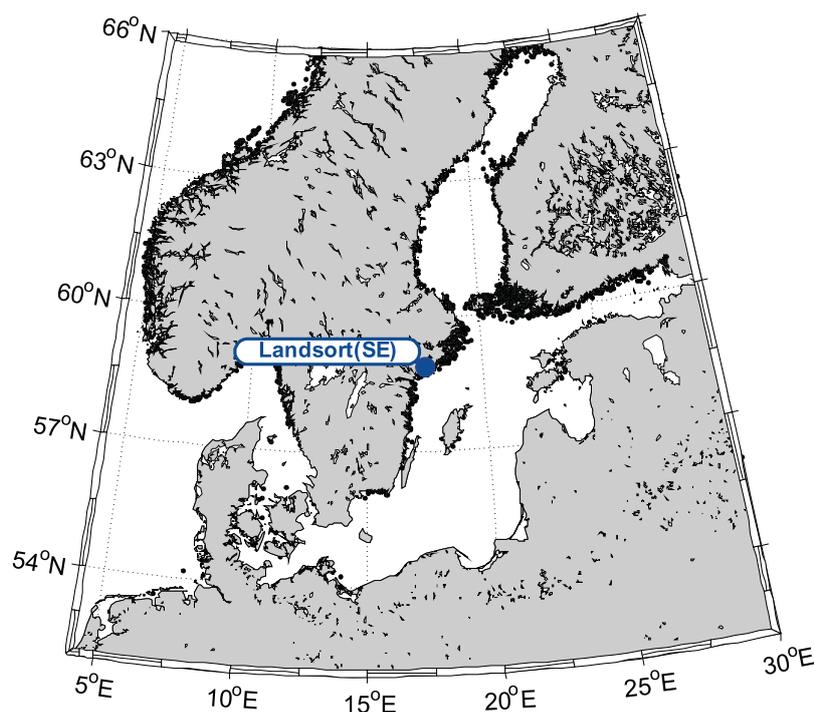


Abb. 6: Lage des Pegels Landsort

Da keine einheitliche Definition des Begriffs Vorfällung der Ostsee existiert, musste diese zunächst im Projekt erfolgen. Nach umfangreicher Literaturrecherche, Abstimmungsgesprächen in der Projektgruppe und Sensitivitätsuntersuchungen wurde eine Vorfällung definiert als eine Wasserstandserhöhung um mindestens 15 cm ü. MW über mehr als 20 Tage 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 3 Wochen) angewendet wurde (Abb. 7). Die Glättung durch einen Tiefpassfilter ist notwendig, damit nicht durch Windeinfluss bedingte kurzzeitige Wasserstandsschwankungen das Ergebnis beeinflussen. In der Zeitreihe von 1886 bis 2006 wurden 145 Vorfällungsereignisse identifiziert, wobei mittlere Wasserstandserhöhungen von 15 cm (per Definition) bis etwa 40 cm erreicht werden. Die Vorfällungsereignisse haben Dauern von 20 Tagen (per Definition) bis hin zu 119 Tagen. Innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeitreihe über 121 Jahre tritt ein Vorfällungsereignis im Mittel 1,2-mal pro Jahr auf und erreicht als Mittelwert über alle Vorfällungsereignisse eine Höhe von 25 cm ü. MW. Eine durchgeführte Korrelation von Dauern und Wasserstandserhöhungen der Vorfällungsereignisse ergibt keine signifikante Korrelation (Korrelationskoeffizient = 23 %), womit kein deterministischer Zusammenhang zwischen der Dauer und der Höhe eines Vorfällungsereignisses abgeleitet werden kann. Mit den vorliegenden Untersuchungen werden frühere Analysen im Wesentlichen bestätigt (z.B. HUBER, 2000).

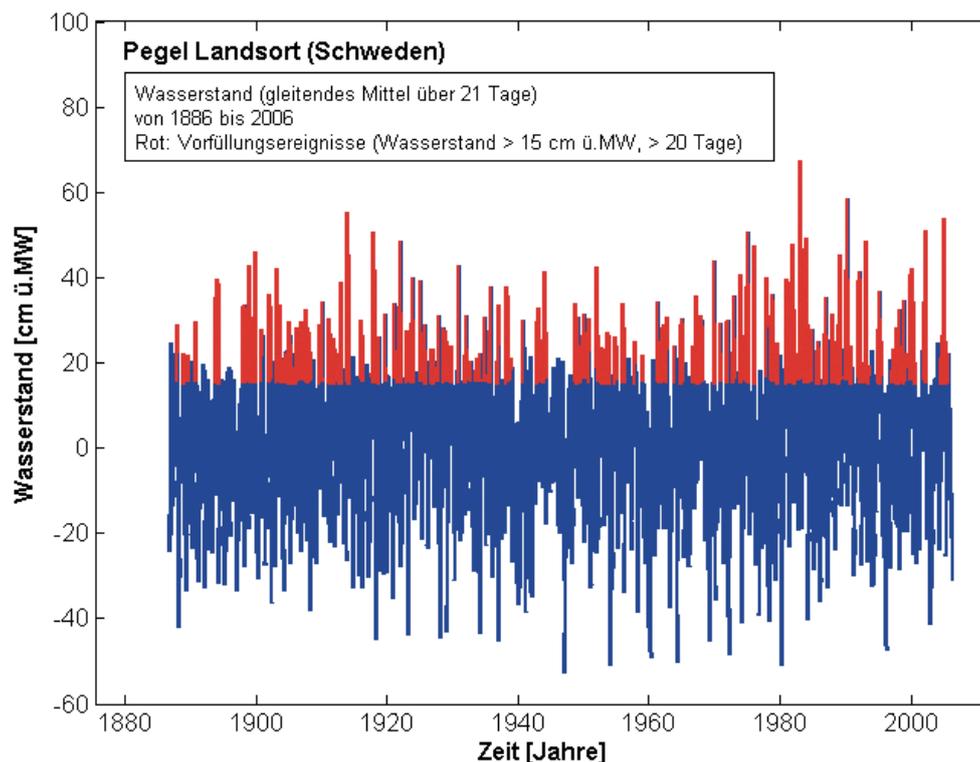


Abb. 7: Analyse der Vorfällungsereignisse am Pegel Landsort auf Basis der gefilterten Wasserstandszeitreihe; in rot sind die vorhandenen Vorfällungsereignisse dargestellt, Definition Vorfällungsereignis: Wasserstand > 15 cm ü. MW und Dauer > 20 Tage

6. Methodik der Extremwertstatistik

Die hier durchgeführte extremwertstatistische Analyse basiert auf der Allgemeinen Extremwertverteilung (engl.: Generalized Extreme Value distribution, GEV), die in den letzten Jahren insbesondere im Bereich der hydrologischen Statistik breite Anwendung findet, da sie verschiedene Klassen von hydrologischen Verteilungsfunktionen in einer Gleichung vereint. Der Vorteil besteht somit darin, im Vorfeld keine Festlegung auf eine bestimmte Klasse der Extremwertverteilungen vornehmen zu müssen. Die GEV basiert auf den Arbeiten von JENKINSON (1955). In den folgenden Jahren wurde die GEV verbreitet angewendet und Verfahren zur Parameterschätzung erarbeitet. Eine ausführliche Zusammenstellung der Arbeiten zur GEV ist in KOTZ u. NADARAJAH (2000) und COLES (2001) zu finden.

Die GEV ist definiert zu:

$$\text{GEV}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} \exp \left[- \left(1 + k \cdot \frac{x-a}{b} \right)^{\frac{1}{k}} \right] & \text{für } 1 + k(x-a)/b > 0 \\ & \text{mit } -\infty < a < \infty, b > 0, -\infty < k < \infty \\ \exp \left[- \exp \left(- \frac{x-a}{b} \right) \right] & \text{für } -\infty < x < \infty, k = 0 \end{array} \right.$$

Die drei Parameter der Allgemeinen Extremwertverteilung sind der Lageparameter a , der Streuungsparameter b und der Krümmungsparameter k . Der Krümmungsparameter k beschreibt maßgeblich die Form des rechten Endes der Verteilungsfunktion. Für den Fall $k > 0$ besitzt die Funktion keinen oberen Grenzwert und entspricht damit dem Typ II der Klasse der Gumbel'schen Extremwertverteilungen. Das rechte Ende der Funktion hat eine auslaufende polynomische Form. Das linke Ende der Verteilungsfunktion ist begrenzt durch $a - (b/k)$. Für $k < 0$ existiert eine obere Grenze der Funktion bei $a - (b/k)$ und definiert somit den Typ III der Gumbel'schen Extremwertverteilungen. Der Spezialfall $k = 0$ führt auf die bekannte Gumbel'sche Extremwertverteilung des Typ I, welche häufig auch nur als Gumbelverteilung bezeichnet wird und in einem doppelt-logarithmierten Wahrscheinlichkeitsplot eine Gerade ergibt. Es existiert ebenfalls kein oberer Grenzwert. Das rechte Ende der Verteilungsfunktion besitzt eine exponentielle Form (KOTZ u. NADARAJAH, 2000).

Anwendungen der GEV finden sich zum Beispiel bei DE HAAN (1990), COLES u. TAWN (1990), COLES (2001) und MUDERSBACH (2009), die sich eingehend mit der Analyse von extremen Wasserständen und extremem Seegang an der Küste beschäftigt haben. Eine Anwendung der GEV auf Sturmhochwasserstände an der deutschen Nordseeküste mit der Berücksichtigung von physikalischen Grenzzuständen ist bei JENSEN et al. (2006) zu finden.

Die extremwertstatistische Extremwertanalyse wurde im Forschungsvorhaben MUSTOK derart erweitert, dass neben den beobachteten Wasserstandsdaten auch historische und modellierte Extremereignisse mit einbezogen werden können. Für die Berücksichtigung von historischen Sturmflutereignissen wurde ein Ansatz nach SCHUMANN (2007) verwendet. Die Implementierung von modellierten Extremwerten erfolgte nach JENSEN et al. (2006). Der entwickelte Ansatz wird im Weiteren als integrierte Extremwertstatistik bezeichnet. Weitere Ausführungen zur Extremwertmethodik sind dem Abschlussbericht des Vorhabens zu entnehmen (MUDERSBACH u. JENSEN, 2009).

7. Datenauswertungen

7.1 Modellierte Extremereignisse

Innerhalb des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden extreme Sturmflutereignisse auf Grundlage theoretisch möglicher Sturmweatherlagen simuliert (SCHMITZ, 2007; BORK u. MÜLLER-NAVARRA, 2009). Der für den jeweiligen Pegel höchste modellierte Wert wird in die statistische Extremwertanalyse mit einbezogen (Abb. 8), wobei diesem Wert eine Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet wird, die sich aus der Gesamtzahl der modellierten Vorhersagestunden ergibt. In den durchgeführten meteorologischen Analysen beträgt die Summe der modellierten Vorhersagestunden 11,8 Mio. (7,5 Mio. + 4,3 Mio.) Stunden (SCHMITZ, 2007); dies entspricht 1347 Jahren. Damit ist der jeweils höchste modellierte Wasserstand an einem Pegel der Höchstwert aus 1347 Jahren und hat somit eine empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeit von $P_U = 1 - 1/1347 = 0,999258/a$.

Die aus den EPS-Wetterlagen (EPS: Ensemble Prediction System des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage, EZMW) modellierten extremsten Wasserstände liegen teilweise unter den auf das Jahr 2006 beschickten Wasserständen von 1872 (Abb. 8). Dieser Sachverhalt wurde im Vorfeld der Untersuchungen nicht erwartet. Offenbar war bei der Sturmflut 1872 eine derart ungünstig wirkende Kombination von sturmflutrelevanten Faktoren gegeben, die sich in keiner der durchgeführten EPS-Simulationen widerspiegelt. Eine eindeutige Klärung und Begründung dieses Umstandes konnte im Rahmen des For-

schungsvorhabens nicht erfolgen. Eine Erklärungsmöglichkeit jedoch ist, dass die Anzahl der EPS-Realisationen nicht groß genug war, um alle ungünstigsten Kombinationen von sturmflutrelevanten Faktoren widerspiegeln zu können. Eine höhere Anzahl von EPS-Realisationen konnte aufgrund von beschränkten Rechnerkapazitäten am EZMW nicht erreicht werden.

Eine weitere im Projekt diskutierte Erklärungsmöglichkeit war, dass der extreme Wasserstand von 1872 durch eine sehr hohe Vorfüllung mit verursacht war. Tatsächlich war eine Vorfüllung zum Zeitpunkt der Sturmflut zu beobachten. Umfangreiche Modellsimulationen haben jedoch ergeben, dass eine Vorfüllung nur einen Einfluss auf mittlere und leicht erhöhte Sturmhochwasserstände hat. Ein Einfluss auf extreme (!) Wasserstände konnte nicht nachgewiesen werden (BORK u. MÜLLER-NAVARRA, 2009). Aufgrund dieser Ergebnisse musste die zweite Erklärungsmöglichkeit verworfen werden.

Da an manchen Pegeln die extremsten Wasserständen aus einer EPS-Simulation resultieren und an anderen Pegeln die Rekonstruktion der Sturmflut von 1872 zu extremsten Wasserständen führt, wurden für alle Pegel beide Extremwerte in die Statistik integriert. Der jeweilige Höchstwert aus den EPS-Simulationen wird mit MAX_{Modell} bezeichnet und derjenige aus der Rekonstruktion von 1872 mit Rea_{1872} . Auch der Reanalysewert von 1872 (Rea_{1872}) erhält in der Extremwertstatistik eine zugeordnete Unterschreitungswahrscheinlichkeit von $P_U = 0,999258/a$, da dieser als Höchstwert aller Realisationen angesehen wird.

In Abb. 8 sind für jeden untersuchten Pegelstandort der auf das Jahr 2006 umgerechnete beobachtete Sturmhochwasserstand von 1872 aufgetragen (soweit verfügbar) und zugleich die Reanalysewerte von 1872 und die jeweiligen Maximalwerte aus den EPS-Simulationen.

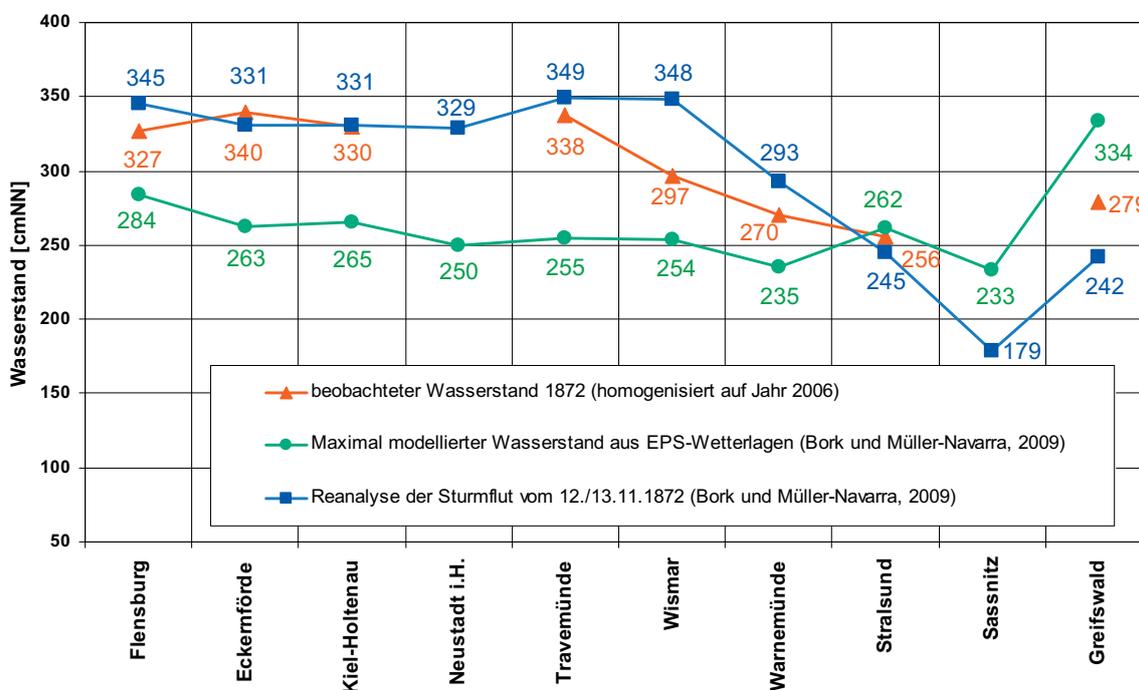


Abb. 8: Vergleich der aus EPS-Wetterlagen maximal modellierten Wasserstände mit Reanalyse- und Beobachtungswerten der Sturmflut von 12./13.11.1872

Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass eine gute bis hinreichende Übereinstimmung der Reanalysewerte mit den beobachteten Wasserständen von 1872 erzielt werden konnte. Zum anderen ist zu sehen, dass die Maximalwerte aus den EPS-Simulationen an den Pegeln Flensburg bis Warnemünde unter den 1872 erreichten Wasserstandsmarken liegen und diese an den Pegeln Stralsund, Sassnitz und Greifswald darüber liegen.

7.2 Vorbemerkungen zu den Pegelauswertungen

Wie in Kap. 6 bereits beschrieben, lag ein Schwerpunkt der statistischen Analysen in der Entwicklung einer Methodik, bei der beobachtete, historische und modellierte Wasserstände in der Extremwertstatistik kombiniert werden können. Zu den Details der Methodik wird auf den Abschlussbericht verwiesen (MUDERSBACH u. JENSEN, 2009). Um eine vergleichende Betrachtung der statistischen Analysen vornehmen zu können, wurden für jeden Pegel verschiedene Varianten berechnet, sodass der Einfluss der einzelnen Zusatzinformationen (historische Daten oder modellierte Wasserstandsdaten) abgeschätzt werden kann. Für die durchgeführten statistischen Analysen wurden lückenlose Zeitreihen der jährlichen Höchstwasserständen benötigt, die jedoch nicht an allen Pegeln verfügbar waren. An den Pegeln vorhandene Datenlücken wurden über Korrelationsberechnungen zu benachbarten Pegeln geschlossen.

An jedem Pegel (außer am Pegel Neustadt i.H.) wurden somit vier Varianten extremwertstatistisch analysiert:

- V1: Es wurden nur die Daten aus der Zeitspanne der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen einer extremwertstatistischen Analyse unterzogen.
- V2: Zusätzlich zur Variante V1 wurden historische Daten mit in die Extremwertstatistik integriert.
- V3: Variante 3 stellt eine weitere Ergänzung zur Variante V2 dar, da der jeweils höchste modellierte Wert (MAX_{Modell}) aus den EPS-Simulationen mit berücksichtigt wurde.
- V4: In Variante 4 wurde statt des Wertes MAX_{Modell} der Reanalysewert der Sturmflut von 1872 (Rea_{1872}) verwendet.

In Abb. 9 ist exemplarisch die extremwertstatistische Auswertung der Variante V4 des Pegels Travemünde dargestellt. Die entsprechenden Grafiken aller untersuchten Pegel für die Varianten V1 bis V4 sind dem Abschlussbericht des Projektes (MUDERSBACH u. JENSEN, 2009) zu entnehmen.

In den folgenden Kapiteln sind die Ergebnisse der vier untersuchten Varianten jeweils zusammenfassend grafisch und tabellarisch für die Jährlichkeiten $T = 100, 200, 500, 1.000, 4.000$ und 10.000 Jahre dargestellt, wobei in den Abbildungen zusätzlich die oberen und unteren 95%-Konfidenzintervalle mit aufgeführt sind.

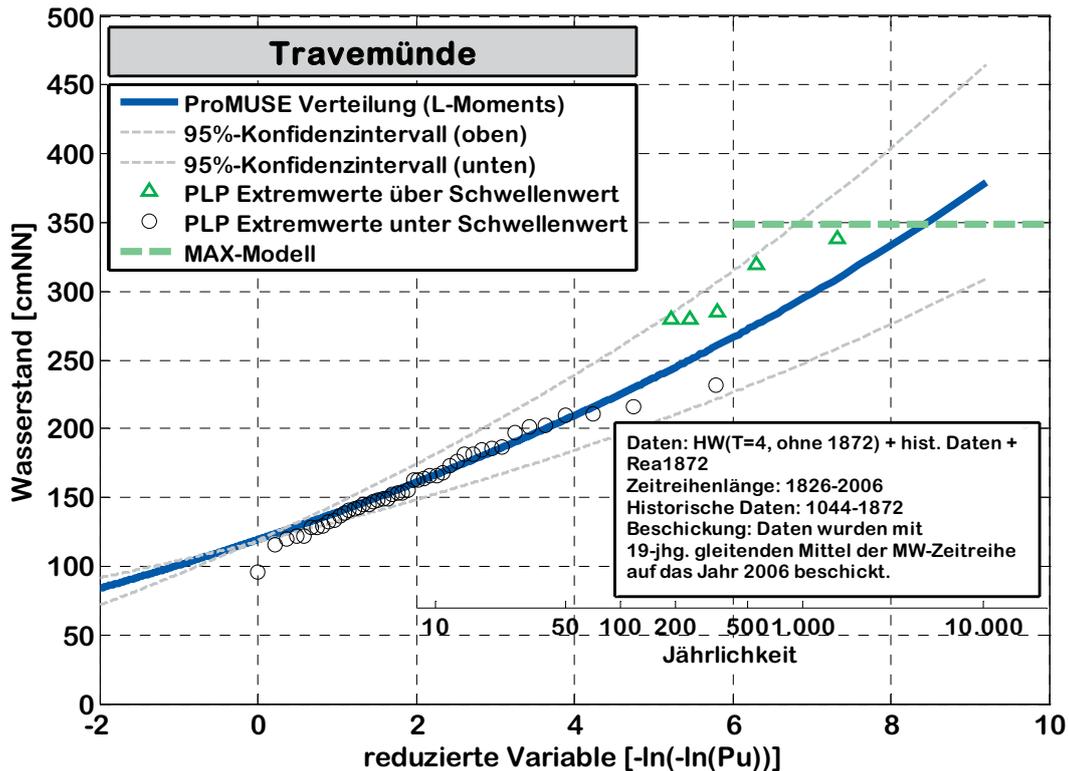


Abb. 9: Extremwertstatistische Auswertung von beobachteten, historischen und modellierten Wasserständen am Pegel Travemünde

7.3 Flensburg

Die Ergebnisse des Pegels Flensburg (Abb. 10 und Tab. 2) zeigen ähnliche Werte für die Varianten V1 und V2 bei allen Jährlichkeiten. Die Ergebnisse der Varianten V3 und V4 liegen im Vergleich dazu signifikant höher. Daraus leitet sich ab, dass die extremwertstatistische Analyse durch die Einbeziehung von historischen Daten am Pegel Flensburg nicht wesentlich beeinflusst wird. Die historischen Ereignisse werden jedoch nicht gut durch die angepasste Extremwertverteilung beschrieben. Dahingegen hat die zusätzliche Berücksichtigung der modellierten Extremereignisse MAX_{Modell} und Rea_{1872} einen signifikanten Einfluss auf die Extremwertanalyse. Grundsätzlich führt die Verwendung des Reanalysewertes Rea_{1872} zu höheren T-jährlichen Werten als die Verwendung des MAX_{Modell} -Wertes. Werden die modellierten Werte mit berücksichtigt, so wird gleichzeitig eine bessere Beschreibung der historischen Daten durch die Extremwertverteilung erreicht.

Für weitere Betrachtungen wird empfohlen, die Ergebnisse aus den Varianten V3 und V4 zu verwenden, womit sich beispielsweise Werte für das 100-jährliche Ereignis von $W_{100} = 224$ bis 233 cm NN ergeben.

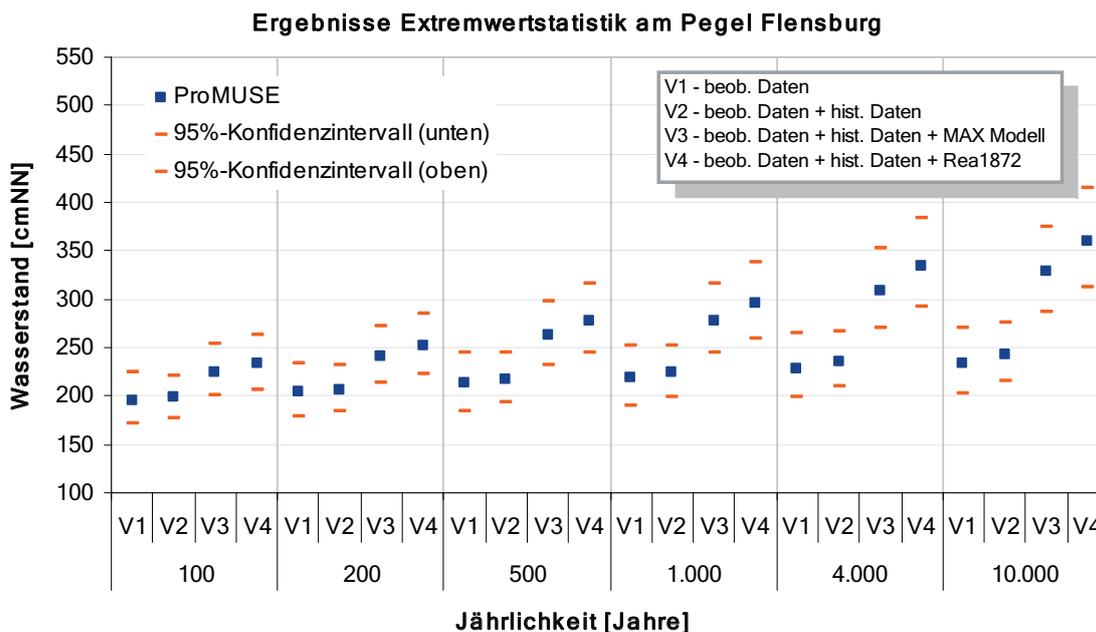


Abb. 10: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Flensburg

Tab. 2: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Flensburg

Flensburg		Wasserstand [cm NN]			
		V1	V2	V3	V4
Eintrittswahrscheinlichkeit P_E [1/a]	Jährlichkeit T [Jahre]	beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea_{1872}
$1 \cdot 10^{-2}$	100	196	198	224	233
$5 \cdot 10^{-3}$	200	204	207	241	252
$2 \cdot 10^{-3}$	500	213	217	262	277
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	218	224	277	296
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	228	236	308	334
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	233	243	328	360

7.4 Eckernförde

Die Ergebnisse am Pegel Eckernförde (Abb. 11 und Tab. 3) zeigen jeweils von Variante V1 zu V4 eine Zunahme der T-jährlichen Wasserstände, wobei die Unterschiede bei den großen Jährlichkeiten (>1000 Jahre) sehr hoch werden. Beispielsweise sind bei den 10.000-jährlichen Ereignissen der Varianten V1 bis V4 Unterschiede von 1,42 m vorhanden. Das berücksichtigte historische Ereignis in der Variante V2 wird nicht hinreichend gut von der Extremwertverteilung beschrieben, jedoch wird dies mit den Varianten V3 und V4 verbessert. Der Nachteil bei der Variante V4 besteht in einer nach oben gekrümmten Extremwertverteilung, die sich somit keinem Wasserstand asymptotisch annähert. Hier besteht zunächst scheinbar

ein Widerspruch in der Analyse, da die aufgetretenen Wasserstände offenbar nur mit einer Form der Extremwertverteilung beschrieben werden können, die physikalisch nicht begründet werden kann, da ein Wasserstand nicht bis ins Unermessliche steigen kann, sondern sich einem maximalen – aber weitgehend unbekanntem – Wasserstand annähern muss. Die nach oben offene Krümmung der Extremwertverteilung führt jedoch nur bei einer weiteren Extrapolation zu physikalisch unrealistischen Wasserständen. Aus diesem Grund ist wichtig anzumerken, dass aus Sicht der Autoren die Extremwertfunktion am Pegel Eckernförde nicht über die hier maximal verwendete Jährlichkeit von 10.000 Jahren hinaus extrapoliert werden sollte.

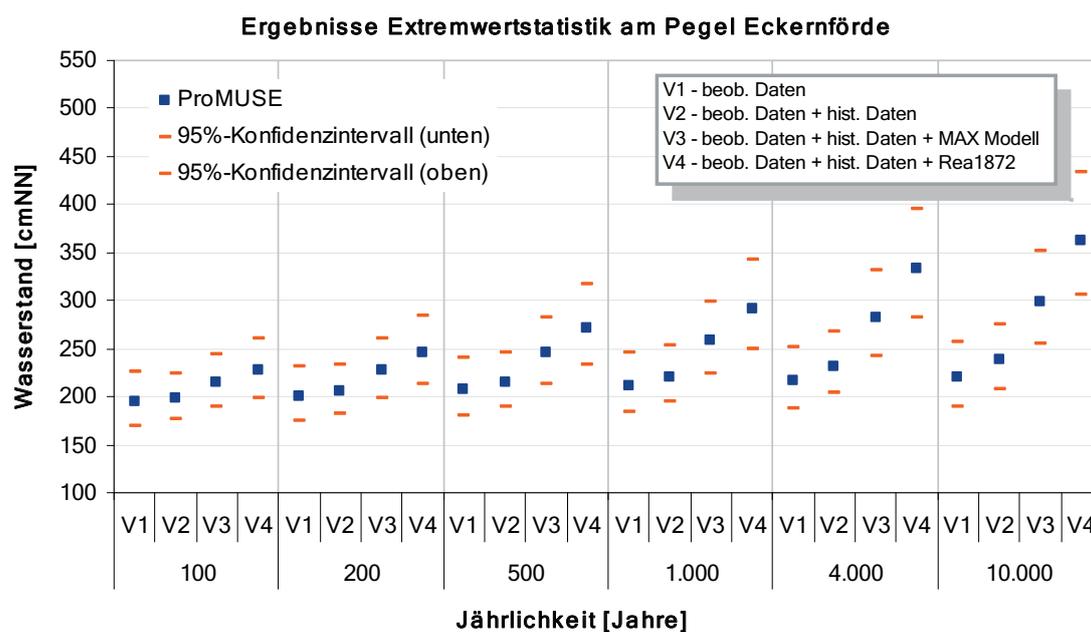


Abb. 11: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Eckernförde

Tab. 3: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Eckernförde

Eckernförde		Wasserstand [cm NN]			
		V1	V2	V3	V4
Eintrittswahrscheinlichkeit P_E [1/a]	Jährlichkeit T [Jahre]	beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea ₁₈₇₂
$1 \cdot 10^{-2}$	100	195	198	214	227
$5 \cdot 10^{-3}$	200	201	206	227	245
$2 \cdot 10^{-3}$	500	208	215	245	271
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	212	221	258	291
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	217	232	283	333
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	220	238	298	362

7.5 Kiel-Holtenau

Die extremwertstatistischen Ergebnisse am Pegel Kiel-Holtenau (Abb. 12 und Tab. 4) zeigen im Vergleich zu den weiter nördlich gelegenen Pegeln Flensburg und Kiel ein anderes Verhalten in Bezug auf die Integration historischer Daten. Während beim 100-jährlichen Ereignis noch alle vier Varianten V1 bis V4 zu vergleichbaren Wasserständen führen, ist ab dem 200-jährlichen Ereignis ein zunehmender Unterschied zwischen der Variante V1 auf der einen Seite und den Varianten V2 bis V4 auf der anderen Seite zu erkennen. Dieser Unterschied ist unter anderem dadurch zu erklären, da für die Varianten V2 bis V4 keine jährlichen, sondern 4-jährliche Extrema verwendet wurden. Mit diesem Ansatz werden insbesondere niedrigere Ereignisse aus dem Datenkollektiv der jährlichen Maxima entfernt. Beispielsweise finden sich im Datensatz der jährlichen Maxima am Pegel Kiel-Holtenau etliche Ereignisse unterhalb von 100 cmNN, welche nicht die Definition einer Sturmflut erfüllen. Bei dem 4-jährlichen Datensatz sind diese Werte nicht mehr enthalten, und es werden damit die extremen Verhältnisse realistischer beschrieben. Die Autoren empfehlen für die Festlegung T-jährlicher Wasserstände am Pegel Kiel-Holtenau die Ergebnisse aus den Varianten V2 bis V4. Dies führt beispielsweise für den 100-jährlichen Wasserstand zu Werten von $W_{100} = 218$ bis 234 cm NN.

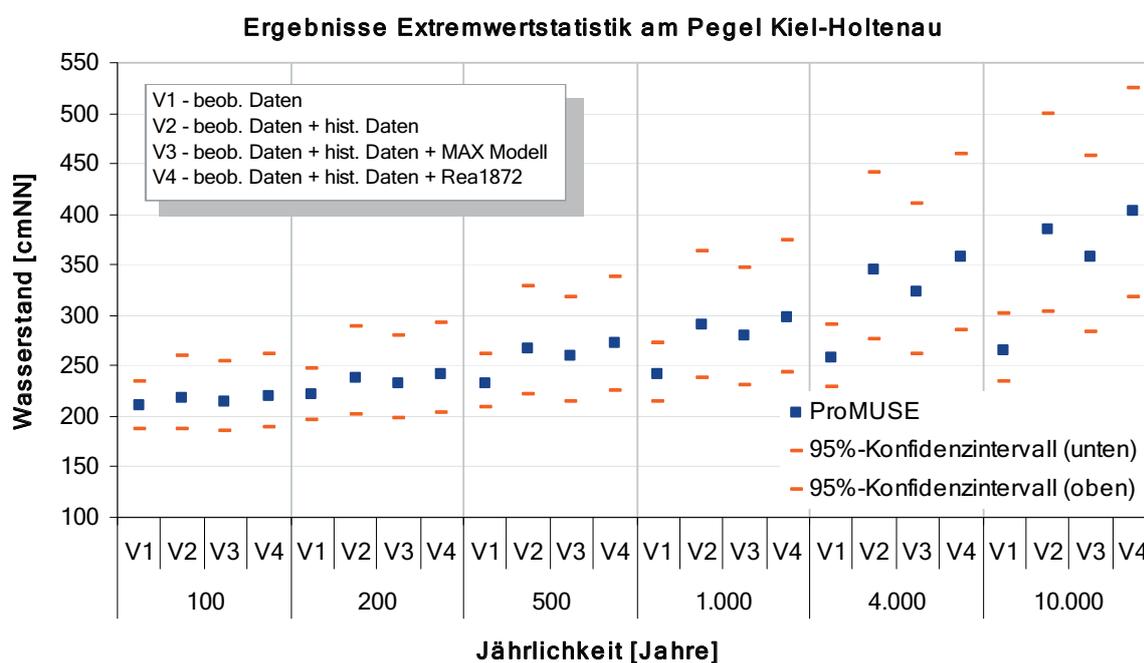


Abb. 12: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Kiel-Holtenau

Tab. 4: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Kiel-Holtenau

Kiel-Holtenau		Wasserstand [cm NN]			
		V1	V2	V3	V4
Eintrittswahrscheinlichkeit P_E [1/a]	Jährlichkeit T [Jahre]	beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea ₁₈₇₂
$1 \cdot 10^{-2}$	100	210	218	215	220
$5 \cdot 10^{-3}$	200	221	238	233	242
$2 \cdot 10^{-3}$	500	233	267	259	273
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	242	291	279	298
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	257	345	324	358
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	266	385	357	403

7.6 Neustadt i. H.

Am Pegel Neustadt i.H. standen keine historischen Daten zu Hochwasserereignissen zur Verfügung, weshalb nur drei Datenkollektive (V1, V3 und V4) extremwertstatistisch ausgewertet werden konnten. Die Ergebnisse in Abb. 13 und Tab. 5 zeigen bei den Varianten V3 und V4 insbesondere bei den höheren Jährlichkeiten eine signifikante Erhöhung der T-jährlichen Ereignisse im Vergleich zur Variante V1. Grundsätzlich werden daher die Ergebnisse der Varianten V3 und V4 für weitere Betrachtungen empfohlen. Dies führt beispielsweise für den 100-jährlichen Wasserstand zu Werten von $W_{100} = 210$ bis 231 cm NN.

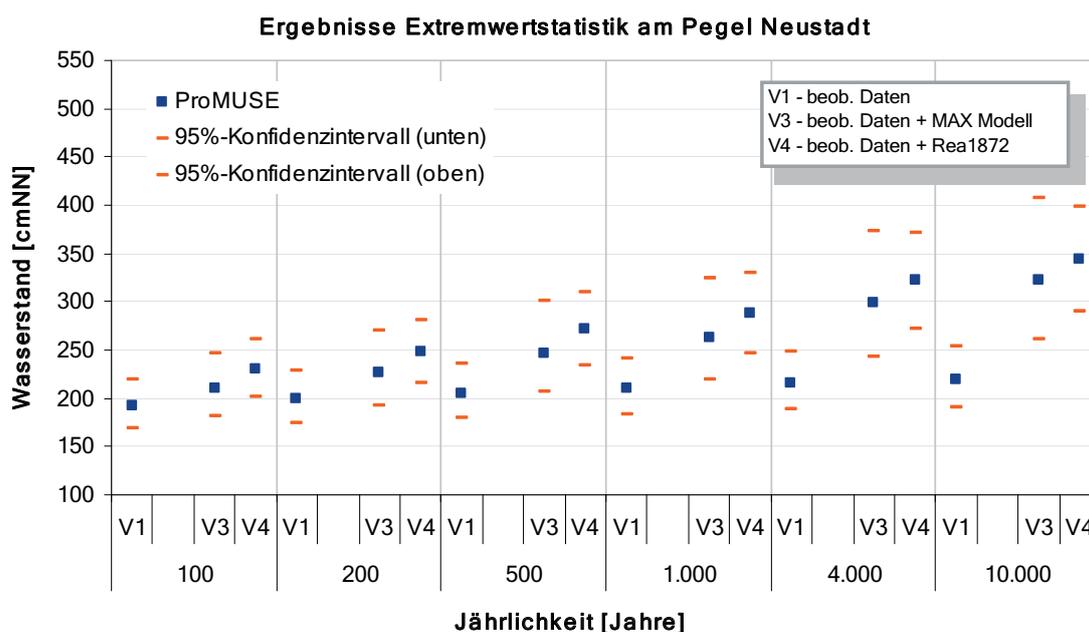


Abb. 13: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Neustadt i.H.

Tab. 5: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Neustadt i.H.

Neustadt		Wasserstand [cm NN]			
		V1	V2	V3	V4
Eintrittswahrscheinlichkeit P_E [1/a]	Jährlichkeit T [Jahre]	beob. Werte		beob. Werte + max. Modellwert	beob. Werte + + Rea_{1872}
$1 \cdot 10^{-2}$	100	192	--	210	231
$5 \cdot 10^{-3}$	200	199	--	226	248
$2 \cdot 10^{-3}$	500	205	--	247	271
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	210	--	263	288
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	216	--	298	322
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	219	--	322	344

7.7 Travemünde

Der Pegel Travemünde (Abb. 14 und Tab. 6) stellt innerhalb aller untersuchten Pegelzeitreihen an der deutschen Ostseeküste eine Besonderheit aufgrund seiner sehr langen Pegelzeitreihe dar. Die regelmäßigen Wasserstandsaufzeichnungen stehen seit 1826 zur Verfügung, womit die Sturmflut von 1872 innerhalb dieses Zeitraumes liegt. Historische Überlieferungen zu extremen Ereignissen reichen sogar zurück bis zum Jahr 1044. Die Problematik der statistischen Auswertung einer beobachteten Zeitreihe mit nur einem sehr extremen Ereignis wird am Pegel Travemünde sehr deutlich. Die Analyse der Variante V1 zeigt, dass das größte Ereignis nicht mit der Extremwertverteilung beschrieben werden kann. Durch die Hinzunahme von weiteren historischen und modellierten Ergebnissen kann dies verbessert werden, wobei auch bei Variante V4 letztlich keine optimale Beschreibung der historischen Daten erreicht werden kann, insgesamt jedoch ein homogeneres Bild im Vergleich zur Variante V1 entsteht. Je nach Variante kann dem Extremereignis von 1872 somit eine Jährlichkeit von etwa 3.000 bis 10.000 Jahren zugeordnet werden. Für die weiteren Betrachtungen werden die Ergebnisse der Variante V4 empfohlen, die sich jedoch erst ab einer Jährlichkeit von etwa 1.000 Jahren signifikant von denjenigen der Variante V1 unterscheiden. Mit der Variante V4 ergibt sich für den auf das Jahr 2006 korrigierte Wasserstand der Sturmflut von 1872 (338 cm NN) eine Jährlichkeit von etwa 3400 Jahren.

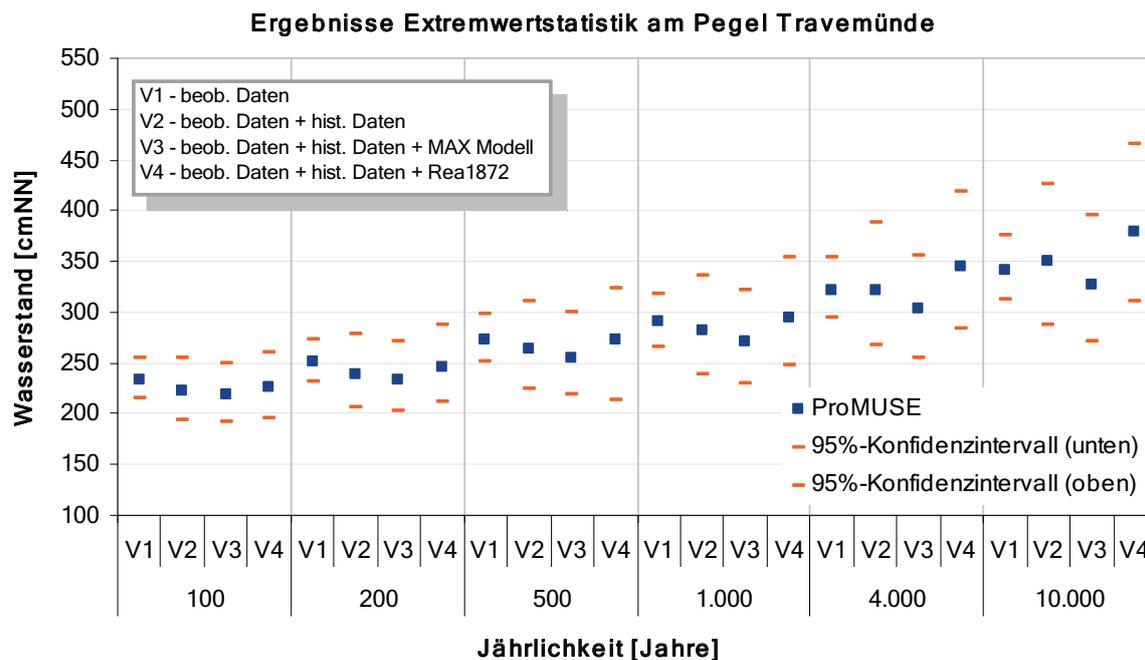


Abb. 14: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Travemünde

Tab. 6: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Travemünde

Travemünde		Wasserstand [cm NN]			
		V1	V2	V3	V4
Eintrittswahrscheinlichkeit P_E [1/a]	Jährlichkeit T [Jahre]	beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea ₁₈₇₂
$1 \cdot 10^{-2}$	100	234	222	218	226
$5 \cdot 10^{-3}$	200	251	239	234	245
$2 \cdot 10^{-3}$	500	273	263	255	273
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	290	282	271	295
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	322	322	304	344
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	342	350	327	379

7.8 W i s m a r

Die Ergebnisse des Pegels Wismar sind in Abb. 15 und Tab. 7 zusammenfassend dargestellt. Bei der Betrachtung aller vier berechneten Varianten fällt auf, dass sowohl die Varianten V1 und V3 als auch die V2 und V4 zu ähnlichen Ergebnissen führen. Dass die Variante V3 in etwa gleiche Ergebnisse wie V1 liefert, ist in dem relativ niedrigen MAX_{Modell} -Wert begründet. Durch die Varianten V2 und V4 wird eine gute Beschreibung der beobachteten, historischen und modellierten Werte erreicht, weshalb diese Ergebnisse auch für weitergehende Betrachtungen empfohlen werden. Dies führt beispielsweise für den 100-jährlichen Wasserstand zu Werten von $W_{100} = 230$ bis 232 cm NN.

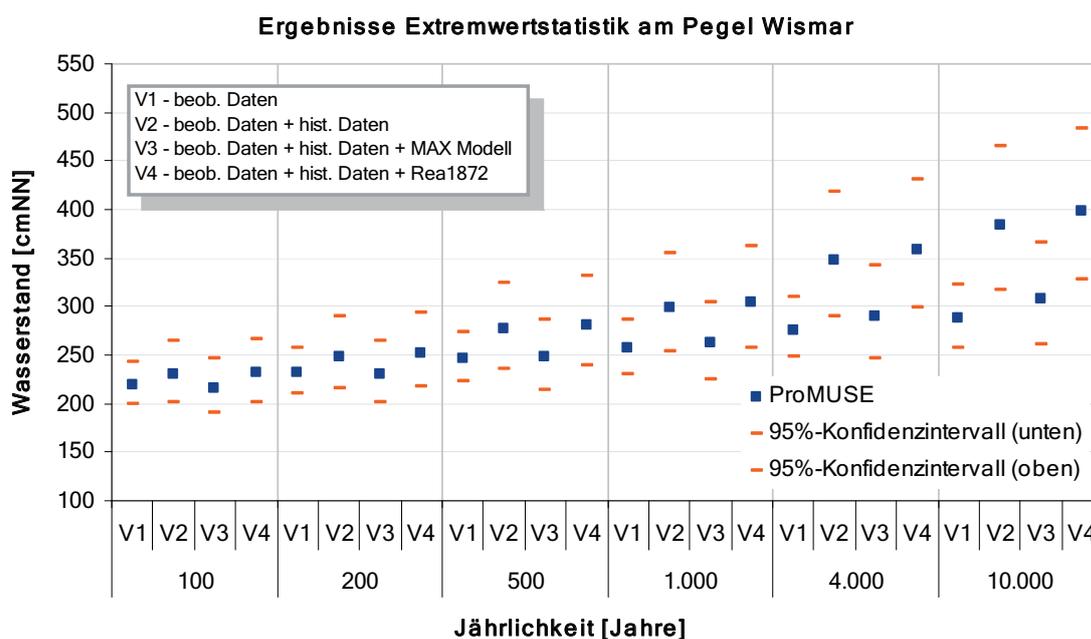


Abb. 15: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Wismar

Tab. 7: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Wismar

Wismar		Wasserstand [cm NN]			
Eintrittswahrscheinlichkeit P_E [1/a]	Jährlichkeit T [Jahre]	V1 beob. Werte	V2 beob. Werte + hist. Daten	V3 beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	V4 beob. Werte + hist. Daten + Rea ₁₈₇₂
$1 \cdot 10^{-2}$	100	220	230	216	232
$5 \cdot 10^{-3}$	200	232	249	230	252
$2 \cdot 10^{-3}$	500	247	277	248	281
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	257	299	262	305
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	276	348	289	358
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	288	384	308	398

7.9 Warnemünde

Die extremwertstatistischen Analysen am Pegel Warnemünde (Abb. 16 und Tab. 8) zeigen für die Variante V4 signifikant höhere Wasserstandswerte als die Varianten V1 bis V3. Auch am Pegel Warnemünde liegt der maximal modellierte Wasserstandswert MAX_{Modell} unterhalb des 1872 aufgetretenen Wertes. Hieraus resultiert, dass die Variante V3 im Vergleich zur Variante V4 deutlich niedrigere Werte liefert. Die Extremwertverteilung in Variante V4 beschreibt sowohl die beobachteten als auch die historischen und modellierten Werte gut. Aus den vorliegenden Untersuchungen werden daher die Ergebnisse der Variante V4 für weitergehende Betrachtungen empfohlen. Dies führt beispielsweise für den 100-jährlichen Wasserstand zu einem Wert von $W_{100} = 197$ cm NN.

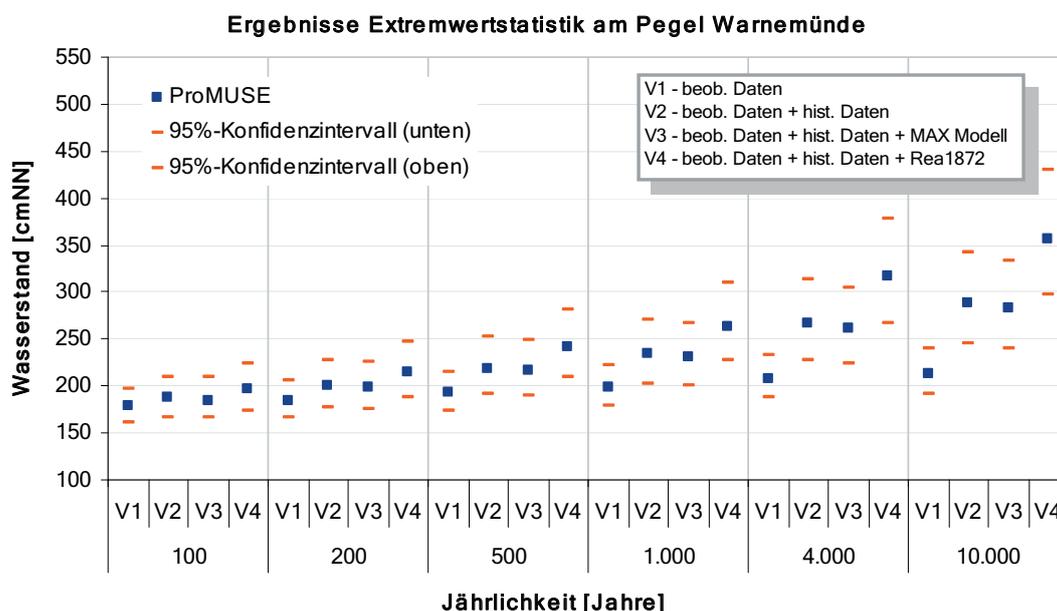


Abb. 16: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Warnemünde

Tab. 8: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Warnemünde

Warnemünde		Wasserstand [cm NN]			
		V1	V2	V3	V4
Eintrittswahrscheinlichkeit P_E [1/a]	Jährlichkeit T [Jahre]	beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea ₁₈₇₂
$1 \cdot 10^{-2}$	100	178	187	185	197
$5 \cdot 10^{-3}$	200	185	200	198	215
$2 \cdot 10^{-3}$	500	193	219	216	242
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	199	234	230	264
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	208	266	261	317
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	213	289	282	357

7.10 Stralsund

Am Pegel Stralsund (Abb. 17 und Tab. 9) werden die historischen Sturmflutereignisse in der Variante V2 nur unzureichend durch die Extremwertverteilung beschrieben, was durch die Hinzunahme der modellierten Extremwerte (V3 und V4) deutlich verbessert werden kann. Darüber hinaus führen die beiden letztgenannten Varianten zu gleichwertigen Ergebnissen, so dass grundsätzlich die Ergebnisse der Varianten V3 und V4 für weitergehende Betrachtungen empfohlen werden. Dies führt beispielsweise für den 100-jährlichen Wasserstand zu W₁₀₀ = 179 bis 182 cm NN.

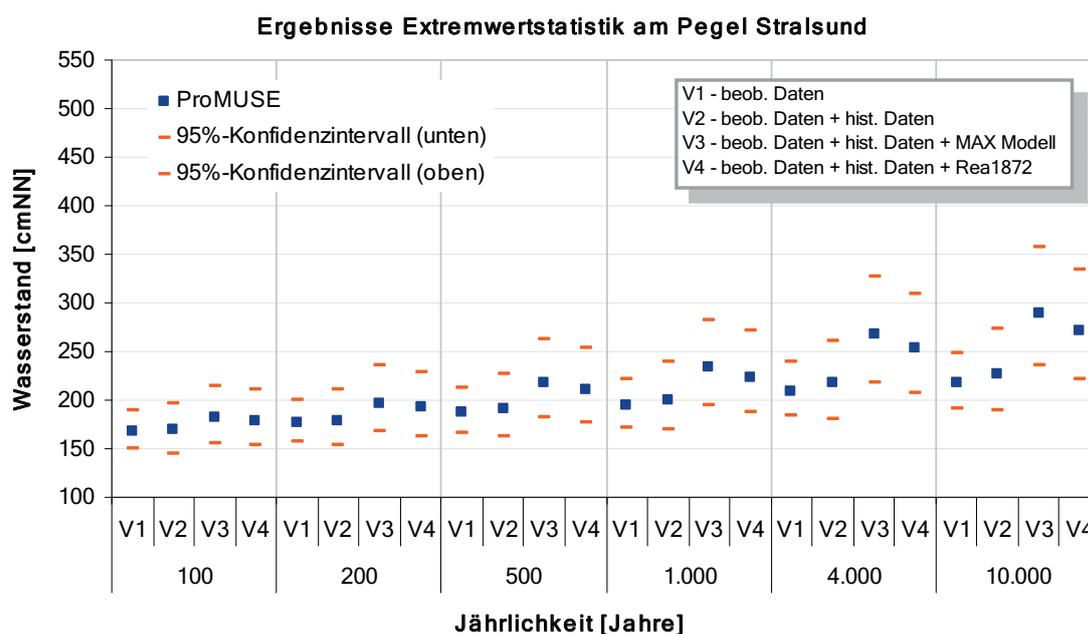


Abb. 17: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Stralsund

Tab. 9: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Stralsund

Stralsund		Wasserstand [cm NN]			
Eintrittswahrscheinlichkeit P_E [1/a]	Jährlichkeit T [Jahre]	V1	V2	V3	V4
		beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea ₁₈₇₂
$1 \cdot 10^{-2}$	100	168	169	182	179
$5 \cdot 10^{-3}$	200	177	179	197	193
$2 \cdot 10^{-3}$	500	188	191	218	211
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	195	200	234	224
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	209	217	267	253
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	218	227	289	271

7.11 Sassnitz

Am Pegel Sassnitz (Abb. 18 und Tab. 10) konnte ein maximaler Wert MAX_{Modell} modelliert werden, der signifikant über dem 1872 aufgetretenen Wasserstand liegt. Dies führt dazu, dass die Variante V3 zu höheren T-jährlichen Wasserständen führt als die Varianten V1, V2 und V4. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Variante V2 den implementierten historischen Wert nicht gut erfasst, so dass grundsätzlich die Ergebnisse der Variante V3 für weitergehende Betrachtungen empfohlen werden können, womit sich beispielsweise für den 100-jährlichen Wasserstand ein Wert von $W_{100} = 163$ cm NN ergibt.

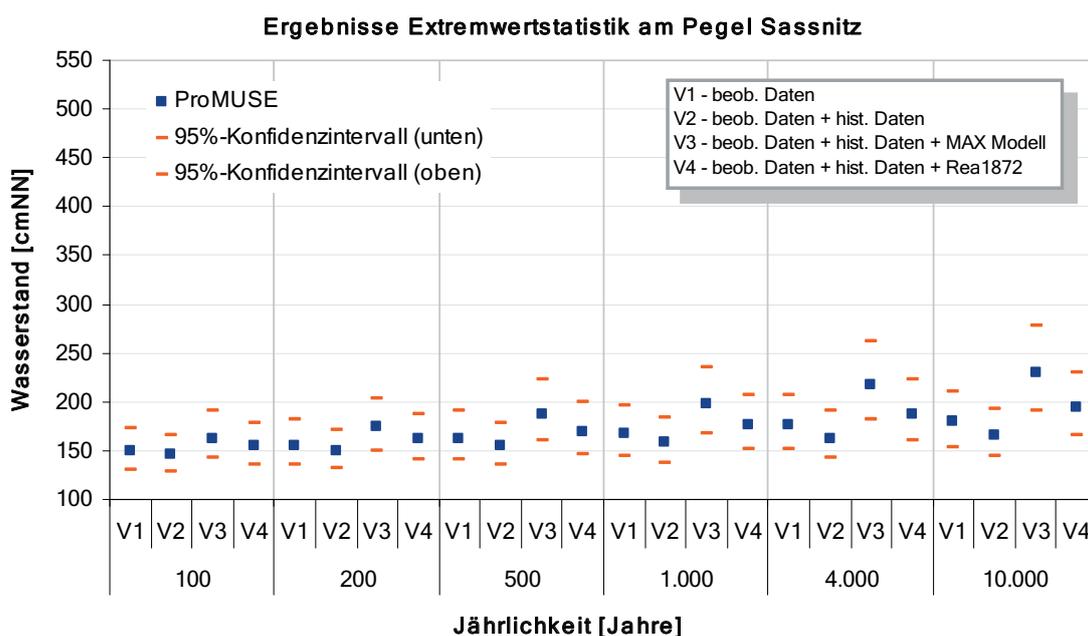


Abb. 18: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Sassnitz

Tab. 10: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Sassnitz

Sassnitz		Wasserstand [cm NN]			
		V1	V2	V3	V4
Eintrittswahrscheinlichkeit P_E [1/a]	Jährlichkeit T [Jahre]	beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea ₁₈₇₂
$1 \cdot 10^{-2}$	100	150	146	163	155
$5 \cdot 10^{-3}$	200	156	150	174	162
$2 \cdot 10^{-3}$	500	163	155	187	170
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	168	158	197	177
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	176	163	217	187
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	180	166	229	194

7.12 Greifswald

Der Pegel Greifswald (Abb. 19 und Tab. 11) zeigt ein qualitativ sehr ähnliches Verhalten zum Pegel Sassnitz. Auch hier konnte ein MAX_{Modell} -Wert modelliert werden, der deutlich über dem Ereignis von 1872 liegt. Dementsprechend führt auch beim Pegel Greifswald die Variante V3 zu den höchsten T-jährlichen Wasserständen, weshalb analog zum Pegel Greifswald die Ergebnisse der Variante V3 für weitergehende Betrachtungen empfohlen werden können. Hiermit ergibt sich beispielsweise für den 100-jährlichen Wasserstand ein Wert von $W_{100} = 204$ cm NN.

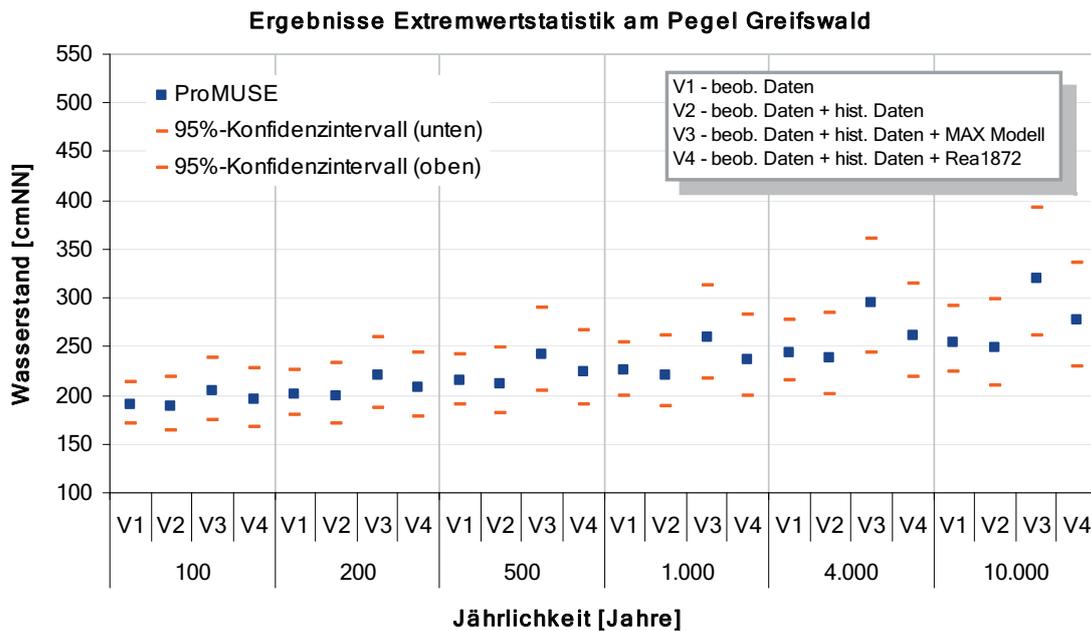


Abb. 19: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Greifswald

Tab. 11: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Greifswald

Greifswald		Wasserstand [cm NN]			
		V1	V2	V3	V4
Eintrittswahrscheinlichkeit P_E [1/a]	Jährlichkeit T [Jahre]	beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea ₁₈₇₂
$1 \cdot 10^{-2}$	100	190	188	204	195
$5 \cdot 10^{-3}$	200	201	199	220	208
$2 \cdot 10^{-3}$	500	215	212	242	224
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	225	221	260	237
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	243	238	295	261
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	255	249	320	277

8. Diskussion der Ergebnisse

Eine Grundaufgabe der hydrologischen Extremwertstatistik besteht darin, Aussagen zu Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen abzuleiten, die bisher noch nicht aufgetreten sind. Häufig liegen Datenreihen aus einer Beobachtungszeitspanne von 50 bis 100 Jahren vor, in seltenen Fällen auch darüber. Aus den empirischen Wahrscheinlichkeiten ergibt sich, dass Ereignisse mit einem mittleren Wiederkehrintervall (Jährlichkeit) von 50 bis 100 Jahren direkt abgeleitet werden können. Diese Wiederkehrintervalle sind jedoch für viele Bemessungsfragen zu gering. Im Bereich des Küsteningenieurwesens ist davon auszugehen, dass zukünftig für die Festlegung von Bemessungswasserständen auch eine Größenordnung von Extremwasserständen mit mittleren Wiederkehrintervallen von bis zu 10.000 Jahren angegeben werden muss.

Die Verteilungsfunktionen müssen demnach über den Bereich der Beobachtungswerte hinaus extrapoliert werden. Nach DVWK (1999) ist eine Extrapolation bis zum 2,5- bis 3-fachen des Beobachtungszeitraumes zulässig. PUGH (2004) gibt eine zulässige Extrapolation bis zum 4-fachen des Beobachtungszeitraumes an. HAWKES et al. (2008) geben einen Überblick über stationäre Verfahren der Extremwertstatistik und diskutieren das Problem, wie aus hydrologischen Messungen über einige Jahrzehnte Bemessungsereignisse mit mittleren Wiederkehrintervallen von 1.000 bis 10.000 Jahren ermittelt werden können. Hierzu geben sie Empfehlungen hinsichtlich der zu verwendenden Verteilungsfunktionen und Parameterschätzungen, jedoch wird keine Einschränkung zur Extrapolationslänge vorgenommen. In STEDINGER et al. (1993) sind ebenfalls keine Angaben zu maximalen Extrapolationslängen vorhanden, wenngleich auf wachsende Unsicherheiten bei zunehmender Extrapolationslänge hingewiesen wird.

Für die in der Literatur angegebenen Beschränkungen des Extrapolationszeitraumes finden sich keine theoretisch begründeten Ansätze. Vielmehr basieren sie auf der Tatsache, dass bei der Verwendung unterschiedlicher Verteilungsfunktionen eine große Divergenz in den Ergebnissen auftritt, die über dem zulässigen Extrapolationszeitraum liegen. Die Extrapolation über den Bereich der beobachteten Daten hinaus kann entscheidend verbessert werden, wenn zusätzliche Informationen über extreme Ereignisse vorliegen und diese in die Extremwertstatistik integriert werden können. Solche zusätzlichen Informationen können historische Ereignisse sein, die vor Beginn der systematischen Aufzeichnungen stattgefunden haben und aufgrund ihrer besonderen Folgen (großflächige Überschwemmungen, starke Schäden) überliefert sind. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Extremwertstatistik ist die Einbeziehung physikalischer Grenzzustände, wie beispielsweise extreme simulierte Wasserstände.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass durch die Einbeziehung von weiteren Hochwasserinformationen im Vergleich zur alleinigen Analyse der aufgezeichneten Wasserstände signifikante Unterschiede in den Ergebnissen entstehen können. Wie in Kap. 7 dargestellt, lassen sich historische Extremereignisse durch die alleinige Auswertung der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen häufig nicht hinreichend gut statistisch beschreiben. Durch die angewendete integrierte Extremwertstatistik wird eine homogenere Beschreibung von beobachteten, historischen und modellierten Extremwasserständen erreicht. Insofern ist diese Methodik als eine Verbesserung im Hinblick auf die statistischen Ergebnisse zu bewerten. Dabei ist jedoch auch zu beachten, dass sowohl die historischen, als auch die modellierten Extremereignisse Unsicherheiten beinhalten. Die Genauigkeit von historischen Wasserstandsaufzeichnungen ist deutlich geringer als diejenige regelmäßiger Pegelaufzeichnungen. Bei den modellierten Extremereignissen besteht eine signifikante Unsicherheitsquelle

in der Zuordnung einer möglichen Eintrittswahrscheinlichkeit. Zusammenfassend ist daher festzustellen, dass auch durch die Einbeziehung von historischen und modellierten Wasserständen Unsicherheiten bei der Extrapolation von Extremwertverteilungen vorhanden sind. Eine vergleichende Betrachtung der Ergebnisse unterschiedlicher Datenkollektive – wie sie in der vorliegenden Arbeit durch die Varianten V1 bis V4 vorgenommen wurde – hilft jedoch bei der Bewertung und Interpretation der Ergebnisse. Das Ergebnis der hier durchgeführten integrierten Extremwertstatistik besteht demnach nicht in der Festlegung eines T-jährlichen Wasserstandes auf genau einen deterministischen Wert, sondern in der Angabe eines Bereiches, der nach den vergleichenden Betrachtungen plausibel erscheint.

9. Zusammenfassung

Die Ermittlung der für den Küstenschutz maßgebenden extremen Sturmflutereignisse stellen an der deutschen Ostseeküste eine besondere Herausforderung dar, weil neben der jeweils bedeutsamen regionalen Festlegung derartiger Ereignisse auch die Ereignisse selbst wegen ihrer sehr geringen Wahrscheinlichkeit schwer fassbar sind. Die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Hochwasserständen stellt eine Grundaufgabe der Hydrologie dar. Diese werden durch extremwertstatistische Methoden berechnet, wobei häufig Wahrscheinlichkeitsaussagen zu Wasserständen getroffen werden sollen, die bisher noch nicht eingetreten sind. Die ermittelte Extremwertverteilung muss demzufolge extrapoliert werden. Grundsätzlich basieren alle bekannten extremwertstatistischen Methoden auf der Analyse von beobachteten Daten. Um die Extrapolation der Verteilungsfunktionen nicht nur mathematisch, sondern auch physikalisch zu begründen, können neben den regelmäßig aufgezeichneten Wasserständen auch historische Angaben oder über numerische Modelle berechnete Extremereignisse in die Statistik mit einbezogen werden. Die Forschungsaufgabe bestand darin, für die deutsche Ostseeküste eine entsprechende Methodik zu entwickeln, mit der beobachtete Daten, historische Wasserstandsmarken und modellierte Extremereignisse in die Extremwertstatistik integriert werden können, um eine verlässlichere Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten von Sturmhochwasserständen zu erreichen.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden 10 Pegel an der schleswig-holsteinischen und mecklenburg-vorpommerschen Ostseeküste hinsichtlich extremer Wasserstände ausgewertet. Dazu wurden zunächst die Zeitreihen der mittleren und jährlichen Höchstwasserstände zusammengestellt und vorhandene Datenlücken über Korrelationsrechnungen zu benachbarten Pegeln geschlossen. Darüber hinaus wurde eine intensive Literaturrecherche zu historischen Sturmfluten vorgenommen.

Der Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Entwicklung einer extremwertstatistischen Methodik, bei der regelmäßige Pegelaufzeichnungen, historische Wasserstände und im Projekt modellierte Extremereignisse in der Statistik zusammen analysiert werden können. Dies wurde auf Basis der Allgemeinen Extremwertverteilung realisiert und als integrierte Extremwertstatistik bezeichnet. An jedem Pegel (außer am Pegel Neustadt i. H.) wurden vier Varianten (V1 bis V4) extremwertstatistisch analysiert. In Variante V1 wurden nur die Daten aus der Zeitspanne der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen einer extremwertstatistischen Analyse unterzogen. Die Variante V2 berücksichtigte zusätzlich historische Daten. In den Varianten V3 und V4 wurden schließlich noch modellierte Extremszenarien in die Statistik mit einbezogen.

Durch die angewendete integrierte Extremwertstatistik wird eine homogenere Beschreibung von beobachteten, historischen und modellierten Extremwasserständen erreicht. Inso-

fern ist dies als eine Verbesserung der bisherigen statistischen Verfahren zu bewerten. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass durch die Einbeziehung von weiteren Hochwasserinformationen in die Extremwertstatistik im Vergleich zur alleinigen Analyse der aufgezeichneten Wasserstände signifikant unterschiedliche Ergebnisse entstehen können. Bei der alleinigen Analyse der beobachteten Wasserstandsdaten kann beispielsweise dem Extremereignis von 1872 am Pegel Travemünde eine Jährlichkeit von über 10.000 Jahren zugeordnet werden. Bei der zusätzlichen Berücksichtigung von historischen und modellierten Extremwasserständen kann eine Jährlichkeit von etwa 3400 Jahren angegeben werden; tendenziell zeigt sich diese Reduzierung der entsprechenden Jährlichkeiten bei allen untersuchten Pegelstandorten.

Die vorliegenden Untersuchungen beziehen sich ausschließlich auf den gegenwärtigen klimatischen Zustand. Eventuelle Änderungen im hydrologischen System der Ostsee infolge eines Klimawandels sind nicht berücksichtigt und müssen in weiterführenden Forschungsarbeiten analysiert werden. Auch wenn im bearbeiteten Projekt Fortschritte hinsichtlich der Implementierung von historischen Hochwasserereignissen und modellierten Extremereignissen in die Extremwertstatistik erzielt wurden, ist beispielsweise bei der unterschiedlichen Gewichtung von historischen Ereignissen und der Berücksichtigung von Instationaritäten (z.B. Einfluss von Baumaßnahmen auf die Pegelwasserstände) weiterer Forschungsbedarf gegeben. Zusätzlich sollten in Zukunft weitergehende Untersuchungen beispielsweise zu Verweilzeiten durchgeführt werden, da längeranhaltende Sturmfluten zu einer erhöhten Belastung der Küstenschutzbauwerke führen.

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

- BENKEL, A. u. MEINKE, I.: Variation von sturmfluterzeugenden Tiefdruckgebieten oder Sturmflutwetterlagen, Abschlussbericht 1.2 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Geesthacht, 2008.
- BORK, I. u. MÜLLER-NAVARRA, S.: Modellierung von extremen Sturmflutwasserständen an der deutschen Ostseeküste, *Die Küste*, Heft 75, 2009.
- COLES, S.: *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Springer-Verlag, London, 2001.
- COLES, S. G. u. TAWN, J.: Statistics of coastal flood prevention, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 332, 457–476, 1990.
- DVWK: Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen, Merkblatt 251, Parey Verlag, Berlin, 1999.
- HAWKES, P. J.; GONZALES-MARCO, D.; SANCHEZ-ARCILLA, A. u. PRINOS, P.: Best practice for the estimation of extremes: A review, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46, Extra Issue 2, 324–332, 2008.
- HUBER, K.: Hochwasserstände an Nord- und Ostseeküsten, *Mitteilungen des Franzius-Instituts*, Heft 85, Hannover, 2000.
- HUPFER, P.; HARFF, J.; STERR, H. u. STIGGE, H. J.: Sonderheft: Die Wasserstände an der Ostseeküste, Entwicklung – Sturmfluten – Klimawandel, Kuratorium für Forschung und Küsteningenieurwesen (Hrsg.), *Die Küste*, Heft 66, 2003.
- JENKINSON, A. F.: The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements, *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 81, 158–171, 1955.
- JENSEN, J.: Extremereignisse an Nord- und Ostseeküsten – Ermittlung von Bemessungsereignissen, *Mitteilungen des Franzius-Instituts*, Heft 85, Hannover, 2000.
- JENSEN, J.; MUDERSBACH, CH.; MÜLLER-NAVARRA, S.; BORK, I.; KOZIAR, CH. u. RENNER, V.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrschein-

- lichkeiten an der deutschen Nordseeküste, Kuratorium für Forschung und Küsteningenieurwesen (Hrsg.), Die Küste, Heft 71, 123–167, 2006.
- JENSEN, J. u. TÖPPE, A.: Zusammenstellung und Auswertungen von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 30. Jhg., Heft 4, 1986.
- JENSEN, J. u. TÖPPE, A.: Untersuchungen über Sturmfluten an der Ostsee unter spezieller Berücksichtigung des Pegels Travemünde, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 34. Jhg., Heft 1/2, 1990.
- KOTZ, S. u. NADARAJAH, S.: Extreme Value Distribution – Theory and Applications, Imperial College Press, Imperial College Press, London, 2000.
- MEYER, M.: Modellierung der Entwicklung von Küstenlinien der Ostsee im Holozän – Wechselspiel zwischen Isostasie und Eustasie, Dissertation, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 2002.
- MUDERSBACH, CH. u. JENSEN, J.: Statistische Extremwertanalyse von Wasserständen an der Deutschen Ostseeküste, Abschlussbericht 1.4 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Universität Siegen, 2009.
- MUDERSBACH, CH.: Untersuchungen zur Ermittlung von hydrologischen Bemessungsgrößen mit Verfahren der instationären Extremwertstatistik – Methoden und Anwendungen auf Pegelwasserstände an der Deutschen Nord- und Ostseeküste, Dissertation, Universität Siegen, 2009.
- PUGH, D.: Changing Sea Levels – Effects of Tides, Weather and Climate, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- SCHMAGER, G.; FRÖHLE, P.; SCHRADER, D.; WEISSE, R. u. MÜLLER-NAVARRA, S.: Sea state, Tides, in Feistel, R. et al. (eds.): State and Evolution of the Baltic Sea, 1952-2005. Wiley, 143–198, 2008.
- SCHMITZ, R.: Vorhersage von historisch aufgetretenen Stürmen über der Ostsee mithilfe des Ensemble Prediction System und COSMO, Abschlussbericht 1.1 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Offenbach, 2007.
- SCHUMANN, A.: Anwendungen partieller wahrscheinlichkeitsgewichteter Momente zur Berücksichtigung historischer Ereignisse bei der Extremwertstatistik, Hydrology and Water Resources Management, Vol. 51 No. 2, 73–81, 2007.
- STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M. u. FOUFOULA-GEORGIU, E.: Frequency Analysis of Extreme Events, in: Handbook of Hydrology, Maidment, D.R. (Ed.), McGraw-Hill Inc., New York, 1993.