

Integration von erweiterten Informationen in die statistische Analyse am Beispiel von Flensburg Einordnung des Wiederkehrintervalls des Sturmhochwassers vom 20./21. Oktober 2023

Simon Beckmann¹, Jürgen Jensen², Arne Arns³ und Sebastian Niehüser⁴

¹ Hochschule Rhein Main Wiesbaden, simon.beckmann@hs-rm.de

² Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fww)

³ Hochschule Rhein Main Wiesbaden, Professur für Wasserbau, Wasserwirtschaft und Hydrologie

⁴ hochschule 21 Buxtehude, Professur für Konstruktiven Wasserbau

Zusammenfassung

Am 20. und 21.10.2023 trafen außerordentlich hohe Wasserstände insbesondere die Ostseeküste Schleswig-Holsteins. Die Frage nach dem statistischen Wiederkehrintervall für dieses Sturmhochwasser soll im Rahmen dieses Artikels beispielhaft für den Pegel Flensburg geklärt werden.

Die Ergebnisse von statistischen Analysen zur Häufigkeit bzw. zu Wiederkehrintervallen von Extremereignissen wie Sturmfluten oder Sturmhochwassern sind abhängig von der verfügbaren Datenbasis. So verändern sich die Ergebnisse, wenn weitere Informationsquellen, wie analoge Pegelaufzeichnungen, lokale historische Überlieferungen und räumliche Informationen benachbarter Pegel der Datenbasis hinzugefügt werden. Am Beispiel des Pegels Flensburg werden die Möglichkeiten aufgezeigt, die mit der Erweiterung der Datenbasis um solche Wasserstandsdaten einhergehen. Ein zentrales Ergebnis ist, dass durch die Erweiterung der Datenbasis eine vertikale Verschiebung der Verteilungsfunktion und Reduzierungen der theoretischen Modellunsicherheiten, insbesondere für seltene bzw. extreme Ereignisse auftritt, was wiederum zu Veränderungen der Abschätzung von Wiederkehrintervallen und Hochwasserrisiken führt. Diese Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit, alle verfügbaren Informationen als integralen Bestandteil der extremwertstatistischen Analysen einzubeziehen, um möglichst objektive und robuste Ergebnisse erzielen zu können.

Für das Sturmhochwasser vom 20. bis 21.10.2023, das in Flensburg zu einem Wasserstand von etwa 216 cm über dem Mittelwasser führte, wird ein Wiederkehrintervall von etwa 70 Jahren abgeleitet.

Besonders in Anbetracht des Klimawandels und der damit verbundenen Folgen für zukünftige Extremereignisse ist es von größter Bedeutung, dass die Bemessungsverfahren und -ereignisse für Küstenschutzanlagen auf qualitativ hochwertigen Wasserstandsdaten einschließlich historischer Informationen basieren.

Schlagwörter

Ostsee, Integrierte Extremwertstatistik, Sturmhochwasser, historische Sturmhochwasser



Summary

On October 20-21, 2023, extraordinarily high-water levels hit the Baltic Sea coast of Schleswig-Holstein. The question of the statistical return interval for this storm surge will be clarified in this article using the Flensburg gauge as an example.

The results of statistical analyses on the frequency or return intervals of extreme events such as storm surges or storm floods depend on the available database. The results change when additional sources of information such as analog gauge records, local historical records and spatial information from neighbouring gauges are added to the database. Using the example of the Flensburg gauge, the possibilities associated with the inclusion of such water level information in the database are demonstrated. A central result is that the extension of the database results in a vertical shift of the distribution function and a reduction of the theoretical model uncertainties, especially for rare or extreme events, which in turn leads to changes in the estimation of recurrence intervals and flood risks. These results underline the need to include all available information as an integral part of the extreme value statistical analyses in order to achieve results that are as objective and robust as possible.

A recurrence interval of around 70 years is derived for the storm flood of October 20-21, 2023, which led to a water level of around 216 cm above mean water in Flensburg.

Particularly in view of climate change and the associated consequences for future extreme events, it is of the utmost importance that the design procedures and events for coastal protection facilities are based on high-quality water level data including historical information.

Keywords

Baltic Sea, integrated extreme value statistics, storm flooding, historical storm surges

1 Einleitung

Bei dem Sturmhochwasser (im Folgenden auch Ostseesturmflut bzw. im Kontext anderer aktueller Publikationen auch vereinfachend „Sturmflut“ genannt. Der Begriff „Sturmflut“ wird an den tidebeeinflussten Nordseeküsten seit Jahrhunderten genutzt und beschreibt durch Sturm erzeugten Windstau, der zeitgleich bei Flut auftritt. Da die Ostsee jedoch keine nennenswerten Gezeiten hat, gibt es an der Ostsee keinen Flutwasserstand, der durch Windstau verstärkt werden könnte. Ursächlich für Hochwasser an den Küsten der Ostsee sind immer Wind- bzw. Sturmeinwirkungen. Daher lautet der korrekte Begriff für Hochwasser an den Ostseeküsten „Sturmhochwasser“) am 20. und 21.10.2023 an der deutschen Ostseeküste, wurden insbesondere an der Küste Schleswig-Holsteins außerordentlich hohe Wasserstände registriert. Gebrochene Deiche, zerstörte Promenaden und Häuser, zahlreiche gesunkene oder zerstörte Boote, wie auch erhebliche Sandverluste führten zu Schäden im dreistelligen Millionenbereich.

Im stark betroffenen Flensburg führte die Ostseesturmflut zu einem Wasserstandsanstieg von ca. 216 cm über Mittelwasser (MW) (abhängig von der Ermittlung/Berücksichtigung des MW). Je nach Datenquelle wurden solche Wasserstände zuletzt bei dem Sturmhochwasser am 31.12.1904 bzw. bei des außerordentlichen Ereignisses vom 12./13.11.1872 übertroffen. Damit stellt das jüngste Ereignis eines der höchsten Ereignisse dar, das in den vergangenen Jahrhunderten an der deutschen Ostseeküste aufgetreten ist.

Schnell wurde daher die Frage nach dem statistischen Wiederkehrintervall bzw. der Jährlichkeit für dieses Ereignis gestellt und ob die aufgetretenen Wasserstände einen bemessungsrelevanten Charakter aufweisen. Die statistischen Einschätzungen variierten dabei sehr stark. Für Flensburg wurden anhand von empirischen Beobachtungen Aussagen wie „die höchste *Sturmflut* seit (mehr als) 100 Jahren“ (BSH 2023, WSV 2023) getroffen. Erste statistische Einschätzungen variieren zwischen einem mittleren Wiederkehrintervall von 100 Jahren in Flensburg bzw. 250 Jahren im naheliegenden Schleswig (Hofstede 2023). Extremwertstatistische Analysen, die auf der Basis von limitierten Pegeldata durchgeführt werden, liefern sogar Wiederkehrzeiten von ≥ 1000 Jahren (50 %-Perzentil; vgl. Liu et al. 2022, <https://sturmflut-monitor.de>). Besonders sensibel ist die statistische Einschätzung, da das Sicherheitsniveau, also der Wasserstand, den es sicher zu kehren gilt, an der deutschen Ostseeküste als 200-jährlicher Wasserstand festgelegt ist (Weichbrodt et al. 2013, Hofstede 2019). Die Ermittlung der statistischen Wiederkehrintervalle basiert maßgeblich auf der Analyse von beobachteten Wasserständen. Die Wasserstände der Ostseeküste werden an einigen Pegeln bereits seit dem 19. Jahrhundert registriert. Aufgrund fehlender Aufzeichnungen und Informationen, z. B. fehlende Bezugspunkte der Wasserstände und in Ermangelung von Digitalisierungen der analogen Schreibbögen, sind diese Informationen jedoch nur für wenige Pegelstationen seit dem 19. Jahrhundert für statistische Analysen verfügbar (Kelln und Jensen 2020). Für eine Mehrzahl der Pegelstationen liegen digitale Informationen daher erst seit Mitte des 20. Jahrhunderts vor, so dass Extremereignisse wie z. B. die Ostseesturmflut von 1872 in den Datensätzen nicht enthalten sind. Auch das Auftreten eines Ereignisses wie das jüngste vom 20./21.10.2023 kann die Ergebnisse der bisherigen statistischen Analysen maßgeblich beeinflussen und deren Belastbarkeit damit grundsätzlich in Frage stellen.

Einzelne Extremereignisse bzw. Sturmwaterstände an der Ostsee werden durch stochastische meteorologische Einflüsse (z. B. Windstau) verursacht. Da es sich bei den limitierten Beobachtungen von Wasserständen immer nur um Stichproben der Grundgesamtheit aller möglichen Wasserstände handelt, sollte die Stichprobe möglichst repräsentativ für die Grundgesamtheit sein. Für eine extremwertstatistische Analyse entspricht die Forderung nach Repräsentativität i. d. R. der Nutzung von möglichst langen Zeitreihen. Um auf möglichst lange Zeitreihen zurückgreifen zu können, gilt es daher alle verfügbaren, ggf. analogen und auswertbaren Daten zu sichten und für die extremwertstatistischen Untersuchungen aufzubereiten. Für die Vertrauenswürdigkeit der erzielten Aussagen ist nicht nur eine möglichst lange Zeitreihe wichtig, sondern auch die Qualität der Daten, weshalb bei der Aufbereitung höchste Sorgfalt gefordert ist. Für eine statistische Betrachtung der Extremwaterstände ist es weiterhin zwingend erforderlich, die Extremwaterstände mit den Meeresspiegeländerungen (MSL-Anstieg) zu homogenisieren. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob die Zeitreihen den statistischen Voraussetzungen wie z. B. der Homogenität, Unabhängigkeit und Zufälligkeit der Ereignisse genügen. Nach diesen Vorarbeiten kann die Zeitreihe einer statistischen Wahrscheinlichkeitsanalyse zugeführt werden.

Diese Forderung, möglichst viele Wasserstandsdaten zusammenzutragen, um die Qualität und den Umfang der Stichprobe zu erweitern, wird daher auch in Regelwerken empfohlen und eingefordert (z. B. DWA-M 552, Jensen et al. 2022). Dies kann durch die Integration von zeitlichen, räumlichen und kausalen Informationen erfolgen. Am Beispiel des Pegels Flensburg werden diese Möglichkeiten aufgezeigt und erläutert. Anschließend

wird eine kritische Bewertung der so erzeugten Datengrundlage und der extremwertstatistischen Analyse hinsichtlich einer belastbaren Einordnung der Wiederkehrintervalle der Ostseesturmflut vom 20./21.10.2023 durchgeführt.

2 Untersuchungsgebiet

Die Ostsee ist ein langgestrecktes, flaches Binnenmeer mit relativ schmaler Verbindung zur Nordsee und damit auch zu den Weltmeeren. Die Gestalt der Ostsee wurde maßgeblich während der letzten Eiszeit geformt. Die deutsche Küste zeigt daher eine sehr heterogene Form, die von Buchten, Förden und der Ausgleichsküste gekennzeichnet wird. Wechselnde Abschnitte mit Steil- und Flachküsten prägen die Gestalt der Küste. Im westlichen Teil der deutschen Ostseeküste erstrecken sich die Flensburger Förde, die Eckernförder Bucht und die Kieler Förde bis weit ins Landesinnere hinein.

Die Flensburger Förde ist die nördlichste Förde und bildet die natürliche Grenze zwischen Deutschland und Dänemark. Sie ist 40 bis 50 km lang (je nach Abgrenzung zur Kieler Bucht) und bietet eine ca. 28 km lange und bis zu 30 m tiefe, nach Osten gerichtete Verbindung zur Ostsee. Die Halbinsel *Holnis* gliedert die Flensburger Förde in die *Innenförde* (südwestlich) und die *Außenförde* (östlich). So entsteht eine verwinkelte Form, an deren westlichster Spitze der Flensburger Hafen und der Pegel Flensburg liegen. Im Vergleich dazu laufen die Eckernförder Bucht und Kieler Förde trichterförmig zu.

Das Messnetz an der deutschen Ostseeküste ist engmaschig aufgebaut, so dass sich eine Vielzahl an Pegeln im Bereich der deutschen Küste der südwestlichen Ostsee befinden (vgl. Abbildung 1).



Abbildung 1: Darstellung der geographischen Lage des Pegels Flensburg und ausgewählter benachbarter Pegelstationen an der südwestlichen Küste der Ostsee.

Ostseesturmfluten sind Naturereignisse, die durch das Zusammenwirken von meteorologischen und hydrologischen Einwirkungen entstehen. Für die Ausprägung eines Sturmhochwassers sind als wesentliche Komponenten Füllungsgrad, Schwingungstau, Windstau und Buchtenstau verantwortlich (z. B. Hupfer et al. 2003). Ebenso stellt das MW eine wichtige Größe dar, die den Verlauf des Ereignisses maßgebend mitprägt. Die wesentliche Einflussgröße für ein Sturmhochwasser ist der namensgebende Sturm, der als Folge von

anhaltenden Winden, in Abhängigkeit der Windrichtung und -stärke und der Windwirklänge (Fetch), Wasserstandshebungen bzw. -absenkungen von mehreren Metern bewirken kann. Im südwestlichen Bereich der Ostsee prägen sich diese Schwankungen besonders aus, da sich dort einerseits ein Schwingungsbauch ausbilden kann und andererseits die Wassermassen bei anhaltenen Stürmen aufstauen. Im ungünstigsten Fall, das heißt wenn alle Einflussgrößen maximiert zusammentreffen, könnte dies an der deutschen Ostseeküste Scheitelwerte um 4.0 m ü. MW erreichen, auch wenn solche Werte bisher noch nicht aufgetreten sind (StALU MV 2009). Historische Überlieferungen aus den vergangenen 1.000 Jahren (vgl. z. B. Jensen und Töppe 1986, 1990) und geologische Befunde durch die Universität Greifswald auf Rügen lassen diese Größenordnung jedoch vermuten.

Am Pegel Flensburg wurden gesicherte bzw. belegbare Wasserstandsschwankungen zwischen ca. 230 bis 240 cm unter MW (10.10.1926; geschätzt, da der Pegel trocken lag und MW nicht sicher bestimmt wurde, vgl. DGJ 1926) und 327 bis 331 cm ü. MW (13.11.1872) registriert.

3 Datenaufarbeitung

Die statistische Ermittlung von hydrologischen Kenngrößen findet in der Regel auf Basis von Wasserstandszeitreihen bzw. Pegelinformationen statt. Die ersten regelmäßigen und lückenlosen Pegelaufzeichnungen in der Ostsee, die auch heute noch verfügbar sind, begannen in der Ostsee im Jahr 1774 am Pegel Stockholm in Schweden (Ekman 1988). Die ältesten Lattenpegelablesungen an der deutschen Ostseeküste liegen am Pegel Travemünde seit 1826 vor (Jensen und Töppe 1986). Um eine einheitliche Durchführung von Wasserstandsbeobachtungen zu gewährleisten, wurde 1810 mit der „*Pegelinstruction*“ geregelt, dass täglich der Höchstwert abgelesen wurde. 1845 wurde die Ablesezeit des Wasserstandes auf einheitlich um 12 Uhr mittags festgelegt (Hagen 1878). Der erste analoge Schreibpegel an der deutschen Ostseeküste zur kontinuierlichen Messung der Wasserstände wurde 1890 in Travemünde installiert, gefolgt von Wismar und Warnemünde im Jahr 1894 (Hahn und Rietschel 1938, Liebsch 1997). Viele dieser historischen Pegelbögen werden in Archiven aufbewahrt, weshalb für diese Zeitperioden höchstens ein bis vier digitalisierte Aufzeichnungen pro Tag zur Verfügung gestellt werden könnten (Hupfer et al. 2003, für eine ausführliche Retrospektive der Meeresspiegelforschung an der Ostsee vgl. Kelln und Jensen (2020)). Digitale Pegelinformationen sind daher i. d. R. für wenige Dekaden verfügbar. Nach wie vor bleibt die mangelnde bzw. lückenhafte Digitalisierung historischer Pegelbögen und mangelnde Protokollierung von Verschiebungen der Pegelnullpunkte ein großes Defizit, das die Qualität von statistischen Analysen einschränkt.

In Tabelle 1 erfolgt ein Überblick der bekannten Informationen zum Pegel Flensburg.

Tabelle 1: Informationen zum Pegel Flensburg (entnommen aus den Pegelbeschreibungen der Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbücher).

Pegelstation:	Flensburg
Pegelnummer:	9610010 (DGJ)
Betreiber:	WSA Lübeck
Betrieb seit:	Lattenpegel: 1872 Registriergerät: 14.04.1954 Fernübertragung: 01.09.1954
Koordinaten (EPSG 4326):	Lat.: 54,795055 ° Lon.: 9,433016 °

In der Datengrundlage wird zwischen *digitalen* und *analogen Pegelinformationen* unterschieden. Beides wird gleichermaßen als systematische Wasserstandsbeobachtung verstanden, die z. B. über eine Pegelstation (Schreibpegel oder Pegellatte) erhoben wurde.

Neben Pegelinformationen existieren *historische Informationen* über Wasserstände, die nicht systematisch erhoben wurden, also entweder händisch während eines Sturmhochwassers gemessen (bzw. geschätzt) wurden oder im Nachhinein durch Hochwassermarken abgeleitet wurden. Damit ist den historischen Daten eine höhere Ungenauigkeit zuzuordnen.

Um alle verfügbaren Informationen objektiv analysieren zu können, gilt es die zugrundeliegende Stichprobe zu erweitern und somit die zur Verfügung stehenden Informationen in die Datengrundlage zu integrieren. Die Erweiterung der Informationen kann zeitlich (*temporal*), räumlich (*spatial*) oder *kausal* geschehen. Als zeitliche Informationserweiterung wird hier einerseits die Verwendung von analogen Pegeldaten als auch die Betrachtung von historischen Informationen verstanden. Vorab werden alle zur Verfügung stehenden Informationen für den Pegel Flensburg zusammengetragen, anschließend gilt es diese zu plausibilisieren und zu einem einheitlichen Datensatz zusammenzuführen.

Für die extremwertstatistische Analyse sind insbesondere die Maxima von Interesse. Bei der Ermittlung dieser kann grundlegend zwischen Block Maxima (BM) und Peaks over Threshold (PoT) unterschieden werden, die wiederum mit spezifischen statistischen Modellen verbunden sind. Beide Modelle stellen wissenschaftlich etablierte bzw. akzeptierte und in der Praxis weit verbreitete methodische Ansätze dar. Jedoch besteht keine Einigkeit, welche Methodik sich zur extremwertstatistischen Analyse besser eignet bzw. vertrauenswürdiger Ergebnisse liefert (für einen Überblick vgl. z. B. DWA-M 552, Coles 2001, Arns 2014, Jensen 1986). Die Verwendung von jährlichen Kennwerten aus den historischen Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern (DGJ) in der weiteren Bearbeitung legt die Block Maxima Methode nahe. Mit einem unabhängigen Maximum pro hydrologischem Jahr (01.11. bis 31.10.) wird so eine Amax (annual maximum) Reihe an Extrema generiert.

Um den Meeresspiegelanstieg als langfristigen Trend aus den Daten zu eliminieren, werden die Wasserstände in Relation zum MW gesetzt. Damit sind Veränderungen der verschiedenen Höhenbezugssysteme, z. B. Normalnull (NN) im alten System, wie auch NN im neuen System, Höhennull (HN) und Normalhöhen-Null (NHN) oder Pegelnullpunktverschiebungen, irrelevant. Wie auch an der gezeitengereprägt Nordsee, ist es an der Ostsee üblich, den mittleren Wasserstand gleitend über mehrere Jahre (5 bzw. 19 Jahre) zu ermitteln, um Schwankungen auf kurzen Zeitskalen zu mitteln. Mit Blick auf die teils lückenbehafteten historischen Informationen und Probleme bei den Jahren der Randbereiche der jeweiligen Zeitreihe, z. B. 2023, wird von einer gleitenden Mittelwertbildung über mehrere Jahre abgesehen. Daher wird das MW als Mittelwert aller Wasserstände über ein hydrologisches Jahr gebildet. Damit verbundene Schwankungen in der Ermittlung des MW werden auf wenige Zentimeter abgeschätzt.

3.1 Digitale Pegelinformationen

Die digitale Zeitreihe des Pegels Flensburg wurde durch das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Lübeck erhoben und durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) qualitätsgeprüft bereitgestellt. Die Daten decken den Zeitraum von 01.11.1954 bis 31.10.2023 in stündlicher Auflösung ab. Entsprechend der beschriebenen Methodik wurden die Jahresmaxima und -mittelwerte bestimmt. Datenlücken finden sich in den hydrologischen Jahren 1991 und 1994. Die entsprechenden jährlichen Kennwerte wurden aus den jeweiligen

DGJs komplementiert, so dass sich anschließend eine lückenlose Zeitreihe für den zugrundeliegenden Zeitraum ergibt. In Abbildung 2 werden die ermittelten jährlichen Maxima und die zugehörigen MWs dargestellt.

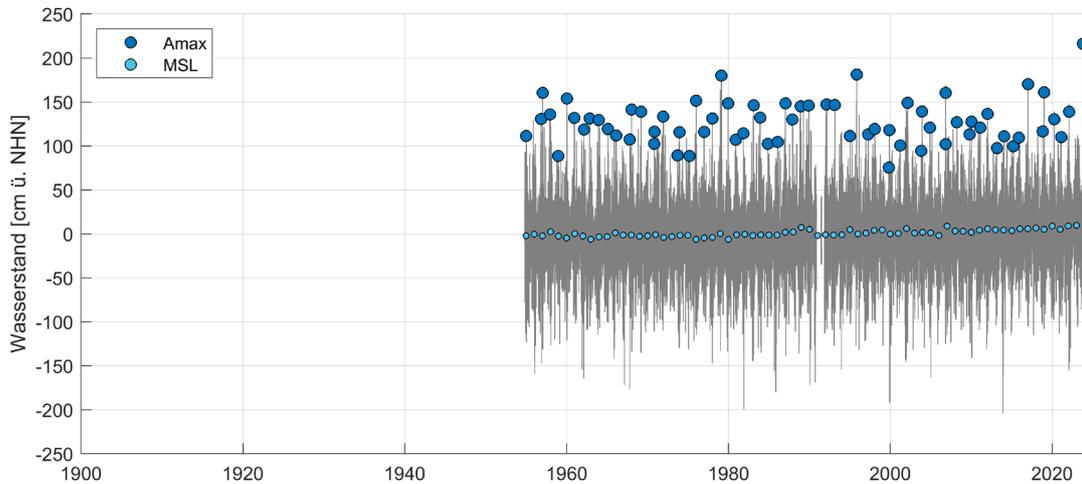


Abbildung 2: Verfügbarkeit und Verteilung der digitalen Wasserstandsdaten des Pegels Flensburg, inkl. der jährlich höchsten Wasserstände (Amax) und mittleren Wasserstände (MSL) über den Zeitraum der hydrologischen Jahre 1955 bis 2023.

Das Ereignis vom Oktober 2023 stellt mit 226 cm ü. NHN das höchste Ereignis der digitalen Datenreihe dar. Unter Berücksichtigung des mittleren Wasserstandes ($MW_{2023} \approx 10$ cm NHN) ergibt sich in Relation zum MW ein Wasserstand von ca. 216 cm ü. MW. Dieser Wert weicht von offiziellen Angaben ab, z. B. BSH (2023), denen die Annahme der Übereinstimmung des (Normal-)Mittelwassers und Normalhöhen-null zu Grunde liegt. Diese Annahme führt folgend zu einer Reduzierung der Wasserstände um ca. 10 cm.

3.2 Analoge Pegelinformationen

Zur zeitlichen Erweiterung der Datengrundlage werden neben den systematischen, digitalisierten Pegeldaten Informationen über Wasserstände aus anderen Quellen herangezogen. Als analoge Datenquelle dienen dabei die DGJs, in denen hydrologische Kennwerte archiviert wurden. Die DGJs enthalten sowohl Tageswerte als auch statistische Auswertungen der Messstellen, d. h. Hauptwerte, Dauertabellen und Extremwerte. Daten zum hier betrachteten Küstengebiet der Ostsee wurden erstmals 1901 veröffentlicht und werden seitdem jährlich fortgeschrieben. Aufgrund des 1. und 2. Weltkrieges, wie auch den entstandenen geopolitischen Veränderungen, sind diese in Umfang und Aufmachung einigen Veränderungen unterworfen, so dass für eine Vielzahl an Pegeln keine kontinuierlichen Auswertungen durchgeführt wurden. Die DGJs gliedern sich in folgende Teilbände:

Jahrbuch für die Gewässerkunde Norddeutschlands (1901–1936)

Jahrbuch der Gewässerkunde des Deutschen Reichs (1937–1940)

Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch (DGJ) (seit 1941)

Gewässerkundliches Jahrbuch der DDR (195–1989)

Für Flensburg ergibt sich durch die unterschiedliche Datenaufbereitung eine Datenlücke von 1921 bis einschließlich 1930. Bei der Verwendung der Wasserstände in DGJs ist hohe Aufmerksamkeit geboten, da oftmals nur „Hauptwerte“, z. B. Terminwerte mittags um

12 Uhr, angegeben werden. Lediglich für ausgewählte Ereignisse sind diese durch Scheitelwerte ergänzt worden. Die Verwendung von Terminwerten würde zu einer Verzerrung der Scheitelwasserstände von Sturmhochwassern führen. Die Daten sind für die statistische Analysen somit nicht zu verwenden. Verfügbare Scheitelwerte werden in Relation zum jeweils mitgeführten MW auf Basis des zugrundeliegenden hydrologischen Jahres gesetzt.

Informationen über historische Sturmhochwasser können dem entsprechenden Schrifttum entnommen werden. Hervorzuheben sind Kannenberg (1956), Petersen und Rhode (1991) und Krüger (1910), die zur Informationserweiterung herangezogen werden.

Kannenberg (1956) bezieht sich ebenfalls auf die DGJs. Die fehlenden Wasserstandsbeobachtungen für die Abflussjahre 1921 bis 1930 wurden durch das damalige Wasser- und Schifffahrtsamt Kiel zur Verfügung gestellt und konnten somit ergänzt werden. Weitere Angaben Kannenbergs weichen jedoch teils um einige Zentimeter von den DGJs ab, was im Rahmen dieser Bearbeitung nicht geklärt werden konnte. Um die Wasserstände Kannenbergs in Relation zum MW zu setzen, wurden die MW-Stände aus den DGJs genutzt. Fehlende MW-Werte wurden linear interpoliert.

Petersen und Rhode (1991) beschränken sich auf ausgewählte Sturmhochwasser, die einen Grenzwert von 1,70 m ü. MW überschritten haben. Im Gegensatz zu den vorherigen Quellen werden auch Ereignisse vor 1901 berücksichtigt. Woher jedoch die Informationen ursprünglich stammen, bleibt offen. Ebenso ist die Frage nach Vollständigkeit ungeklärt.

Eine weitere Dokumentation erfolgte durch Krüger (1910), der alle historisch bekannten, bedeutenden Ereignisse von 1044 bis 1908 an der deutschen Ostseeküste zusammenstellte. Der Fokus der Dokumentation liegt dabei eher auf dem Eintreten des Ereignisses als der vollständigen Beschreibung der Wasserstände. In Tabelle 2 sind alle bekannten, analogen Pegelinformationen seit 1900 des Pegels Flensburg dargestellt.

Tabelle 2: Analog verfügbare Informationen über Wasserstände am Pegel Flensburg; einschl. der folgend weiter verwendeten Wasserstände (**fett gedruckt**).

Datum	Wasserstand [cm ü. MW]	Datum	Wasserstand [cm ü. MW]
11.10.1903	116⁽¹⁾	02.03.1935	180^{(1) (3)} 179.5⁽²⁾
01.12.1903	132⁽¹⁾; 138.5⁽²⁾	25.10.1935	117.5⁽²⁾
31.12.1904	238⁽¹⁾ 240.5⁽²⁾ 233⁽³⁾; 236⁽⁴⁾	09.02.1936	191⁽¹⁾ 188.5⁽²⁾ 189⁽³⁾
19.04.1906	105⁽¹⁾	14.02.1939	155⁽¹⁾⁽²⁾
14.01.1905	123.5⁽²⁾	28.10.1939	135⁽²⁾
04./06.12.1906	152⁽¹⁾ 156.5⁽²⁾	16.01.1940	179⁽¹⁾ 179.5⁽²⁾
09.01.1908	170⁽¹⁾ 180⁽²⁾ 174⁽³⁾ 195⁽⁴⁾	15.09.1941	101⁽¹⁾
26.12.1908	110⁽¹⁾	13.11.1941	190⁽¹⁾⁽²⁾
30.12.1909	119.5⁽²⁾	27.12.1941	188⁽²⁾
25.01.1910	159⁽¹⁾	03.03.1943	106⁽¹⁾
14.10.1910	137⁽²⁾	28.01.1945	84⁽¹⁾
05.05.1913	157⁽²⁾	09.11.1945	128⁽²⁾
30.12.1913	183⁽²⁾	13.01.1946	138⁽²⁾
07.11.1921	156.5⁽²⁾	19.02.1948	101⁽¹⁾
10.11.1923	118⁽²⁾	22.01.1949	122⁽²⁾
06.02.1924	150⁽²⁾	01.-02.03.1949	142⁽¹⁾⁽²⁾
22.12.1926	136⁽²⁾	11.12.1949	151⁽¹⁾ 152⁽²⁾
12.12.1928	136⁽²⁾	20.-21.01.1952	134⁽¹⁾⁽²⁾
15.10.1934	140⁽¹⁾ 139.5⁽²⁾	04.01.1954	172⁽¹⁾⁽²⁾ 176⁽³⁾

⁽¹⁾DGJ; ⁽²⁾Kanneberg (1956); ⁽³⁾Petersen und Rhode (1991); ⁽⁴⁾Krüger (1910)

Dabei treten Abweichungen zwischen den Wasserstandsangaben nach verschiedenen Quellen auf. Dies kann teils durch die unterschiedliche oder fehlende Berücksichtigung des MW der Autoren erklärt werden. Einige Angaben lassen sich jedoch nicht rekonstruieren. Sofern verfügbar, wird den Werten der DGJs die größte Qualität zugeordnet und diese als Primärquelle genutzt.

3.3 Kausale Informationserweiterung

Bei der kausalen Informationserweiterung werden die Prozesse der Hochwasserentstehung in die Analyse einbezogen. Im Falle von Ostseesturmhochwassern ist die Genese maßgeblich durch meteorologische Prozesse geprägt. Meteorologische Aufzeichnungen reichen zurück bis in die Antike. An der deutschen Küste können Dokumentationen, wie sie in Chroniken, Kirchenbüchern oder Wetteraufzeichnungen zu finden sind, somit Proxys sein, die auf Sturmhochwasser hinweisen. Beispielsweise soll hier die Zusammenstellung verschiedener Quellen im *Katalog bemerkenswerter Witterungsereignisse von den ältesten Zeiten bis zum Jahre 1800* durch Henning (1904) genannt werden. Ab 1876 wurden von der Deutschen Seewarte (heute Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)) die ersten täglich erscheinenden Wetterkarten veröffentlicht.

Meteorologische Reanalysen (z. B. NOAA CIRES (v3) 1836–2015) basieren auf Messungen der Atmosphäre und können als Input für hydrodynamisch-numerische Modelle genutzt werden, um Wasserstände flächendeckend zu rekonstruieren und somit synthetische Zeitreihen zu erstellen. Für die Analysen der vorliegenden Untersuchung wird diese kausale Informationserweiterung nicht umgesetzt, soll jedoch hier Erwähnung finden, da diese Möglichkeit eine wichtige Informationserweiterung darstellt.

3.4 Räumliche Informationserweiterung

Für die räumliche Informationserweiterung bzw. eine regionale Hochwasseranalyse werden die verfügbaren Informationen der benachbarten Pegel in der Annahme betrachtet, dass diese ähnliche hydrologische Eigenschaften aufweisen. Einerseits können so die vorliegenden Informationen unter Berücksichtigung der dort herrschenden Eigenschaften auf den betrachteten Pegel übertragen werden, andererseits lassen sich Wasserstände bzw. andere Werte plausibilisieren.

Die Charakteristika von Sturmhochwassern an verschiedenen Pegeln der südwestlichen Ostsee sind durch die relativ einheitliche Genese (im Wesentlichen bedingt durch Winde aus N-NE) ähnlich, so dass davon ausgegangen werden kann, dass benachbarte Pegel vergleichbare Wasserstandsverläufe haben.

Jedoch ist auch hier die Herausforderung, Pegel mit ausreichend langen Zeitreihen und belastbaren Informationen zu identifizieren. Dabei erschwert die Lage des Pegels Flensburg als Randpegel an der deutschen Ostseeküste die räumliche Erweiterung. Als benachbarter Pegel wird Kiel-Holtenau genutzt, da einerseits mit der geringen räumlichen Distanz eine geringere Unsicherheit einhergeht, andererseits der analoge Informationsgehalt für den betrachteten Zeitraum gegeben ist. Weiterhin bietet sich der Pegel Travemünde durch die herausragende und lückenlose Länge der Zeitreihe (1826–2023) (vgl. Jensen und Töppe 1986, 1990) und dem Informationsgehalt zu historischen Ostseesturmfluten (Schätzungen

für die letzten 1.000 Jahre, vgl., Jensen et al. (2022)) an. Weiterhin liegt dieser Pegel zentral an der deutschen Ostseeküste und kann daher als Vergleichspegel herangezogen werden.

Die systematischen Pegelinformationen beider Pegel wurden ebenfalls bei der BfG angefragt und qualitätsgeprüft in stündlicher Auflösung bereitgestellt. Ergänzt wurden die Informationen analog zum bisherigen Vorgehen mit dem relevanten Schrifttum. Die Wasserstände werden so anschließend für die statistische Analyse relativ zum MW gesetzt.

Um die Wasserstände von einem Pegel auf andere Pegel zu übertragen, wird als einfaches statistisches Modell eine Regressionsbeziehung genutzt. Durch diese lineare statistische Beziehung können Wasserstände aus fehlenden Jahren übertragen werden. Dies setzt voraus, dass die Beziehung der Wasserstände zeitlich konstant bzw. stationär ist. Weiter wird angenommen, dass Wasserstände *ordinärer* Ostseesturmfluten die gleiche Abhängigkeit wie *extreme* Ostseesturmflutwasserstände aufweisen, was in der Empirie häufig nicht beobachtbar ist. Oftmals verstärkt sich sogar die Abhängigkeit von Ausreißern (*tail dependence*).

In Abbildung 3 werden die Wasserstandsinformationen und die dazu ermittelten Regressionsbeziehungen dargestellt. Als Konfidenzintervall wird die einfache und zweifache Standardabweichung (σ) der vertikalen Distanz des Wertepaars zur Regressionsgeraden dargestellt. Unter der Annahme einer normalverteilten Abweichung liegen 95 % aller Realisationen innerhalb von $\pm 2\sigma$ vom Erwartungswert, den hier die Regressionsgerade bildet.

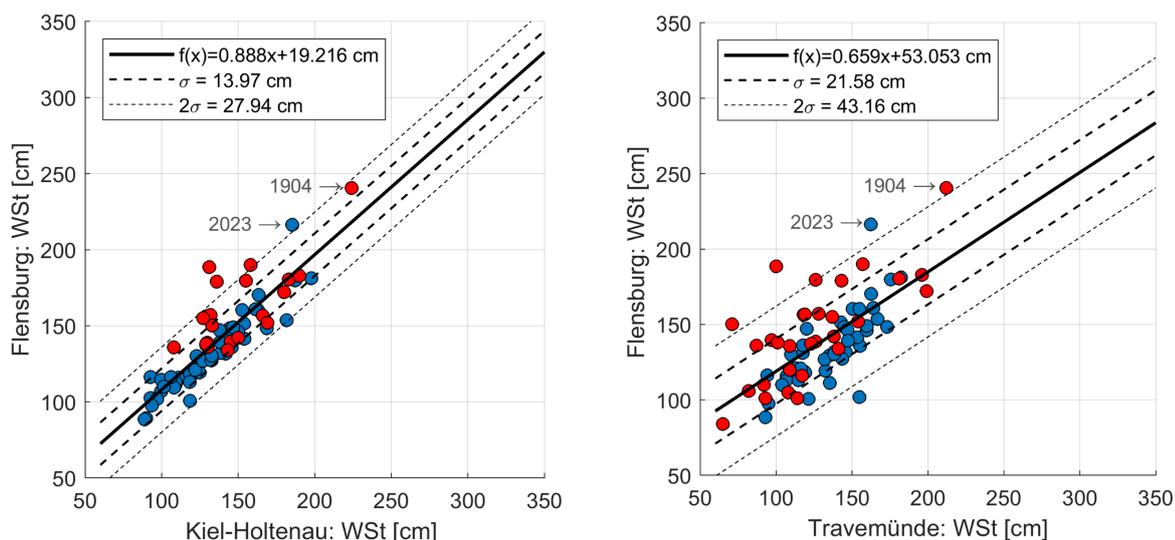


Abbildung 3: Regressionsbeziehungen der Pegel Travemünde und Kiel-Holtenau zu Flensburg. Digital verfügbare Wasserstandsinformationen werden blau dargestellt, analoge Informationen rot. Die einfache und zweifache Standardabweichung (σ) dient als Konfidenzintervall.

Die Wertepaare der analogen Messungen (rot) beider Pegel weisen eine größere Streuung zur Regressionsbeziehung auf als die der digitalen Messungen (blau), so wie es die eine manuelle Ablesung eines Lattenpegels bereits vermuten ließ. Im Rahmen der Plausibilisierung der aufgearbeiteten Wasserstände sind besonders die Ereignisse mit großen Abweichungen zur Regressionsbeziehung zu betrachten.

Größere Abweichungen zur Regressionsgeraden zeigen sich besonders in der Beziehung von Flensburg zu Travemünde. Diese ist einerseits durch die größere Entfernung bzw. die unterschiedliche Lage und der damit verbundenen stauwirksamen Windrichtung zu erklären. Andererseits beschreiben bereits Hahn und Rietschel (1938) fehlende Werte und Unterschiede zwischen den gemessenen Wasserständen am Pegel Travemünde zum

Pegel Lübeck zwischen 1917 und 1936. Dieser Sachverhalt ist auf eine teilweise Verstopfung der Zuleitung des Schreibpegels in Travemünde zurückzuführen, die im Zeitraum 1917 bis 1926 nachgewiesen ist und sich wohl ähnlich zwischen 1934 bis 1936 bemerkbar gemacht hat.

Weitere Abweichungen lassen sich durch die Unsicherheit in der Dokumentation der Wasserstände erklären, die nicht nur am Pegel Flensburg auftritt (vgl. Tabelle 2), sondern ebenso in Kiel-Holtenau und Travemünde zu vermuten ist.

Die Wasserstände der stark von der Regressionsgeraden abweichenden Ereignisse wurden separat geprüft. Es zeigte sich, dass diese allgemein anerkannt sind und alternativlos weiterhin die bestmögliche Option darstellen.

Zur räumlichen Rekonstruktion der fehlenden Wasserstände am Pegel Flensburg dient damit die ermittelte lineare Regressionsgerade. Im nächsten Schritt werden so die fehlenden Wasserstände durch die jeweilige Regressionsbeziehung von Kiel-Holtenau und Travemünde auf Flensburg übertragen (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Räumliche Informationserweiterung der Wasserstände [cm] für die fehlenden Ereignisse aus dem Zeitraum 1900–1955.

	1900	1901	1902	1911	1912	1915	1916	1917	1918	1919	1920	1921	1923	1925
Kiel-Holtenau	-	95	136	-	-	-	114	-	-	-	-	-	-	-
Travemünde	126	102	126	106	108	99	95	85	81	53	63	79	61	73
Flensburg	136	103-120	140-136	123	124	118	120-115	109	106	87	94	105	93	101
	1926	1928	1930	1931	1932	1933	1937	1938	1944	1947	1951			
Kiel-Holtenau	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Travemünde	87	104	90	96	118	82	79	100	61	48	73			
Flensburg	110	122	112	116	130	107	105	119	93	84	101			

Es ist davon auszugehen, dass in den analogen Quellen zuverlässig über alle außerordentlichen Ostseesturmfluten berichtet wird. Vereinfacht wird der Mittelwert aus den übertragenen Werten aus Travemünde und Kiel-Holtenau für den Pegel Flensburg genutzt.

Damit konnte durch die Regressionsbeziehungen eine lückenlose Datenbasis von Extremwerten für den Pegel Flensburg von 1900 bis 2023 generiert werden.

3.5 Historische Informationen

Die Geschichte der Besiedlung der Ostseeküste ist geprägt von verheerenden Sturmhochwassern, die zum Teil die Werke ganzer Generationen zunichte gemacht haben. Ohne Zweifel sind Angaben über Ostseesturmfluten daher von hoher wissenschaftlicher und praktischer Relevanz.

Das höchste und erste sicher registrierte Sturmhochwasser der südlichen Ostseeküste ist am 12./13.11.1872 aufgetreten. Es forderte neben hohen materiellen Schäden auch über 200 Menschenleben, über 15.000 Menschen wurden obdachlos, hunderte Gebäude wurden

zerstört (Baensch 1875). Die Wasserstände dieser Ostseesturmflut wurden an verschiedenen Pegeln registriert, so dass dieses Ereignis gut zu rekonstruieren ist. Baensch (1875) gab nicht nur einen Überblick über den Verlauf dieses einmaligen Ereignisses, sondern auch über die meteorologischen Verhältnisse und die hervorgerufenen Veränderungen und Zerstörungen sowie über technische Folgerungen. Für den Pegel in Flensburg lässt sich ein Hochwasserstand von 331 cm ü. MW ableiten.

Über die Wasserstände der meisten früheren Ostseesturmflutkatastrophen ist dagegen oftmals nur wenig überliefert. Somit müssen historische Daten anhand von Wasserstandsmarken, Chroniken, Literatur und händischen Aufzeichnungen recherchiert und plausibilisiert werden. Da historische Ostseesturmfluten oft einschneidende Ereignisse für ganze Regionen darstellen, ist davon auszugehen, dass besonders hohe Wasserstände bzw. katastrophale Ereignisse in irgendeiner Form mehr oder weniger zuverlässig dokumentiert wurden.

Die ersten Hinweise auf eine Ostseesturmflut stammen aus dem Jahr 1044, bei denen zeitgenössische Literatur bruchstückhaft von einer *Ungeheure Sturmflut der Ostsee* bzw. „*Grosse Sturmflut*“ oder einfach nur „*Seeland!*“ spricht. Die Wasserstände sind nicht überliefert. Weitere Ereignisse an der Ostseeküste sind durch Chronisten für die Jahre 1304, 1320, 1449, 1625, 1694, 1784 und 1825 verzeichnet. Die Überlieferungen der Ereignisse konzentrieren sich jedoch meistens auf den Verlauf, das Ausmaß der Schäden und Todesopfer und nicht auf die Beschreibung der Wasserstände. Lediglich für die Ostseesturmflut von 1320 lassen Aufzeichnungen einen Wasserstand von 310 bis 320 cm ü. MW in Lübeck vermuten (Jensen und Töppe 1986, 1990). Dass Höheninformationen über einige dieser Ereignisse abgeleitet werden können, ist Hochwassermarken wie am Kompanietor in Flensburg (Abbildung 4) zu verdanken. Ähnliche Marken sind z. B. in Lübeck am Blauen Turm (vgl. Berg 1999), Travemünde oder Rostock zu finden.

Krüger (1910) beschreibt die drei Flutmarken in Flensburg am Kompanietor:

- 10.01.1694: 2,70 m ü. MW
- 19.12.1835: 2,54 m ü. MW
- 13.11.1872: 3,27 m ü. MW

Demnach reichten die Ostseesturmfluten vom 10.01.1694 und 19.12.1835 bis auf etwa 0,5 m bzw. 0,7 m an den Höchstwasserstand vom 13.11.1872 heran. Aufgrund der baulichen Gegebenheiten liegt die Vermutung jedoch nahe, dass Krüger bzw. seine Referenz die Hochwassermarken zum aktuellen MW gesetzt hat und somit den Meeresspiegelanstieg zwischen den Ostseesturmfluten vernachlässigte, bzw. entsprechende Kenntnisse dessen noch nicht vorhanden waren.

Bei historischen Überlieferungen ist zu beachten, dass die Genauigkeit der Informationen zu Zeit und Höhe in der Regel deutlich geringer ist als die der Pegelmessungen. Weiter stellt die Forderung der Homogenität, durch die sich ändernde Küstenform als auch die Rekonstruktion des MW, eine Herausforderung bei der Integration historischer Daten dar. Zuverlässige Messungen des *üblichen Standes* und des Höchstwasserstandes waren bis zur *Pegel-Instruction* nicht gängig. Daher sind diese historischen Informationen mit großer Aufmerksamkeit zu benutzen. Bevor historische Daten einer statistischen Analyse zugeführt werden, müssen diese daher entsprechend plausibilisiert werden.



Abbildung 4: Historische Sturmflutmarken für Ereignisse aus den Jahren 1694, 1835 und 1872 am Kompanietor (Schiffbrücke 12) in Flensburg; Fotografien bereitgestellt durch M. Dührkoop; [instagram.com/ostseesturmhochwasser/](https://www.instagram.com/ostseesturmhochwasser/).

In Tabelle 4 werden die Informationen über bekannte, historische Sturmhochwasserereignisse für ausgewählte Pegel an der deutschen, südwestlichen Ostseeküste zusammengefasst, die mutmaßlich einen Wasserstand von $> 2,0$ m ü. MW aufwiesen.

Tabelle 4: Liste außergewöhnlicher, bekannter Ostseesturmfluten der vergangenen 1.000 Jahre vor 1900 in Schleswig-Holstein in [cm ü. MW]; Werte denen nur geringe Glaubwürdigkeit geschenkt wird, werden geklammert *kursiv* geschrieben.

	Flensburg	Schleswig	Kiel	Lübeck	Travemünde	Bemerkung
1044	-	-	-	-	-	-
1304	-	-	-	-	-	<i>Ein neues Tief entsteht zwischen Rügen u. Ruden.</i>
13.11.1320	-	-	-	310-320	-	<i>Pommern bis Schleswig</i>
15./16.10.1449	-	-	-	-	-	<i>Preußen bis Schleswig</i>
10.02.1625	-	-	-	284	280	<i>W.-Preußen bis Schleswig</i>
10./11.01.1694	270	271	-	286 /290	265	<i>W.-Preußen bis Schleswig</i>
28.09.1784	-	-	-	(280)	-	<i>Pommern bis Schleswig</i>
19.12.1835	254	-	-	-	-	<i>Schleswig, dän. Inseln</i>
26.12.1836	-	275	-	220	222 (170)	<i>Pommern bis Schleswig</i>
13.11.1872	327/331	344 /325	317	338	332/340	<i>Westpreußen bis dänische Inseln</i>
25.11.1890	-	-	-	-	210	<i>westlich von Rügen</i>

Um die Wasserstände zu validieren und anschließend die fehlenden Werte auf Flensburg zu übertragen, werden Regressionsbeziehungen (vgl. Abbildung 3) genutzt. Dazu wird angenommen, dass die Ereignisse vom 19.12.1835 und 26.12.1836 dasselbe Ereignis darstellen. Dies lässt sich durch die zeitliche Ungenauigkeit von historischen Übertragungen rechtfertigen und der Tatsache, dass ein Ereignis am 19.12.1835 allein in Flensburg registriert wurde sehr unwahrscheinlich ist.

In Abbildung 5 werden die historischen Informationen von Flensburg in die Regressionsbeziehung zu den benachbarten Pegeln Kiel-Holtenau und Travemünde eingeordnet.

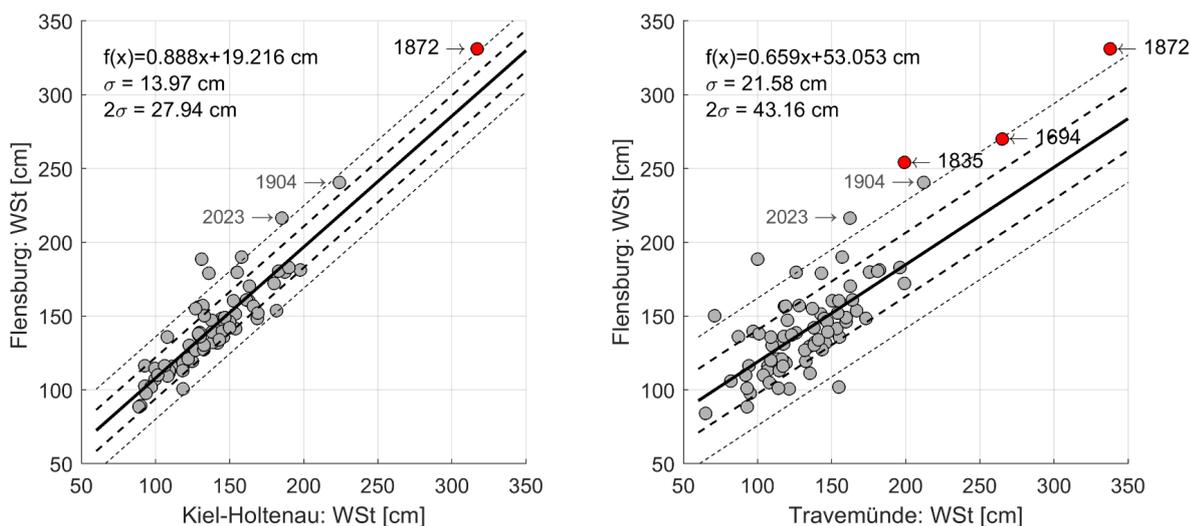


Abbildung 5: Einordnung der historischen Informationen (rot) in die Regressionsbeziehungen der Pegel Kiel-Holtenau (links) und Travemünde zum Pegel Flensburg (rechts).

Die historischen Wasserstände (rot) zeigen Abweichungen zu der ermittelten Regressionsbeziehung, die im Bereich bzw. oberhalb der 2-fachen Standardabweichung liegen. Dies kann einerseits durch die höhere Unsicherheit der Messungen und andererseits durch veränderte Abhängigkeiten bei hohen Wasserständen erklärt werden. Letzteres wird durch die Tatsache gestützt, dass die Ostseesturmfluten von 1904 und 2023 ebenfalls deutlich oberhalb der Regressionsgeraden liegen und somit ein ähnliches Verhalten wie die historischen Ereignisse aufweisen. Um das Maß an Unsicherheit in der Analyse zu minimieren, soll der historische Datensatz auf das früheste in Flensburg bekannte Sturmhochwasser (1694) limitiert werden. Somit gilt es lediglich das Ereignis von 25.11.1890 von Travemünde auf Flensburg durch die bekannte Regressionsbeziehung zu übertragen. Dies ergibt einen Wasserstand von 191 cm ü. MW. Da die historischen Ereignisse oberhalb der Regressionsgeraden liegen, ist jedoch anzunehmen, dass die Regressionsbeziehung den tatsächlichen Wasserstand tendenziell unterschätzt. Ohne weitere verfügbare Informationen, stellt dies jedoch eine objektive Aussage dar und wird somit weitergeführt.

Damit ist festzustellen, dass in Flensburg mindestens fünf Ereignisse in den letzten ~370 Jahren einen Wasserstand von ≥ 200 cm ü. MW erreicht haben und das Sturmhochwasser vom Oktober 2023 damit das fünfthöchste bekannte Ereignis darstellt (vgl. Abbildung 5).

Diese historische Hochwasser-Informationen stellen eine wertvolle Zusatzinformation dar, die die statistische Analyse verbessern kann. Dalrymple (1960) stellt fest: „[...] historische [...] Hochwasser sind vermutlich die effektivsten Daten, um Hochwasserhäufigkeiten zu ermitteln und, falls diese Daten zuverlässig sind, sollte ihnen das größte Gewicht bei der graphischen Ermittlung der

Verteilungen gegeben werden.“. Historische Informationen können sowohl für die Ermittlung der empirischen Wahrscheinlichkeiten als auch zur Parameterschätzung eingesetzt werden.

4 Integrierte Extremwertstatistik

Für den Hochwasserschutz der küstennahen Bereiche spielt die Kenntnis von Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter Wasserstände eine essenzielle Rolle. In den vergangenen sechs Dekaden wurden verschiedene extremwertstatistische Methoden entwickelt, die zur Ableitung von Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmter Wasserstände (oder umgekehrt) eingesetzt werden. Unter der Voraussetzung, dass die Eigenschaften der beobachteten hydrologischen Zeitreihe (Stichprobe) repräsentativ für das Sturmhochwassergeschehen sind, können die Extremwert-Verteilungsfunktionen angepasst und Wasserstände mit bestimmten statistischen Wiederkehrintervallen extrapoliert werden.

Die Zusammenführung von systematischen Pegelaufzeichnungen mit temporal, kausal und spatial aufgearbeiteten Daten in die Extremwertstatistik wird allgemein als *Integrierte Extremwertstatistik* bezeichnet. Durch diese Vorgehensweise wird eine homogene Datenbasis erarbeitet, die vertrauenswürdige Ergebnisse der statistischen Analyse erwarten lassen.

4.1 Integration der Informationserweiterung

Durch die Aufarbeitung von analogen Pegelinformationen in Kombination mit der räumlichen Informationserweiterung konnte eine lückenlose Amax-Zeitreihe für den Zeitraum von 1900 bis 2023 für den Pegel Flensburg zusammengestellt werden. Weiterhin konnten historische Ostseesturmfluten für den gleichen Pegelstandort recherchiert werden. Voraussetzung einer Extremwertstatistik ist eine unabhängige, identisch verteilte Stichprobe, was der Forderung der Lückenlosigkeit der Amax-Datenreihe nachkommt. Diese Voraussetzung ist für den Zeitraum von 1900 bis 2023 erfüllt. Um die historischen Ereignisse einzuordnen, ist es erforderlich, die Zeitreihe für die Zeitspanne bis mindestens 1650 synthetisch zu erweitern. DVWK (1999) empfiehlt dazu einen Ansatz, der die systematischen Datenreihen auf den historischen Zeitraum überträgt. Das Verfahren basiert auf IACWD (1982) und England et al. (2003). Es wird davon ausgegangen, dass alle Ereignisse größer einem Schwellenwert (auch solche innerhalb der systematischen Reihe) als eigene partielle Serie angesehen werden können, die innerhalb des Gesamtzeitraums sonst nicht überschritten wurden. Für die Ereignisse unterhalb des Schwellenwertes wird angenommen, dass diese „ordinäre“ Hochwasserereignisse darstellen, die im Mittel ähnlich über den historischen Zeitraum aufgetreten sind. Diese Hypothese ist aufgrund von Klimaschwankungen und Veränderungen der Bathymetrie nicht uneingeschränkt gültig, wird aber als praktikabler Ansatz herangezogen.

Der Schwellenwert stellt einen außerordentlichen Wasserstand dar, von dem angenommen werden kann, dass Wasserstände über dieser Signifikanzgrenze in der Vergangenheit in irgendeiner Form überliefert wurden. In der hydrologischen Literatur wird dies als *Detection Limit* bezeichnet. Dies liefert die wichtige Information, dass (wahrscheinlich) keine erwähnte Ostseesturmflut unterhalb dieser Grenze lag (vgl. Bulletin 17c (England et al. 2018)). Anhaltspunkte für dieses Signifikanzniveau bilden Wasserstände von Ostseesturmfluten in zeitlicher Nähe. In diesem Fall wird ein Wasserstand von 200 cm ü. MW gewählt. Dies stellt einen Schwellenwert dar, von dem angenommen werden kann, dass historisch

von Ereignissen diesen Ausmaßes berichtet wurde. Weiter stellt der Wasserstand die besonderen Ausmaße der Ostseesturmfluten von 1904 und 2023 dar.

Durch den Schwellenwert bilden sich zwei partielle Serien, bestehend aus den ordinären Ostseesturmfluten und aus den außergewöhnlichen Ostseesturmfluten. Um die chaotische Variabilität des Auftretens von Ostseesturmfluten zu berücksichtigen, wird das DVWK (1999)-Verfahren leicht modifiziert, bleibt aber in seiner Grundidee erhalten.

Um die bestehenden Datenlücken aus dem Zeitraum ab 1650 zu schließen, wird für die Stichprobe der ordinären Ostseesturmfluten die Generalisierte Extremwertverteilung (GEV) angepasst. Durch die Verteilungsfunktion werden stochastisch zufällig generierte Werte für jedes Jahr mit fehlendem Wert abgeleitet. Dabei wird berücksichtigt, dass der Schwellenwert nicht überschritten wird. Damit wird eine vollständige Datenbasis für den betrachteten Zeitraum generiert (vgl. Abbildung 6). Durch die Erweiterung ergibt sich so ein synthetischer Datensatz von 372 Jahren.

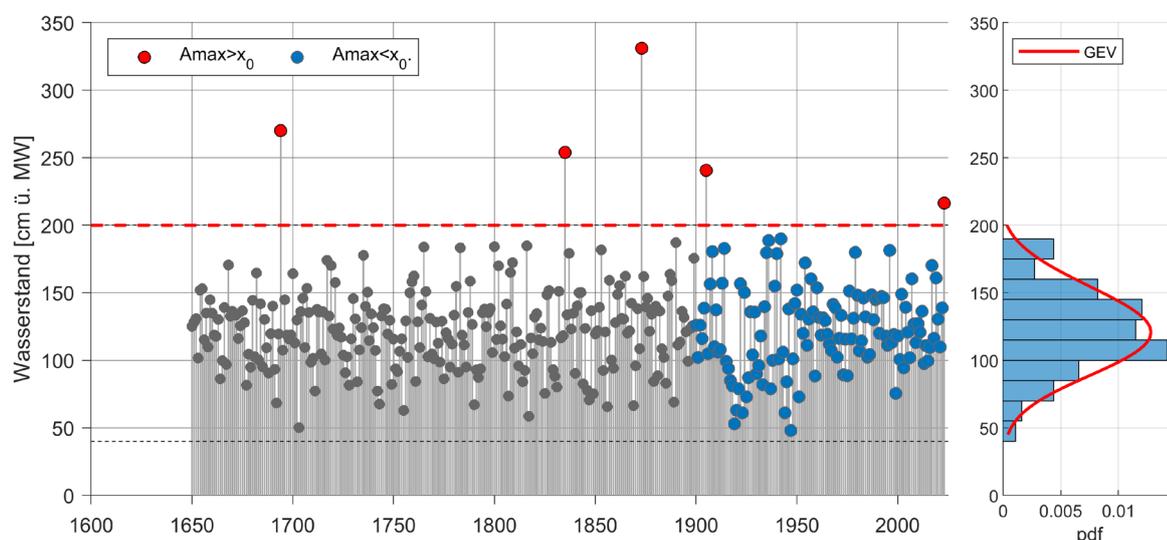


Abbildung 6: Möglichkeit der Integration von historischen Informationen in eine systematische Datenbasis am Beispiel des Pegels Flensburg.

4.2 Extremwertstatistische Analyse

Vor der Anpassung der analytischen Verteilungsfunktion an den erweiterten Datensatz, werden vorab die empirischen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten (p/p , *plotting positions*) bzw. davon abgeleitete statistische Wiederkehrintervalle ermittelt. Somit lassen sich ersten Schätzungen für das Auftreten, bzw. Nichtauftreten eines Ereignisses der Stichprobe durchführen. Die empirischen Wahrscheinlichkeiten dienen als Schätzer bzw. Erwartungswert für die Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit und bilden damit ein wichtiges Indiz für die Bewertung der Eignung der gewählten theoretischen Verteilungsfunktion. Zur Anpassung der empirischen Verteilungsfunktion wurden verschiedene Ansätze entwickelt (vgl. Chow 1964, Stedinger et al. 1993), über die Annahmen für die Verteilung getroffen werden können. Ob und wie Annahmen gerechtfertigt sind, bleibt offen. Makkonen (2008) weist nach, dass die unverzerrte Anwendung nach *Weibull* unabhängig von der jeweiligen Verteilungsfunktion hinreichend ist, da alle anderen Möglichkeiten auf ungerechtfertigten Annahmen beruhen. Für hydrologische Zwecke haben sich dennoch Annahmen zwischen *Weibull* und *Hazen* als praktikabel erwiesen (Gattermayr et al. 2011).

Zu beachten ist, dass die empirischen Wiederkehrintervalle statistisch nicht belastbar sind, da sie maßgebend auf Basis der Reihenlänge ermittelt werden, ohne dass dabei die Größe des jeweiligen Wasserstandes selbst berücksichtigt wird. So ist z. B. bekannt, dass die Ostseesturmflut von 1872 nicht nur das Extrem der vorliegenden Zeitreihe der letzten etwa 400 Jahre war, sondern mutmaßlich ebenso der letzten 1.000 Jahre (vgl. Jensen et al. 2022). In Tabelle 5 werden die empirischen Wahrscheinlichkeiten der fünf höchsten Ostseesturmfluten nach beiden Ansätzen beschrieben.

Tabelle 5: Ermittlung der empirischen statistischen Wiederkehrintervalle der Top 5 Ostseesturmfluten am Pegel Flensburg.

	2023	1904	1835	1694	1872
Rank i	5	4	3	2	1
Wasserstand [cm ü. MW]	216	238	254	270	331
T_{Weibull} [a]	75	93	124	187	331
T_{Hazen} [a]	82	106	149	270	744

Den jährlichen Maxima von Wasserständen an der Ostseeküste wird als Verteilungsfunktion eine GEV unterstellt, da Maxima unter sehr allgemeinen Bedingungen gegen Extremwertverteilungen konvergieren. Gemäß dem Fisher-Tippett-Theorem (Fisher und Tippett 1928, Gnedenko 1943) sind alle Grenzverteilungen von Teilmaxima oder Block Maxima ebenso GEV-verteilt (Neves und Fraga-Alves 2008). Die Verteilung findet in der hydrologischen Statistik breite Anwendung, da sie die *Gumbel* (Typ I), *Frechet* (Typ II) und *Weibull* (Typ III) Verteilungen vereint (Coles 2001). So „lässt die GEV die Daten entscheiden“, welche der Verteilungsfunktionen die beste Annahme darstellt, wobei durch die drei Parameter eine hohe Flexibilität erreicht werden kann. Die Parameter werden durch die Maximum-Likelihood Methode geschätzt. Mit der Annahme, dass alle Elemente derselben Stichprobe entstammen, kann die Verteilung nur auf stationäre Daten angewendet werden, d. h. Daten, die keinen Trend aufweisen. Diese Voraussetzung gilt durch die Relation der Wasserstände zum MW als erfüllt.

Die angepassten GEV-Funktionen auf Basis des erweiterten (1650–2023) und den systematischen Datensatzes (1955–2023) werden in Abbildung 7 gegenübergestellt. Als Maß der Unsicherheit der Parameterschätzung werden die 95 % Konfidenzintervalle (95-KI) dargestellt.

Durch die Integration von historischen Sturmhochwasser verschiebt sich die Verteilungsfunktion im bemessungsrelevanten Bereich vertikal nach oben, d. h. es ergeben sich für bestimmte Wiederkehrintervalle höhere Wasserstände. Weiter reduziert sich durch die größere Datenbasis das theoretische Unsicherheitsband in diesem Bereich deutlich, die Unsicherheiten der Grundannahmen sind dabei nach wie vor zu berücksichtigen. So liegen die *plotting positions* der vier höchsten Ereignisse deutlich oberhalb des 50 % Perzentils bzw. je nach Ansatz sogar außerhalb des Konfidenzintervalls. Diese Unsicherheit könnte durch eine weitere Informationserweiterung von bekannten Ostseesturmfluten bis 1044 (vgl. Jensen et al. 2023) verringert werden.

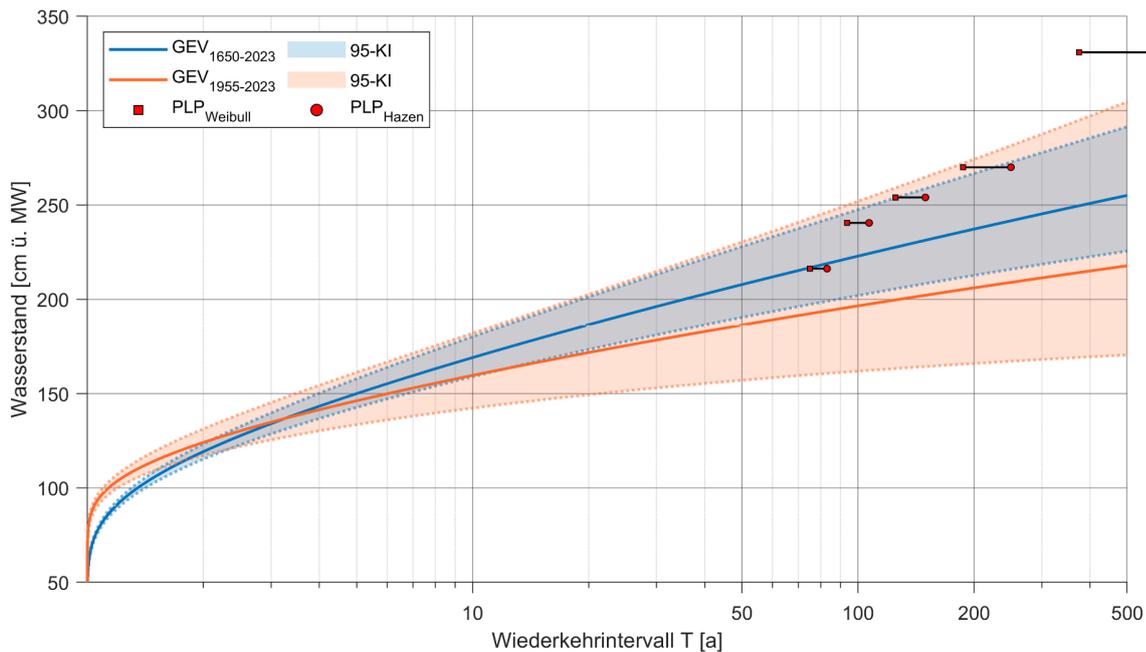


Abbildung 7: Gegenüberstellung der Verteilungsfunktion der systematischen Zeitreihe (1955–2023) (rot) und der Verteilungsfunktion als Resultat der Integrierten Extremwertstatistik (blau), inkl. der 95 % Konfidenzintervalle und Einordnung der empirischen Wahrscheinlichkeiten der 5 höchsten Ereignisse nach verschiedenen Ansätzen.

5 Ergebnisse

Durch die Integration der historischen Daten in die Extremwertstatistik verschiebt sich die Verteilungsfunktion für seltene und extreme Hochwasserereignisse nach oben, was zu höheren Wasserständen für bestimmte Wiederkehrintervalle führt. Gleichzeitig reduziert sich das Konfidenzintervall des statistischen Modelles, was die Verteilungsfunktion robuster werden lässt. Auf dieser Basis können die Wiederkehrintervalle der Wasserstände der höchsten beobachteten Wasserstände am Pegel Flensburg bestimmt werden.

In Abbildung 8 werden die Wasserstände der fünf höchsten Sturmhochwasser in die Verteilungsfunktion eingeordnet und deren Wiederkehrintervalle abgeleitet.

Die Einordnung der Wasserstände von 1904 und 1835 ergeben Wiederkehrintervalle von ca. 200 und 450 Jahren. Da die *plotting positions* der Wasserstände von 1694 und 1872 außerhalb des Konfidenzintervalls waren, wird von einer Ableitung der Wiederkehrintervalle abgesehen.

Für die Wasserstände des Sturmhochwassers vom Oktober 2023 ist dagegen eine robuste Abschätzung in Flensburg möglich. So lässt sich dem Wasserstand von 216 cm ü. MW ein statistisches Wiederkehrintervall von ca. 70 Jahren zuordnen. Diese Angabe liegt damit unterhalb der bisherigen Schätzungen anderer Autoren. Damit wird das Ereignis Aussagen eines „Jahrhundertereignisses“ statistisch nicht gerecht.

Weiter lassen sich belastbare statistische Kennwerte/Wasserstände bzw. Bemessungswasserstände ableiten, wie beispielsweise das HW_{200} , das als Sicherheitsstandard herangezogen wird. In Tabelle 6 werden für charakteristische Wiederkehrintervalle die ermittelten Wasserstände gegeben.

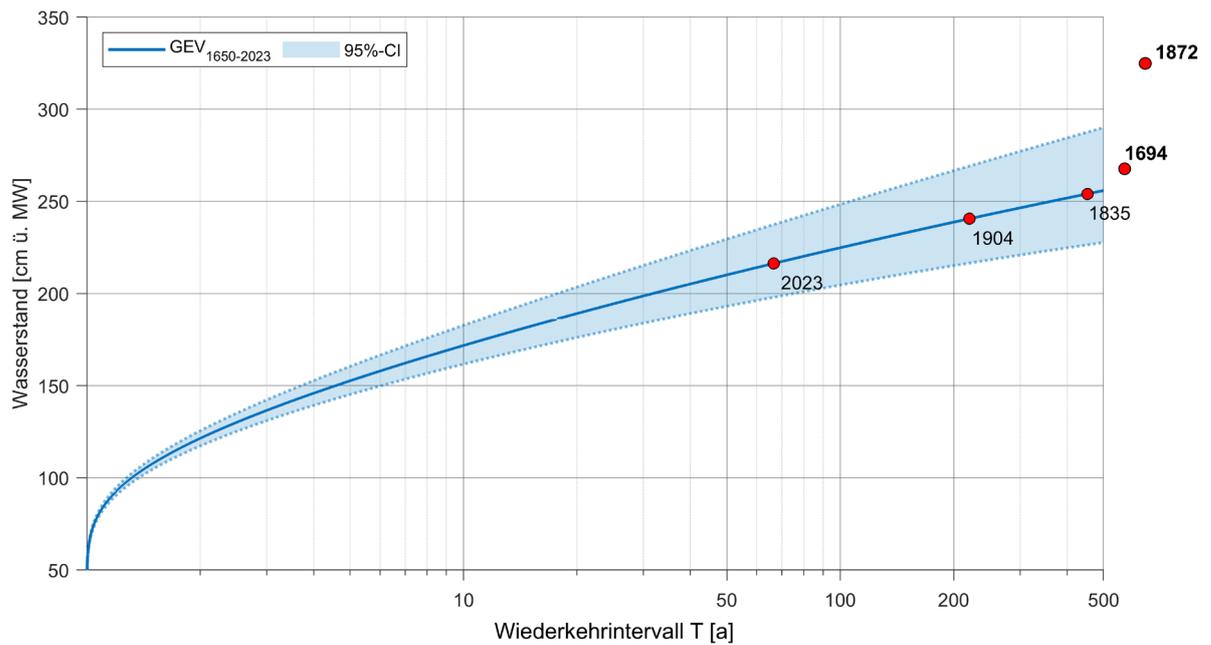


Abbildung 8: Einordnung der historischen Sturmhochwasser in Flensburg anhand der integrierten GEV bis zu einem statistischen Wiederkehrintervall von 500 Jahren.

Tabelle 6: Statistisch abgeleitete Wasserstände zu charakteristischen Wiederkehrintervallen auf Basis der synthetischen Zeitreihe von 1650 bis 2023 für den Pegel Flensburg.

T [a]	10	50	100	200	(500)
Wasserstand [cm ü. MW]	170	208	224	237	(256)

Für den der Bemessung zugrundeliegenden Wasserstand des HW_{200} ergibt sich für Flensburg ein Wasserstand von 237 cm ü. MW. Unter der Annahme eines MW_{2023} von 10 cm ü. NHN ergibt sich somit ein Wasserstand von 247 cm ü. NHN und bestätigt damit den aktuellen Bemessungswasserstand von 242 cm ü. NHN (vgl. MELUND 2022).

Die Genese von extremen Sturmhochwasserereignissen an der deutschen Ostseeküste ist relativ begrenzt, so dass sich auch die Wasserstandsausprägungen an der Küste, großräumig betrachtet, relativ ähnlich darstellten. Aufgrund der komplexen Bathymetrie bzw. Topografie (z. B. Buchten) können sich die Wasserstände örtlich jedoch auch unterschiedlich ausprägen. Dennoch ist nicht davon auszugehen, dass sich die statistische Einschätzung der jeweils betrachteten Sturmhochwasserereignisse am Pegel Flensburg wesentlich von benachbarten Stationen, z. B. Schleswig, Eckernförde und Kiel (vgl. Abbildung 1) unterscheidet.

6 Bewertung und Empfehlungen

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass die Integration historischer Informationen in die extremwertstatistische Analyse und Bewertung von Ostseesturmfluten, insbesondere bei extremen Ereignissen, d. h. mit sehr langen Wiederkehrintervallen, an der deutschen Ostseeküste nicht nur sinnvoll, sondern notwendig ist. Historische Daten erweitern die Grundlage der statistischen Modelle, verbessern die Belastbarkeit der Verteilungsfunktionen und

reduzieren die Unsicherheiten der Schätzungen, die mit der Vorhersage seltener Extremereignisse verbunden sind. Diese ergänzenden Daten sollten nicht als optional betrachtet werden, sondern als integralen Bestandteil jeder belastbaren Extremwertstatistik.

Das Außerachtlassen von historischen Werten (Hochwasserdemenz), zeigte in der jüngsten Vergangenheit, z. B. im Ahrtal 2021, welche katastrophalen Folgen damit einhergehen können. Die meist relativ langen Zeiträume zwischen zwei schweren Hochwasserereignissen dürfen keineswegs darüber hinwegtäuschen, dass extreme Hochwasserereignisse jederzeit wieder möglich sind. Dies gilt auch für ein Ereignis wie 1872.

Insofern stellt sich nicht die Frage, ob historische Informationen einfließen sollten, sondern lediglich wie mit Ihnen umgegangen wird. Eine Vielzahl an Pegeln existiert seit Mitte des 19. Jahrhunderts. Dennoch sind digital verfügbare Daten und Zeitreihen auf wenige Jahre (etwa seit 1950) begrenzt. Ergänzend oder alternativ zu aufwendigen Digitalisierungen von analogen Pegelschreibern, besteht die Möglichkeit der flächigen hydrodynamischen Rekonstruktion von historischen Ereignissen.

Die Integration historischer Daten stellt auch Herausforderungen dar. Die Plausibilisierung und Verifizierung historischer Daten sind unerlässlich. Leider sind aktuell die verfügbaren digitalen Pegeldaten sehr begrenzt, was häufig zu einer unzureichenden Datenbasis für robuste statistische Analysen führt. Für die Zukunft wird empfohlen, die Digitalisierung und systematische Aufarbeitung historischer Pegeldaten weiter voranzutreiben, damit diese als integraler Bestandteil der Extremwertstatistik genutzt werden können. Zudem sollten hydrodynamische Modelle stärker genutzt werden, um zeitliche und räumliche Lücken in der Datenbasis zu schließen.

Wasserstände, wie bei dem Sturmhochwasser vom 20./21. Oktober 2023, dem aktuell ein Wiederkehrintervall von ca. 70 Jahren in Flensburg – und vermutlich ähnlich an benachbarten Pegeln – zugeordnet werden kann, wird mit steigendem Meeresspiegel stets wahrscheinlicher. In Anbetracht des Klimawandels und der damit verbundenen Wirkung auf Extremereignisse ist es daher von zentraler Bedeutung, dass die Bemessungsverfahren für Küstenschutzanlagen auf den besten verfügbaren Daten basieren.

7 Literaturverzeichnis

Arns, A.: Regional to local assessment of extreme water levels – Methods and application to the northern part of the German North Sea coastline. Dissertation – Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen, Heft 7, 2014.

Baensch, O.: Die Sturmfluth an den Ostsee-Küsten des Preussischen Staates vom 12./13. November 1872. In: Zeitschrift für Bauwesen, Berlin, 1875.

Berg, G.: Beiträge zur Geschichte des Darßes und des Zingstes. Schriftenreihe des Vereins zur Förderung der Heimatpflege und des Darß-Museums, 1999.

BSH: Schwere Sturmflut vom 20. Oktober 2023 (Bericht). 2023. https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/_Anlagen/Downloads/Ostsee_Sturmflut_20231020.pdf?__blob=publicationFile&v=5M zuletzt geprüft am: 02.08.2024.

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

Coles, S.: An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>, 2001.

Dalrymple, T.: Flood-frequency analysis in Manual of Hydrology. U. S. Geological Survey Water Supply Paper 1543-A, 1960.

DVKW: Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen; Merkblätter zur Wasserwirtschaft H. 251. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V, 1999.

DWA-M 552: Stochastische und deterministische Wege zur Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten; Merkblatt der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), 2024.

Ekman, M.: The world's longest continued series of sea level observations. PAGEOPH, 127, 1, 73–77, <https://doi.org/10.1007/BF00878691>, 1988.

England, J. F., JR.; Salas, J. D.; Jarrett, R. D.: Comparisons of two moments-based estimators that utilize historical and paleoflood data for the log Pearson type III distribution. In: Water Resources Research, 39 (9), 2003.

England, J. F., Jr.; Cohn, T. A.; Faber, B. A.; Stedinger, J. R.; Thomas, W. O., Jr.; Veilleux, A. G.; Kiang, J. E.; Mason, R. R., Jr.: Guidelines for determining flood flow frequency – Bulletin 17C (ver. 1.1, May 2019): U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 4, chap. B5, <https://doi.org/10.3133/tm4B5>, 2018.

Fisher, R.; Tippett, L.: Limiting Forms of the Frequency Distribution of the Largest or Smallest Members of a Sample. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 24, 180–190, <http://dx.doi.org/10.1017/S0305004100015681>, 1928.

Gattermayr, W., Kölbl, C., Krammer, C., Lorenz, P., Maracek, K., Mathis, C. Wimmer M.: Leitfaden: Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 2011.

Hagen, G.: Vergleichung der Wasserstände der Ostsee an der Preussischen Küste, Abhandlungen der Königlich Akademie der Wissenschaften in Berlin. Königliche Akademie der Wissenschaften; Mathematische Abhandlungen der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften, 1878.

Hahn; Rietschel: Langjährige Wasserstandsbeobachtungen an der Ostsee. Berichte und Mitteilungen, Baltische Hydrologische Konferenz, 1938.

Henning, R.: Katalog bemerkenswerter Witterungsereignisse von den ältesten Zeiten bis zum Jahre 1800, (Abhandlungen des Preußischen Meteorologischen Instituts 2,4), 1904.

Hofstede, J.: Küstenschutz in Schleswig-Holstein: ein Überblick über Strategien und Maßnahmen. In: Die Küste, 87, 287–302, <https://doi.org/10.18171/1.087103>, 2019.

Hofstede, J.: Aktuelle Küstenschutzstrategien und zukünftige Herausforderungen: ein Überblick an der deutschen Küste. Vortrag auf dem 27. KFKI-Seminar am 14. November 2023, 2023.

Hupfer, P.; Harff, J. et al.: Die Wasserstände an der Ostseeküste. Entwicklung – Sturmfluten – Klimawandel. In: Die Küste, Sonderheft 66, 2003.

IACWD: Guidelines for determining flood flow frequency, Bulletin 17-B, Interagency Committee on Water Data, Hydrology Subcommittee, 1982.

Jensen, J.: Anwendungen der JENKINSON-Funktion zur Ermittlung von Bemessungsergebnissen. In: Mitt. Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, 1986.

Jensen, J.; Töppe, A.: Zusammenstellung und Auswertung von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 4, 1986.

Jensen, J.; Töppe, A.: Untersuchungen über Sturmfluten an der Ostsee unter spezieller Berücksichtigung des Pegels Travemünde. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 1/2, 1990.

Jensen, J.; Mai, H.; Beckmann, S.: Best estimates for historical storm surge water level and MSL development at the Travemünde/Baltic Sea gauge over the last 1,000 years. <https://doi.org/10.18171/1.092102>, 2022.

Kannenbergh, E.-G.: Extrem-Wasserstände an der deutschen Beltseeküste im Zeitraum 1901 bis 1954. Schriften des Naturwissenschaftlichen Vereins für Schleswig-Holstein, Band 28, 1, 1956.

Kelln, J.; Jensen, J.: Retrospektive der Meeresspiegelforschung in Deutschland –doi Teil 2: Deutsche Ostseeküste. 116. 60–67. [10.23784/HN116-09](https://doi.org/10.23784/HN116-09), 2020.

Krüger, G.: Über Sturmfluten an den deutschen Küsten der westlichen Ostsee mit besonderer Berücksichtigung der Sturmflut vom 30./31. Dezember 1904. Jahresbericht der Geogr. Gesellschaft zu Greifswald 1909/1910/1911, 1910.

Liebsch: Aufbereitung und Nutzung von Pegelmessungen für geodätische und geodynamische Zielstellungen. Dissertation, München, 1997.

Liu, X.; Meinke, I.; Weisse, R.: Still normal? Near-real-time evaluation of storm surge events in the context of climate change. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 22, 97–116, <https://doi.org/10.5194/nhess-22-97-2022>, 2022.

Makkonen, I.: Extreme Value Analysis and Order Statistics – Bringing Closure to the Plotting Position Controversy. *Communications in Statistics – Theory and Methods*, 37, 460–467, 2008.

MELUND: Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2022, 2022.

Petersen, M.; Rohde, H.: Sturmflut: Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe. Neumünster: Wachholtz, 1990.

StALU MV: Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Übersichtsheft 2009, 2009.

Stedinger, J. R.; Vogel, R. M.; Foufoula-Georgiou, E.: Frequency Analysis of Extreme Events. In: Maidment, D.R. (Ed.): *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill Inc., New York, 1993.

Weichbrodt, F.; Zarncke, T.; Sommermeier, K.; Klee, A.; Schlamkow, C.: Grundlagen für Entwurf, Bemessung und Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzanlagen in Mecklenburg-Vorpommern. In: *Die Küste*, 80, 143–162, 2013.

WSV: Sturmflut Oktober 2023 im Bereich der Deutschen Ostseeküste. 2023.
https://www.wsa-ostsee.wsv.de/Webs/WSA/Ostsee/DE/SharedDocs/Kurzmeldungen/2023_11_28_Sturmflut_Oktober_2023.html, zuletzt geprüft am: 02.08.2024.