

Ablauf der Ostseesturmflut vom Oktober 2023

Hervig Nöthel¹, Volker Neemann², Laura Hausmann³, Hagen Bauerhorst³ und Nico Schwuchow³

¹ *Ehemals Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Ostsee, Fachbereich Ersatzinvestitionen und Fachdienste, Fachdienst Gewässerkunde, hervig.noethel1@gmail.com*

² *Ehemals Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Abteilung U Umwelt, Technik, Wassertouristik, U12 – Dezernat Gewässerkunde, Wasserbewirtschaftung*

³ *Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Ostsee, Fachbereich Ersatzinvestitionen und Fachdienste, Fachdienst Gewässerkunde*

Zusammenfassung

Vom 19. bis zum 21.10.2023 traf eine extreme Sturmflut den gesamten Bereich der 2.582 km langen deutschen Ostseeküste mit ungewöhnlich selten eintretenden hohen Wasserständen. Dieses Ereignis bedeutete für Schleswig-Holstein eine sehr schwere Sturmflut und für Mecklenburg-Vorpommern eine schwere Sturmflut. Vor allem im nördlichen Küstensaum Schleswig-Holsteins, einschließlich der Schlei, erreichten die Scheitelwasserstände Höhen, die vielfach die zweithöchsten seit dem Beginn der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen vor nahezu 200 Jahren waren. Ursachen der Sturmflut waren neben dem Vorfüllungsgrad der Ostsee im Bereich von mehreren Dezimetern insbesondere der durch einen Vb-Zyklon mit Sturm bis orkanartigen Winden aus östlichen Richtungen hervorgerufene Windstau im Zusammenwirken mit den Beckenschwingungen (Seiches) der verschiedenen Meeresabschnitte. Die besondere meteorologische Situation führte entlang der Ostsee zu einer sehr langen Dauer von hohen Wasserständen. Der folgende Text enthält eine Untersuchung und Darstellung des abgelaufenen Wasserstandsgeschehens sowie die Verknüpfung mit Aspekten der Meteorologie.

Schlagwörter

Sturmflut, deutsche Ostseeküste, Pegel, Extremwasserstände, Vb-Zyklon, Seiches, Verweilzeiten, Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Ostsee

Summary

From October 19th -21st, 2023, an extreme storm surge hit the entire area of the 2,582 km long German Baltic Sea coast which leads to extremely rare high water levels. The event falls in the category of a very severe storm surge for Schleswig-Holstein and a severe storm surge for Mecklenburg-Western Pomerania. Particularly in the northern Schleswig-Holstein coastal area, including the Schlei, the peak water levels reached heights that were in many cases the second highest in the almost 200 years of recordings. In addition to the pre-filling of the Baltic Sea by several decimeters, the main causes of the storm surge are the wind build-up caused by a Vb cyclone with storm to hurricane-like winds from the east and the basin oscillations (seiches) in the various sections of the sea. This special meteorological situation led to a very long period of high water levels along the western Baltic Sea coast. The following text contains an analysis and description of the past water level events as well as a link to meteorological aspects.

Keywords

storm surge, German Baltic coast, gauge, extreme water levels, Vb-cyclons, seiches, residence times, Baltic Sea Waterways and Shipping Office

1 Einleitung

Vom 19. bis 21.10.2023 wurde die Ostseeküste von Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern von einer der schwersten Sturmfluten seit dem Beginn der Wasserstandsaufzeichnungen vor nahezu 200 Jahren heimgesucht.

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Rostock gab bereits am 17.10.2023 mittags eine erste Warnung für eine am 19.10.2023 anstehende Sturmflut heraus, die bis zum 21.10.2023 andauern würde. Am 19.10.2023 wurden als erwartete Maximalwasserstände 2,00 m über dem mittleren Wasserstand im Gebiet Flensburg und bis zu 1,50 m über dem mittleren Wasserstand östlich von Rügen angegeben. Der Maximalwert für das Gebiet Flensburg wurde später auf 2,10 m über dem mittleren Wasserstand erhöht. Die Aufhebung der Warnung zur Sturmflut erfolgte durch das BSH Rostock am 21.10.2023 um 10⁴⁵ Uhr (MESZ).

Nach der vom BSH Rostock festgelegten Klassifikation von Sturmfluten (Stand 02.05.2024: https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/sturmfluten_node.html) bestand die Gefahr einer schweren Sturmflut; insbesondere entlang der schleswig-holsteinischen Ostseeküste war sogar teilweise mit einer sehr schweren Sturmflut zu rechnen.

In dieser Ausarbeitung wird die die Sturmflut beeinflussende Wetterlage dargelegt. Weiterhin werden die an den verschiedenen Pegelstationen des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes (WSA) Ostsee offiziellen Wasserstandsdaten in ihren zeitlichen Verläufen, einschließlich ihrer Ursachen und verschiedenen Charakteristika, beschrieben.

Das WSA Ostsee betreibt und unterhält im Rahmen der gesetzlichen Aufgabenwahrnehmung entlang der deutschen Ostseeküste ein erforderliches Wasserstandsmessnetz, welches durch weitere gemessene Parameter untermauert wird. Die bei der Sturmflut gemeldeten Wasserstände wurden durch dieses Pegelnetz registriert und sind im Nachhinein plausibilisiert worden.

2 Wetterlage

2.1 Tiefdruckgebiet

Sturmfluten in der südlichen Ostsee werden durch besondere Wetterlagen ausgelöst, bei denen die Tiefdruckgebiete der Westwinddrift in charakteristischer Weise die Ostsee überqueren. Die stärksten aperiodischen Fluktuationen der Wasserstände im Bereich der deutschen Ostseeküste verursachen dabei über die Ostsee ziehende Sturmzyklone. Die Zugbahnen dieser Zyklone sind dabei von ganz wesentlicher Bedeutung für die Ausprägung und Genese der eintretenden Sturmfluten. Insbesondere Windfelder mit Windrichtungen aus Nordost bewirken einen erheblichen Aufstau des Wassers an der südwestlichen Ostseeküste. Entscheidend für die Höhe der Sturmflutwasserstände ist dabei die vorausgegangene Luftdruck- und Windentwicklung über der gesamten Ostsee (Sager und Miehle 1956).

Etliche Autoren beschreiben die Zugbahnen der sturmflutrelevanten Zyklone, wobei dazu in Möller (2011) eine generalisierte Zusammenfassung zu finden ist. Die Abbildung 1 zeigt in vereinfachter Form den Verlauf der Zugbahnen von sturmflutauslösenden Zyklonen sowie ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Zeitspanne 1953 bis 1997 für die am Pegel Warnemünde registrierten Sturmfluten.

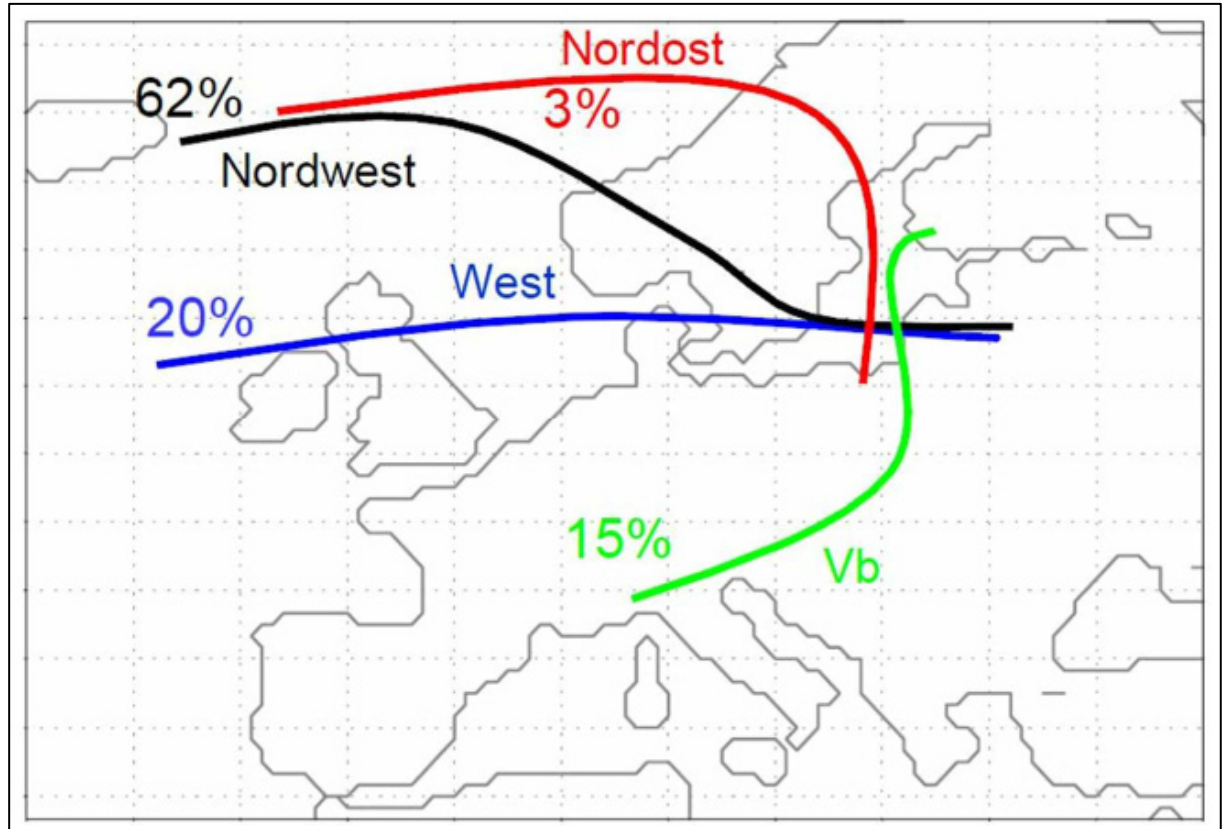


Abbildung 1: Vereinfachte Übersicht der Zugbahnen von Sturmflut auslösenden Zyklonen nach Kohlmetz (1964). Wahrscheinlichkeiten nach Meinke (in Hupfer et al. 2003) für die Zeitspanne 1953–1997 für den Pegel Warnemünde (Schmitz 2007) – Abbildung entnommen aus Möller (2011).

2.2 Witterung

Wenige Tage vor der im Oktober 2023 im Bereich der westlichen Ostsee beginnenden Sturmflut hatte sich zunächst ein langgestrecktes, von der Westküste Spaniens über den Golf von Biskaya bis nach Großbritannien und Irland reichendes Tiefdruckgebiet mit zwei zentralen Kernen gebildet. Dieses verstärkte sich anschließend deutlich bis hin zu einem Zyklon, wobei dieser weiter als komplexes Gebilde mit sich ständig neu bildenden Tiefdruckkernen entlang der Nordseeküste nordwärts in Richtung der Niederlande und dem Ärmelkanal zog. Auf dieser Zugbahn kam es dabei in etlichen betroffenen Gebieten vielfach zu kräftigen Niederschlägen. Des Weiteren lag zeitgleich in der Nacht vom 17. auf den 18.10.2023 über Spitzbergen ein ausgeprägtes Hochdruckgebiet, welches unter weiterer Verstärkung in Richtung der Lofoten und Nordschweden weiterwanderte. Nach dem Erreichen des Bereichs der Ostsee traf der Zyklon auf das über Skandinavien liegende stabile Hochdruckgebiet.

Bedingt durch die vorhandene und nur selten eintretende meteorologische Konstellation mit dem zyklonal (gegen den Uhrzeigersinn) drehenden Tiefdruckgebiet und dem antizyklonal (im Uhrzeigersinn) drehenden Hochdruckgebiet, baute sich vom Ärmelkanal bis nach Südschweden/Südnorwegen ein sehr signifikant ausgeprägter und langanhaltender Luftdruckgradient mit einer engen Isobarendrängung auf. Infolge dieser besonderen meteorologischen Situation drehte der ursprünglich aus süd-südwestlicher Richtung kommende Wind kurzfristig auf Ost und es stellte sich ein starker Wind ein, mit im Bereich der deutschen Ostseeküste aufgetretenen Sturmstärken von Bft 8 bis 9, vereinzelt mit schwerem Sturm mit Bft 10. Im Laufe des 20.10.2023 erreichte der Sturm seinen Höhepunkt mit wiederholten orkanartigen Böen der Stärke Bft 11.

Das eingetretene Ereignis wird in der Literatur als Vb-Zyklon (Baerens 1998, Baerens et. al. 1994 und Möller 2011) bezeichnet (vgl. Kapitel 2.1).

Seitens des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurde auf der Homepage unter der Rubrik „Thema des Tages“ am 18.10.2023 eine Mitteilung zum bevorstehenden Wettergeschehen mit einem besonderen Küstensturm herausgegeben (Stand 02.05.2024 https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2023/10/18.html). Die vorhergesagte Wetterlage mit den berechneten Druckgebieten ist aus der Abbildung 2 ersichtlich.

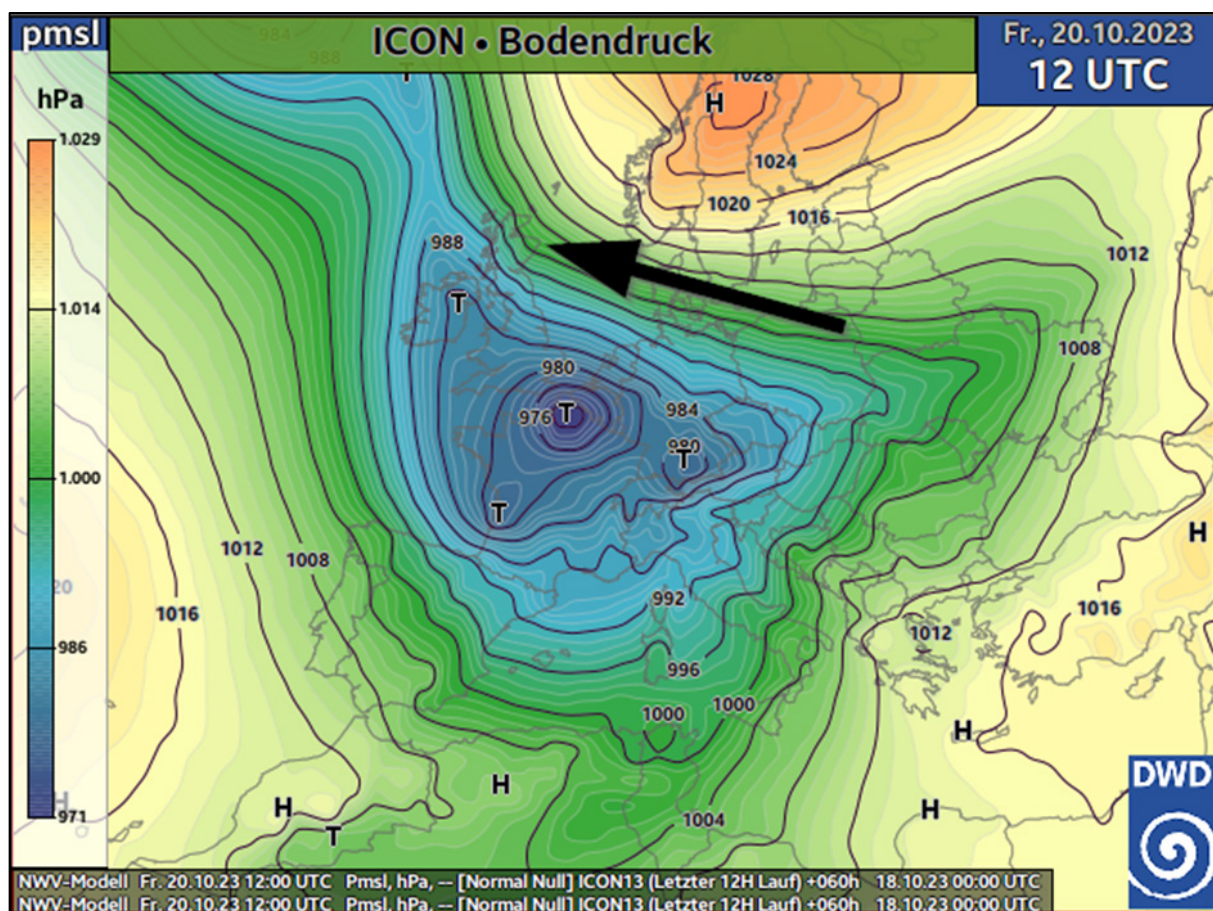


Abbildung 2: Vorhersage des DWD vom 18.10.2023 der Druckgebiete für den 20.10.2023, 13 Uhr MEZ mit einem ausgeprägten Tief im Ärmelkanal/Benelux und einem Hoch über Südschweden aus dem Modell des DWD. Der schwarze Pfeil kennzeichnet den auftretenden Wind im Bereich der hohen Luftdruckgegensätze (https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2023/10/18.html).

Deutlich erkennbar ist, dass im Zentrum des Hochdruckgebiets ein Bodendruck mit 1.028 hPa vorhergesagt wurde, während dieser im Kern des Tiefdruckgebiets mit 976 hPa prognostiziert wurde.

2.3 Wetter

Die während der Zeitspanne 10. bis 30.10.2023 an den vom DWD betriebenen Wetterstationen Kiel-Holtenau, Fehmarn, Boltenhagen und Arkona gemessenen stündlichen Windgeschwindigkeiten als Terminwerte sind in der Abbildung 3 dargestellt. Angemerkt sei, dass in diesem Kapitel bei sämtlichen Daten die zeitliche Zuordnung MEZ ist. Aus der Abbildung 3 ist erkennbar, dass an der exponiert an der Nordspitze der Insel Rügen liegenden Station Arkona im Vergleich zu den anderen drei genannten Stationen meistens größere Geschwindigkeiten registriert wurden. Während der Zeit der Sturmflut traten an der Station Arkona Windgeschwindigkeiten von bis zu 26 m/s auf, was einem schweren Sturm (Windstärke 10 Bft) entspricht. An den anderen Messstationen lagen die Windgeschwindigkeiten deutlich darunter (maximal ca. 18 m/s $\hat{=}$ stürmischer Wind, 8 Bft).

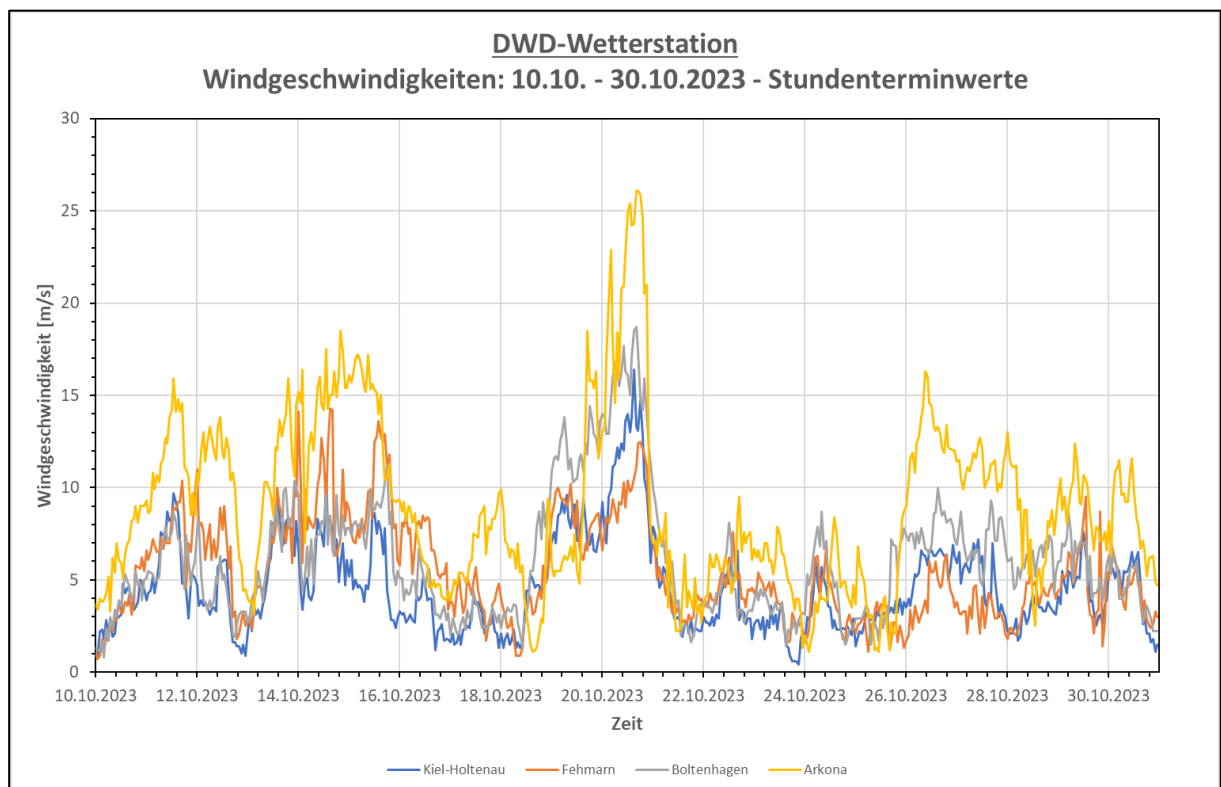


Abbildung 3: Windgeschwindigkeiten aus gemessenen Stundenterminwerten der DWD-Wetterstationen Kiel-Holtenau, Fehmarn, Boltenhagen und Arkona vom 10.10. bis 30.10.2023 (Daten: Deutscher Wetterdienst Hamburg).

Die zu den Windgeschwindigkeiten der o. a. Stationen zugehörigen stündlichen Windrichtungen sind in der Abbildung 4 aufgetragen. Festzustellen ist, dass sich die Wetterlage zur Zeit der Sturmflut für den Bereich der südwestlichen Ostsee in drei Phasen einteilen lässt. Vom 10. bis 18.10.2023 waren bei allen genannten Messstationen vorherrschende Winde aus dem südlichen bis nordwestlichen Sektor zu verzeichnen. Danach trat an allen Stationen ein Wetterumschwung mit einer sehr abrupten Änderung der Windrichtung auf den

östlichen Sektor ein, die nahezu konstant bis zum Beginn des 21.10.2023 anhielt. Während dieser Zeitspanne baute sich der Wind kontinuierlich zu einem Sturm mit Orkanspitzen auf. Anschließend drehte der Wind langsam wieder über den südlichen Sektor in westliche Richtungen. Aus der Abbildung 4 ist ersichtlich, dass ab dem 24.10.2023 wieder Winde aus südlichen und vermehrt aus östlichen Richtungen auftraten, wobei die Windgeschwindigkeiten aber lediglich Stärken von 3 bis 5 Bft ($\cong 3,4 - 10,7$ m/s), bei der Station Arkona teilweise bis Stärken von 6 bis 7 Bft ($\cong 10,8 - 17,1$ m/s) erreichten (vgl. Abbildung 3).

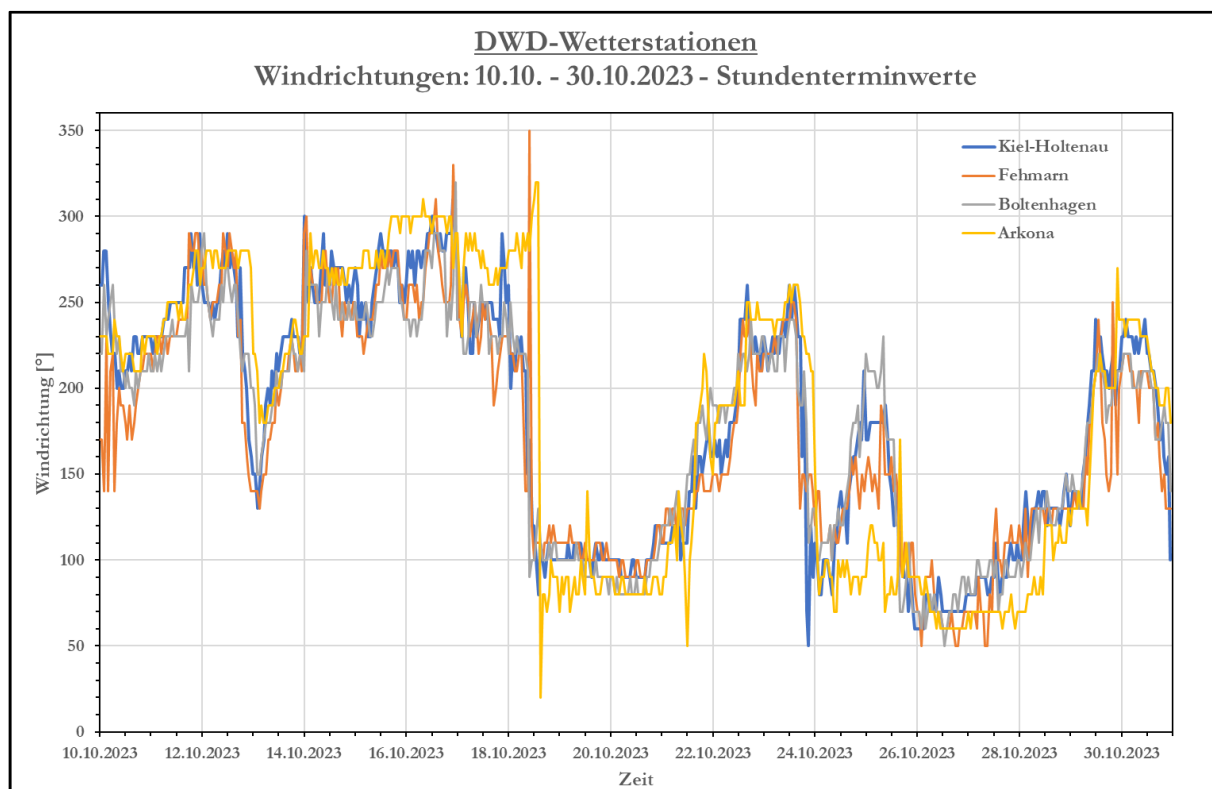


Abbildung 4: Windrichtungen aus gemessenen Stundenterminwerten der DWD-Wetterstationen Kiel-Holtenau, Fehmarn, Boltenhagen und Arkona vom 10. bis 30.10.2023 (Daten: Deutscher Wetterdienst Hamburg).

In Ergänzung zu den vom DWD erfassten Winddaten sind in der Abbildung 5 die an der vom WSA Ostsee betriebenen Messstation Marienleuchte aufgezeichneten Daten zu den Parametern Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Wasserstand aufgetragen. Die Verbindung zwischen den Parametern Wind und Wasserstand wird im Kapitel 3 behandelt. Aus der Abbildung 5 ist erkennbar, dass bis zum Mittag des 18.10.2023 der Wind aus westlicher bis nordwestliche Richtung mit Windgeschwindigkeiten zwischen etwa 5 und 10 m/s (\cong Windstärke 4 – 5 Bft) wehte. Nach einer kurzen Dauer der Windstille erfolgte dann eine abrupte Windrichtungsänderung auf Ost, die bis zum Mittag des 21.10.2023 anhielt. Der Wind nahm kontinuierlich zu und erreichte am Abend des 20.10.2023 maximale Windgeschwindigkeiten von fast 30 m/s (\cong einem orkanartigen Sturm mit einer Stärke von 11 Bft). Danach drehte der Wind über den südlichen Sektor in Richtung Westen und nahm an Stärke schnell und deutlich ab. Während der Dauer des schweren Sturms stieg am Pegel Marienleuchte der Wasserstand kontinuierlich an und erreichte kurz vor Mitternacht des 20.10.2023 den Höchstwasserstand von 1,66 m über Normalhöhen Null (NHN) als Bezugspunkt im Deutschen Haupthöhensystem 2016 (DHHN2016). Anschließend erfolgte

ein sehr schneller Fall des Wasserstandes auf das Niveau des Wasserstandes der Vorfüllung von ca. 0,30 m über NHN (System DHHN2016). Deutlich trat eine Phasenverschiebung zwischen Windstärke und Wasserstandsanstieg hervor. Dem Scheitel im Wasserstand vom 15.10.2023 gegen Mittag folgte ein weiterer Zwischenhochstand am Abend desselben Tages bei gleichbleibender Windrichtung. Ähnlich verhielt es sich bei dem Sturmflutscheitel am 20./21.10.2023. Der Wasserstand stieg weiter an, obwohl die Windgeschwindigkeit abnahm. Es müssen daher noch weitere Einflussfaktoren mitgewirkt haben (vgl. Kapitel 3.4).

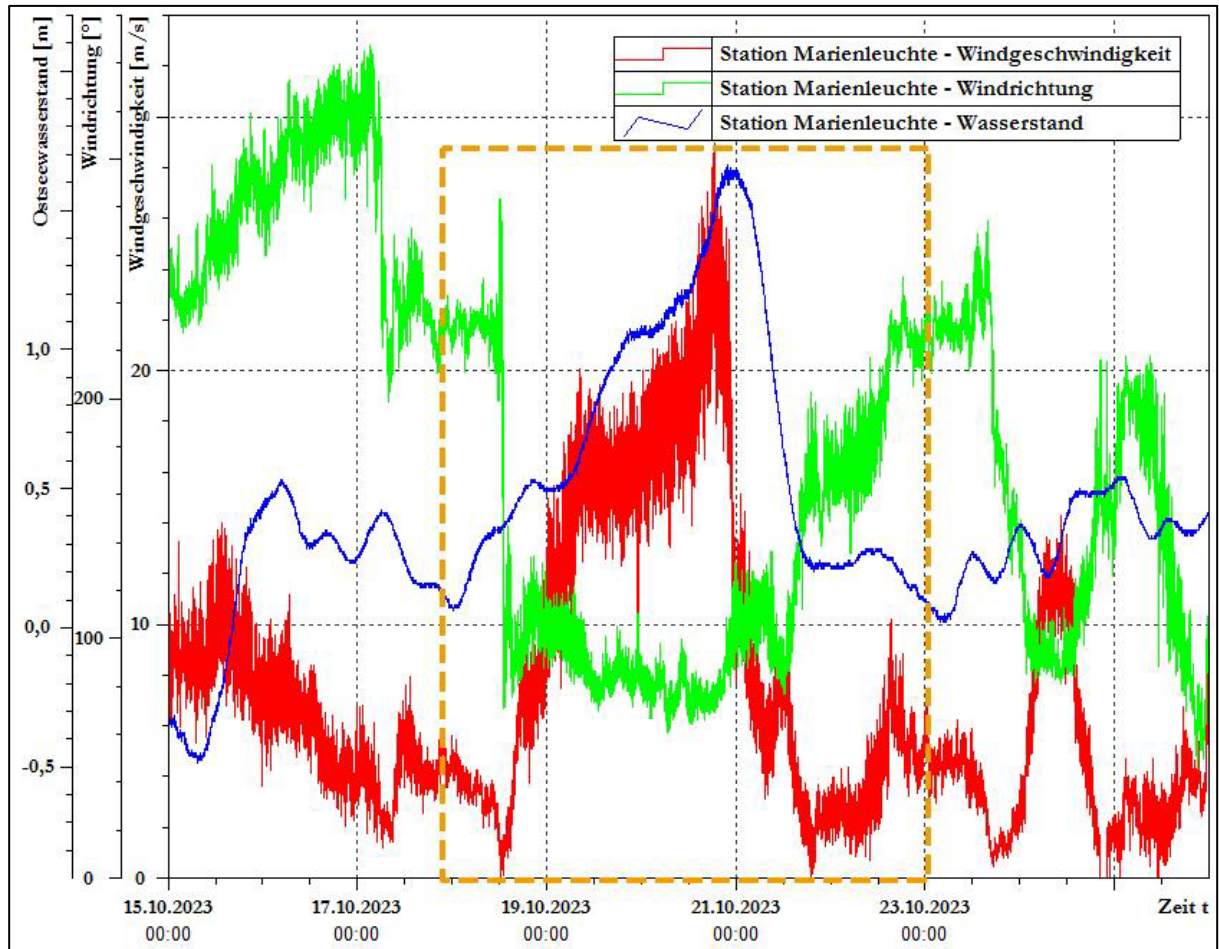


Abbildung 5: An der vom WSA Ostsee betriebenen Station Marienleuchte gemessene Windgeschwindigkeiten und -richtungen sowie Wasserstände (Ostseewasserstand in m über NHN (System DHHN2016)) vom 15. bis 25.10.2023. Die gestrichelte Umrandung umfasst den Zeitbereich mit den wesentlichen, während der Sturmflut eingetretenen, meteorologischen und hydrologischen Änderungen.

Ergänzt sei, dass Windstärken bis 10 m/s bei westlichen und südlichen Winden den Wasserstand „nur“ um bis zu ca. 3 dm angehoben haben (vgl. Abbildung 5 vom 15. bis 18.10.2023 12 Uhr und vom 21. bis 23.10.2023 ca. 18 Uhr). Bei dem erneuten Wechsel der Windrichtung von West auf Ost am 23.10.2023 mit Zunahme der Windstärke stieg der Wasserstand um 1 bis 2 dm an. Ferner ist aus der Abbildung 5 während der Zeiten vom 16. bis 18.10.2023 sowie vom 23. bis 24.10.2023 mittags der Effekt der Buchtenschwingung zwischen Kieler Bucht und Lübecker Bucht, der unterschiedlich stark ausgeprägt ist, erkennbar.

3 Wasserstandsaufzeichnungen

3.1 Messorte

Im Bereich der deutschen Ostsee werden durch das WSA Ostsee, welches eine Unterbehörde innerhalb der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) des Bundes ist, an 42 Pegelstationen kontinuierlich die Wasserstände in 1-minütigen Inkrementen erfasst. Von diesen Stationen liegen 14 Pegel in Schleswig-Holstein und 28 Pegel in Mecklenburg-Vorpommern (vgl. Abbildung 6). Die einzelnen Pegelanlagen sind gemäß den Vorgaben des Handbuchs Moderne Pegel (2015) sowie der Pegelvorschrift (1997) baulich errichtet und technisch ausgestattet. An den einzelnen Pegeln werden die Wasserstände im Hauptsystem mittels Schwimmertechnik in einem Schacht erfasst. Der gedrosselte Wasserzulauf zum Schacht, was einer Tiefpassfilterung entspricht, eliminiert die kleinen Wellen (Kapillar- und Schwerewellen mit kleiner Periode und geringer Amplitude), so dass nur die etwas längeren und für die Bemessung relevanten Informationen gemessen werden. Die Redundanzenanlagen mittels Druckdosen stehen bei Ausfällen der Schwimmersysteme zur Verfügung. Bis auf die Pegelstandorte Leuchtturm (LT) Kalkgrund, Schleimünde SP (Seepegel), LT Kiel und Marienleuchte stehen alle Anlagen direkt in Nähe der Ufer.



Abbildung 6: Pegelstandorte des WSA Ostsee.

Da an den Bundeswasserstraßen überwiegend die WSV ein Wasserstandsmessnetz unterhält, sind alle anderen Interessierten, insbesondere die Bundesländer, auf die mit dem Messnetz erhobenen und bereitgestellten Daten angewiesen. So stellt im Hochwasserfall in der Ostsee das Pegelmessnetz der WSV für die im Bereich der deutschen Ostseeküste liegenden beiden Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein eine

grundlegende Informationsquelle zur Erkennung der Entwicklung des eintretenden Wasserstandes im Küstenraum dar.

Die Pegelstationen im Amtsbereich des WSA Ostsee haben während der Sturmflut vom Oktober 2023 i. d. R. korrekte Werte aufgezeichnet und übertragen. Bedingt durch kurz vor dem Eintritt des Hochwasserscheitels erfolgter Stromabschaltung an den Stationen Flensburg und Langballigau (betroffen war jeweils lediglich das Hauptsystem, die Redundanzsysteme hatten weiterhin Daten online übertragen) sowie Kappeln und Schleswig gab es während der Sturmflut temporär teilweise keine Übertragung aktueller Messdaten. Aufgrund der autarken temporären Stromversorgung mittels Batteriebetrieb der Redundanzsysteme, teils auch der Hauptsysteme, wurden die nicht automatisch übertragenen Daten aber größtenteils gespeichert und konnten nachträglich manuell ausgelesen werden.

3.2 Wasserstandshöhen

Sturmfluten sind durch starken Wind verursachtes Ansteigen des Wassers an der Meeresküste und in den Flussmündungen im Küstengebiet, wenn Wasserstände einen bestimmten Wert überschreiten (DIN 4049, T3). In dieser Untersuchung wird das Sturmflutgeschehen analog dem Vorgehen seitens des BSH durch die Wasserstandshöhe von mindestens 1,00 m über generalisiertem mittlerem Wasserstand eingegrenzt.

3.2.1 Einflussgrößen auf die Wasserspiegellage

Die im Bereich der deutschen Ostseeküste eintretenden Sturmfluten weisen infolge der besonderen Bedingungen in der Ostsee eine spezielle Genese auf. Der größte Anteil an der Entstehung einer Sturmflut in der Ostsee ist auf den Windstau zurückzuführen, wobei infolge auflandiger Winde in Flachwassergebieten der Küste dadurch in kurzer Zeit größere Wasserstandsänderungen oberhalb des Mittelwassers erfolgen können. Ein weiterer Bestandteil der Wasserstandsschwankungen in der Ostsee, der ebenfalls häufig im Zusammenhang mit Sturmfluten auftritt, sind die Eigenschwingungen (Schwungungsstau) des Ostseebeckens, die den Wasserstand teilweise deutlich erhöhen können. Die Eigenschwingungen werden gemäß DIN 4049, T3 auch als Seiches bezeichnet. Der Füllungsgrad der Ostsee hat einen weiteren nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Höhe des Wasserstandes. In der Literatur wird der Füllungsgrad vielfach als die Abweichung des Wasserstandes gegenüber dem am Pegel Landsort vorhandenen Mittelwasser angegeben. Dieser südlich von Stockholm gelegene Pegel befindet sich etwa im Knotenbereich der am häufigsten auftretenden einknotigen Eigenschwingung der Ostsee (Hupfer et. al. 2003). Durch seine geographische Lage wird hier der Füllungszustand des Meeres und die daraus resultierende Volumenänderung in den Wasserstandsschwankungen repräsentativ wiedergegeben. In den entlang der deutschen Ostseeküste vorhandenen Buchten mit ihren unterschiedlichen Bathymetrien können bei Sturmfluten, infolge von Stauwirkungen bei auflandigem Wind, die Wasserstände zusätzlich erhöht werden. Angemerkt sei, dass der Einfluss der Gezeiten auf die Sturmflutwasserstände lediglich von untergeordneter Bedeutung ist.

In der Abbildung 7 sind die Entstehungsursachen von Sturmfluten in ihrer ungefähren Größenordnung für die Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern bildhaft aufgetragen.

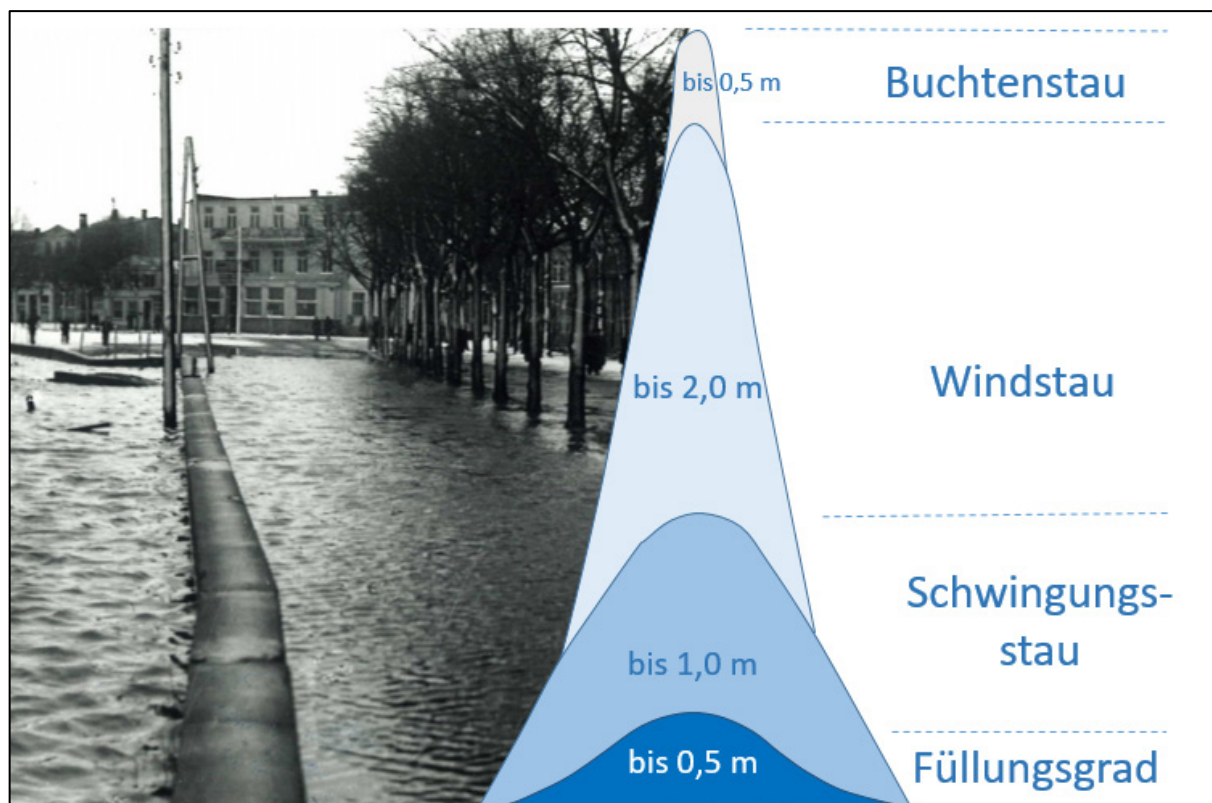


Abbildung 7: Entstehungsursachen von Sturmfluten in der Ostsee (Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern Übersichtsheft 2009).

Für die Differenzierung der Ostseesturmfluten sind in der Tabelle 1 die relevanten möglichen Bestandteile einer Sturmflut zusammengestellt (Möller 2011). Je nach Situation können sich die einzelnen Komponenten zu einem speziellen Betrachtungszeitpunkt verschiedenartig überlagern; und sich somit Sturmfluten mit unterschiedlichen Ausprägungen bezüglich der Wasserstandshöhen und Dauer einstellen. Ferner enthält die Tabelle 1 Aussagen zum Wiederkehrintervall der jeweiligen Komponente.

Tabelle 1: Komponenten von Sturmfluten an der deutschen Ostseeküste mit maximalem Anteil am Wasserstand sowie Wiederkehrintervall typischer zeitlicher Andauer (Möller 2011).

Komponente	maximaler Anteil an Sturmflut	Dauer	Wiederkehrintervall
Windstau	200 cm	mehrere Stunden	unregelmäßig
Eigenschwingungen	120 cm	wenige Stunden	ca. 28 bzw. 31 Stunden
Buchtenstau	50 cm	mehrere Stunden	bei Hochwasser
Füllungsgrad	50 cm	Tage bis Wochen	unregelmäßig
Gezeiten	20 cm	wenige Stunden	12 Stunden

Die absoluten Werte in Abbildung 7 und Tabelle 1 weichen in den Punkten Eigenschwingung/Schwingungsstau sowie Gezeiten voneinander ab. Ursachen hierfür sind die Unterschiede einerseits in den Windwirklängen und andererseits in den Abständen zum Kattegat /Skagerrak mit Gezeiteneinfluss.

3.2.2 Verlauf der Wasserstandssituation

Die während der Sturmflut im Oktober 2023 an den einzelnen vom WSA Ostsee betriebenen Pegelstandorten aufgetretenen höchsten Wasserstände sind getrennt nach den beiden Bundesländern Schleswig-Holstein in der Abbildung 8 (Darstellung der Pegelstationen von Richtung Nord → Süd → Ost) sowie Mecklenburg-Vorpommern – Bereich Außenküste in der Abbildung 9 von West nach Ost und Südost und der Bereiche Haff- und Boddenküste inkl. Peene (Peenestrom) in der Abbildung 10 aufgetragen.

Darauf hingewiesen sei, dass in sämtlichen folgenden Kapiteln bei allen genannten Wasserstandsdaten als zeitliche Zuordnung die mitteleuropäische Zeit gilt. Ferner beziehen sich alle dargestellten Wasserstandshöhen auf die gültigen Pegelnullpunkte von 2019 bzw. auf das Deutsche Haupthöhennetz 2016 (DHHN2016).

Bei den im Bereich Schleswig-Holstein liegenden Pegelstationen traten die Höchstwasserstände jeweils am Spätabend des 20.10.2023 auf (vgl. auch Abbildung 15). Bei den an der Außenküste Mecklenburg-Vorpommern liegenden Stationen wurden die Scheitelwerte meistens ebenfalls am Abend des 20.10.2023 erreicht, wobei beim Pegel Wismar-Baumhaus der maximale Wasserstand bis zum Beginn des nächsten Tages anhielt (vgl. auch Abbildung 16). Die an der Haff- und Boddenküste einschließlich der Peene/des Peenestroms befindlichen Pegel verzeichneten größtenteils ihre Scheitel am Nachmittag bis späteren Abend des 20.10.2023. Am Pegel Barth trat der Wasserstandsscheitel erst in der späteren Nacht zum 21.10.2023 ein. Lediglich an den beiden sehr weit binnenseitig liegenden Stationen Althagen sowie Aalbude wurden maximale Wasserstände in Althagen erst in der 2. Hälfte des 21.10.2023 bzw. an der Station Aalbude sogar erst am 23.10.2023 registriert.

Im Bereich Schleswig-Holstein wurden im Abschnitt der Flensburger Förde bis hin zur Eckernförder Bucht einschließlich der Schlei an allen Pegeln Wasserstände > 200 cm über Mittelwasser registriert, deren Eintrittshöhen gemäß der vom BSH festgelegten Klassifikation als sehr schwere Sturmflut zu bezeichnen sind (vgl. Abbildung 8). Eine schwere Sturmflut mit Wasserständen zwischen 150 und 200 cm trat an allen in der Kieler Bucht, im Bereich Fehmarn und der Lübecker Bucht einschließlich der Untertrave befindlichen Pegeln auf.

Der höchste während der Sturmflut gemessene Wasserstand wurde in der Schlei am Pegel Schleswig mit 229 cm über NHN sowie der zweithöchste in der Flensburger Förde am Pegel Flensburg mit 227 cm über NHN registriert. Diese Wasserstandshöhen sind für beide Pegel jeweils der zweithöchste gemessene Scheitelwert seit der Aufnahme der Pegelbeobachtungen (Abbildung 11 und Abbildung 12). Innerhalb der letzten rund 150 Jahre sind im nördlichen Teil der schleswig-holsteinischen Ostseeküste einschließlich der Schlei nur bei der extremen Sturmflut vom 12./13.11.1872 höhere Scheitelwasserstände aufgetreten als bei der Flut im Oktober 2023 (Baerens 1998, Baerens et. al.1994).

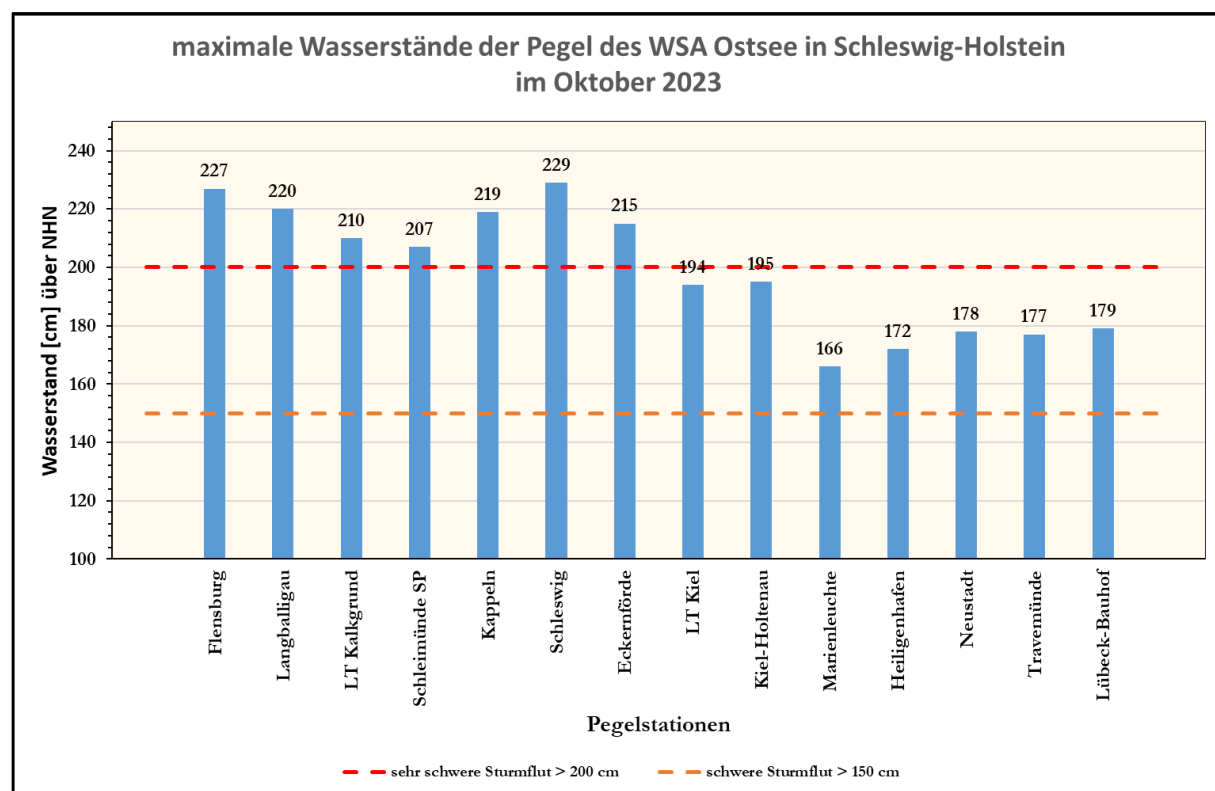


Abbildung 8: Maximale Wasserstände der in Schleswig-Holstein liegenden Pegel des WSA Ostsee im Oktober 2023, Sturmflutklassifikation gemäß BSH (bezogen auf den vom BSH festgelegten mittleren Wasserstand von 500 cm über dem Pegelnullpunkt).

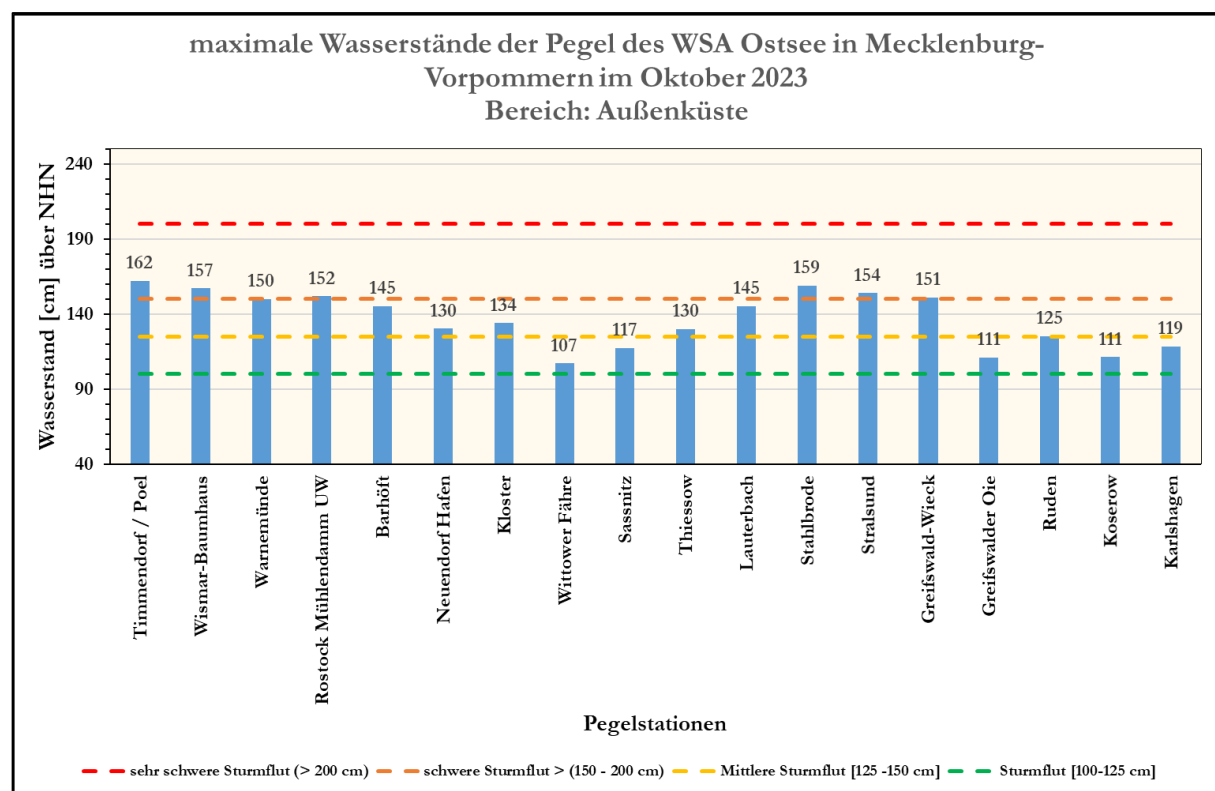


Abbildung 9: Maximale Wasserstände der an der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern liegenden Pegel des WSA Ostsee im Oktober 2023, Sturmflutklassifikation gemäß BSH (bezogen auf den vom BSH festgelegten mittleren Wasserstand von 500 cm über dem Pegelnullpunkt).

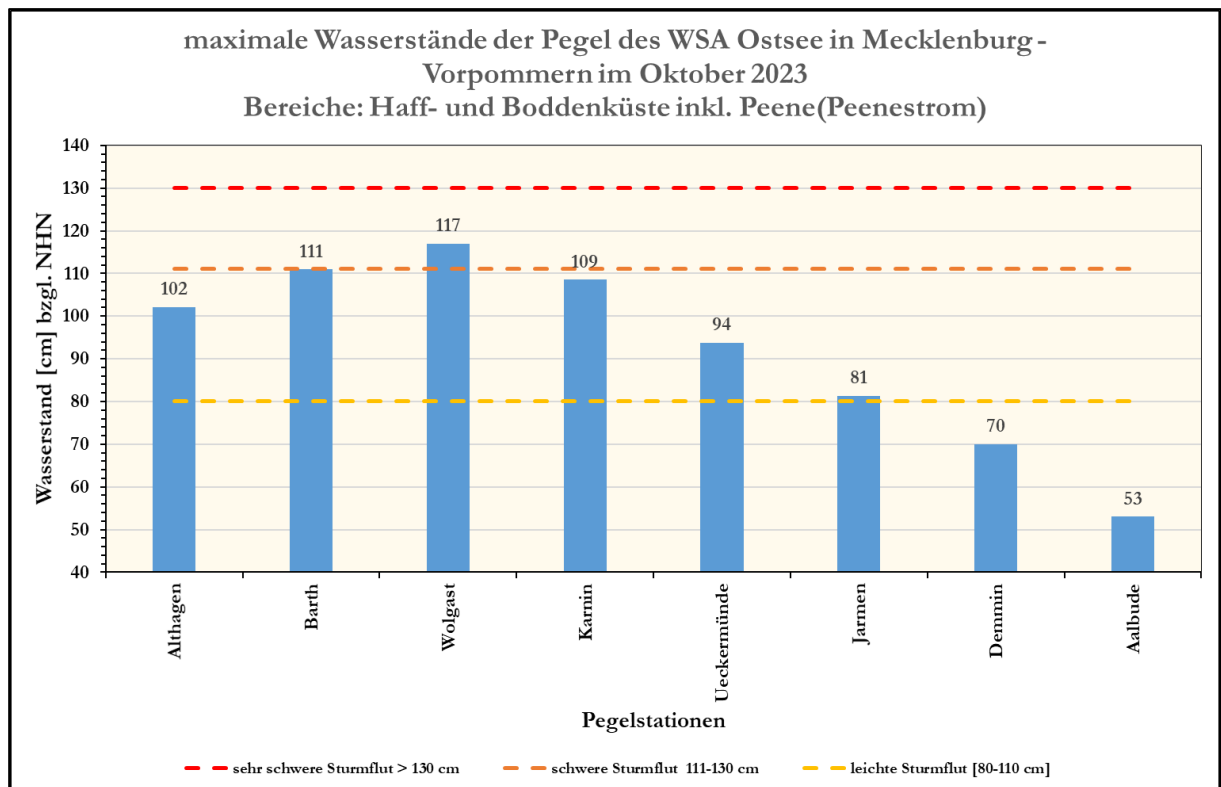


Abbildung 10: Maximale Wasserstände der an der Haff- und Boddenküste von Mecklenburg-Vorpommern inkl. Peene(strom) liegenden Pegel des WSA Ostsee im Oktober 2023, Sturmflutklassifikation gemäß Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern 1995 (bezogen auf einen mittleren Wasserstand von 500 cm über dem Pegelnulldpunkt).

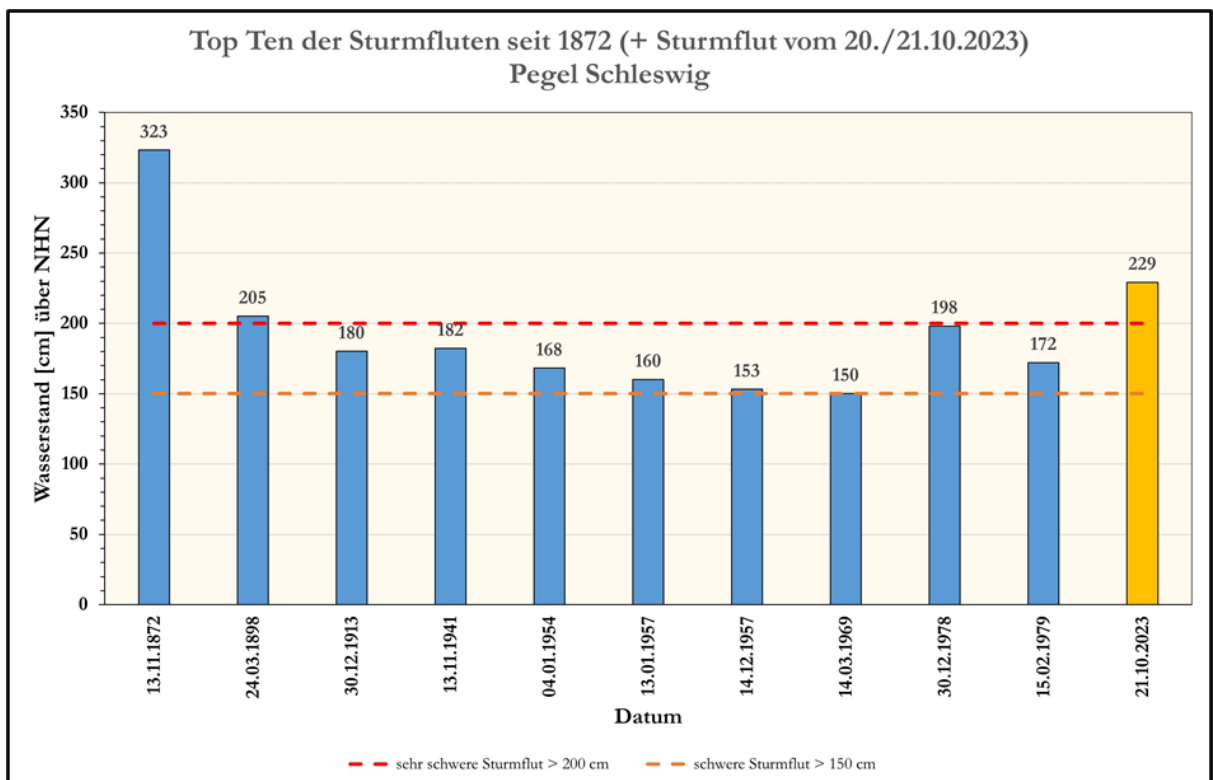


Abbildung 11: Höchste am Pegel Schleswig seit Aufzeichnungsbeginn am 01.03.1872 gemessene Wasserstände, Sturmflutklassifikation gemäß BSH.

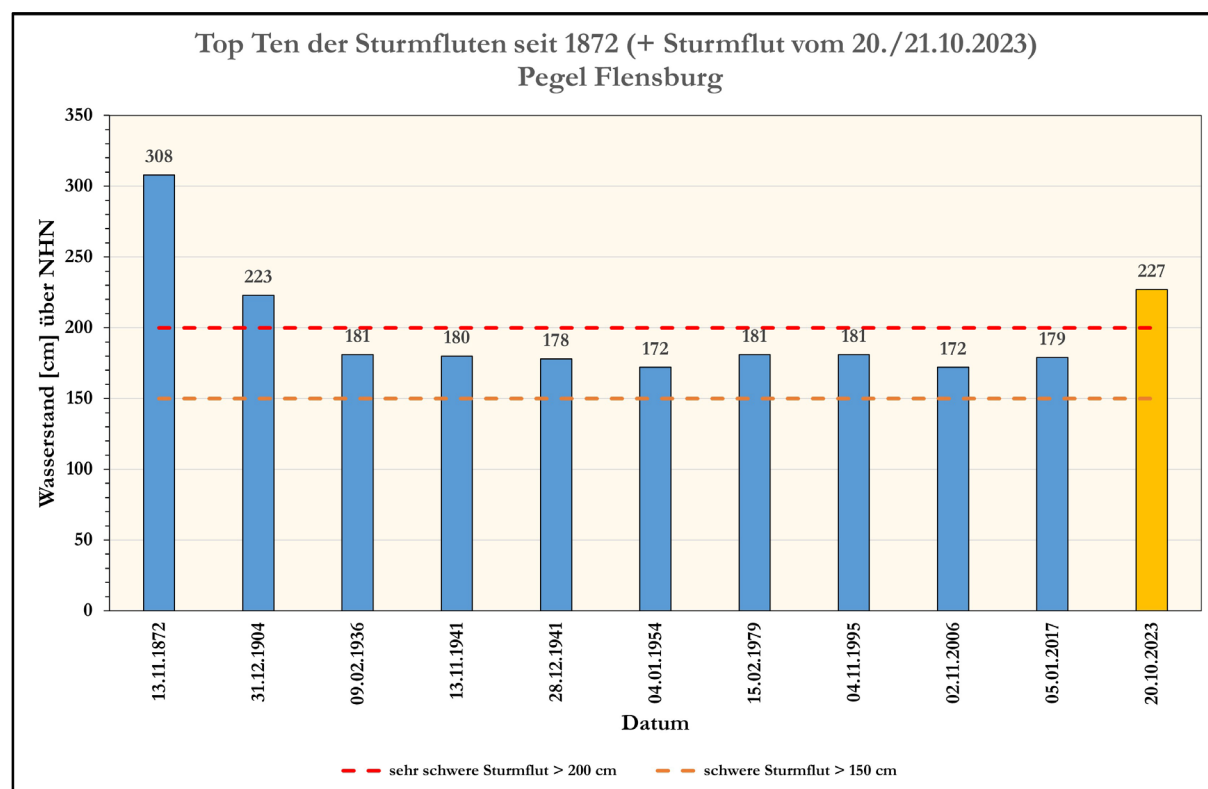


Abbildung 12: Höchste am Pegel Flensburg seit Aufzeichnungsbeginn am 01.03.1872 gemessene Wasserstände, Sturmflutklassifikation gemäß BSH.

In der Tabelle 2 sind für einige im Bereich der Ostseeküste von Schleswig-Holstein liegende Pegelstationen des WSA Ostsee ausgewählte Hochwasserereignisse von registrierten Hochwasserständen mit Werten $\geq 1,50$ m über NHN zusammengestellt. Der Beginn der systematischen Erfassung und Registrierung der Wasserstände an den einzelnen Stationen ist zwar unterschiedlich, jedoch waren während der bisher höchsten registrierten Sturmflut in der westlichen Ostsee vom 12./13.11.1872 alle genannten Pegel bereits in Betrieb. Eine Einordnung der bei der Sturmflut vom 19. bis 21.10.2023 an den aufgeführten Pegeln gemessenen Scheitelwasserständen zu bisherigen Ereignissen mit höheren gemessenen Wasserständen ist aus dem in der Tabelle 2 genannten Rang des Schweregrades ersichtlich.

Tabelle 2: Ausgewählte historische Hochwasserereignisse der Ostsee von einigen im Bereich Schleswig-Holstein liegenden Pegeln des WSA Ostsee mit extremen Hochwasserständen [m] Werte $\geq 1,50$ m über NHN.

Datum	Flensburg	Schleswig	Eckernförde	Kiel-Holtenau	Travemünde
12./13.11.1872	3,08	3,23	3,15	2,97	3,28
25.11.1890					2,45
19.04.1903					
31.12.1904	2,23		2,12	2,25	2,11
30.12.1913	1,67	1,80		1,90	1,98
09.01.1914				1,67	
07.11.1921				1,58	
02.03.1949				1,50	
11.12.1949	1,50			1,60	1,53
04.01.1954		1,68	1,75	1,80	2,00
13./14.01.1957	1,60	1,60	1,62	1,52	1,54
14.01.1960	1,52		1,58	1,77	1,54
12.01.1968				1,52	1,55
15.02.1979	1,81	1,72	1,84	1,94	1,82
13.01.1987				1,72	1,76
03./04.11.1995	1,81		1,98	1,99	1,82
21.02.2002	1,56		1,52	1,56	1,74
01./02.11.2006	1,72		1,67	1,75	1,71
04./05.01.2017	1,79		1,70	1,69	1,72
02.01.2019	1,68		1,64	1,67	1,74
19. - 21.10.2023	2,27	2,29	2,15	1,95	1,77
Rang nach Schweregrad	2	2	2	4	7

Der mecklenburg-vorpommersche Bereich der Ostseeküste wird im Rahmen der hier angestellten Betrachtungen in die beiden Abschnitte Außenküste sowie Haff- und Boddenküste inkl. Peene (Peenestrom) unterteilt, wobei in beiden Bereichen seitens des WSA Ostsee Pegelanlagen betrieben werden (vgl. Abbildung 6). Historische Daten zu Hochwasserereignissen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns liegen dem WSA Ostsee für einzelne Pegel an der Außenküste vor. In der nachfolgenden Tabelle 3 sind diese Ereignisse mit einem Wasserstand $\geq 1,50$ m über NHN an fünf ausgewählten Stationen zusammengestellt. Die Einordnung der Sturmflut vom Oktober 2023 zu den anderen Sturmfluten mit den dabei erreichten Scheitelwasserständen ergibt sich aus dem in der letzten Zeile der Tabelle 3 enthaltenen Rang des erreichten Schweregrades.

Tabelle 3: Ausgewählte historische Hochwasserereignisse der Ostsee von einigen, im Bereich an der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern liegenden ausgewählten Pegel des WSA Ostsee mit extremen Hochwasserständen [m] Werte $\geq 1,50$ m über NHN.

Datum	Wismar-Baumhaus	Warnemünde	Stralsund	Greifswald	Sassnitz
12./13.11.1872	2,83	2,72	2,53	2,84	
25.11.1890	1,70	1,52	1,52	1,74	
19.04.1903	1,55	1,29	1,42	1,34	1,12
31.12.1904	2,31	1,90	2,14	2,44	2,15
30.12.1913	2,11	1,93	2,36	2,29	1,92
09.01.1914	1,60	1,64	1,10	1,64	1,59
07.11.1921	1,99	1,54	1,32		1,19
02.03.1949	1,77	1,54	1,33	1,91	1,50
11.12.1949	1,67	1,25	1,05	0,89	0,86
04.01.1954	2,13	1,74	1,78	1,87	1,46
14.12.1957	1,59	1,39	1,43	1,57	1,11
14.01.1960	1,58	1,22	1,11	1,18	0,86
12.01.1968	1,58	1,54	1,49	1,59	1,16
14/15.02.1979	1,62	1,31	0,97	1,03	0,88
12./13.01.1987	1,72	1,44	1,20	1,46	1,17
03./04.11.1995	2,01	1,62	1,67	1,82	1,40
21.02.2002	1,97	1,60	1,60	1,81	1,29
01./02.11.2006	1,81	1,64	1,39	1,45	1,25
04./05.01.2017	1,82	1,62	1,57	1,68	1,42
02.01.2019	1,90	1,69	1,60	1,70	1,44
19. - 21.10.2023	1,57	1,50	1,54	1,51	1,17
Rang nach Schweregrad	> 10	> 10	9	> 10	> 10

Ursachen der während der Sturmflut im Oktober 2023 in dem nördlichen Bereich der deutschen Ostseeküste eingetretenen extremen Wasserstandshöhen waren neben der vorhandenen Vorfüllung der Ostsee von einigen Dezimetern primär der große Windstau infolge der langandauernden Sturmwindlage aus östlicher Richtung. Die Eigenschwingungen der Ostsee (vgl. Kapitel 3.4) hatten außerdem einen deutlichen Einfluss auf das Ereignis.

Insbesondere in der Schlei treten diese Effekte in überlagerter Form nur sehr selten in der eingetretenen ausgeprägten Form mit außergewöhnlich hohen Wasserständen auf (vgl. Tabelle 2). Die Schlei, welche dem Küstentyp Förde zuzuordnen ist, ist ein Gewässer mit vielfach geringen Wassertiefen, die lediglich eine schmale etwas tieferliegende Ostseeverbindung hat. Aufgrund der engen Einlauföffnung der Schlei zur Ostsee im Bereich Schleimünde können die in der Ostsee vorhandenen und einwirkenden Wasserstände in dem Fördesystem nur gedämpft einschwingen und sich am Pegel Schleswig lediglich zeit- und höhenversetzt einstellen. Der mögliche Einfluss des vor und während der Sturmflut entstandenen Niederschlags aus dem länger angehaltenen Regen und dem daraus resultierenden Abfluss auf das Wasserstandsgeschehen im System Schlei ist bislang nicht im Detail untersucht worden. Diese Komponente wird voraussichtlich aber nur eine vernachlässigbare Größenordnung betragen. Der Einfluss des stets vorhandenen Gezeiteneffektes hat zu dem Sturmflutgeschehen ebenfalls keinen nennenswerten Beitrag beigesteuert. Bei der

Sturmflut im Oktober 2023 hat in der Schlei aber der Buchteneffekt zu einer erkennbaren Verstärkung der Amplituden und damit zu höheren Wasserständen als in der Ostsee geführt.

Anzumerken ist, dass, aufgrund der sehr unterschiedlichen Bathymetrien der verschiedenen Küstentypen bei gleichbleibender Windrichtung, sich die erreichten Scheitelwasserstände in den Buchten und Förden von Schleswig-Holstein deutlich von den registrierten Scheitelwerten im Boddensystem von Mecklenburg-Vorpommern unterscheiden.

Im Bereich der mecklenburg-vorpommerschen Außenküste (vgl. Abbildung 9) kam es bei allen Pegelstationen zu einer Sturmflut, jedoch überschritt kein Pegel die Wasserstandsmarke einer sehr schweren Sturmflut gemäß der vom BSH festgelegten Sturmflutklassifikation. Nach dieser Einteilung kam es bei den Pegelstationen Timmendorf / Poel, Wismar-Baumhaus, Rostock Mühlendamm UW, Stahlbrode und Stralsund zu einer schweren Sturmflut (Wasserstände $\geq 1,50$ m über dem mittleren Wasserstand). Die ebenfalls dem Abschnitt der Außenküste zugeordneten Pegel Warnemünde, Greifswald-Wieck, Neuen-dorf Hafen, Kloster, Thiessow und Lauterbach erreichten Wasserstände, die in die Klassifikation einer mittleren Sturmflut gehören (Wasserstände $\geq 1,25$ m über dem mittleren Wasserstand).

Der an der Pegelstation Wolgast, welche sich im Abschnitt der Haff- und Boddenküste einschließlich des Peenestroms befindet, erreichte maximale Wasserstand ist der Kategorie schwere Sturmflut (Klassifikation gemäß Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern 1995. Wasserstände $\geq 1,11$ m) zu zuordnen (vgl. Abbildung 10). An den Haff- und Boddenpegeln inkl. der Peene liegenden Stationen Althagen, Ueckermünde, Karnin sowie Jarmen wurde jeweils eine leichte Sturmflut registriert. Lediglich bei den im Bereich der Peene weit stromaufwärts stehenden Pegeln Demmin Meyenkrebsbrücke und Aalbude sind die Hochwasserstände geringer ausgefallen und können keiner Sturmflutkategorie zu geordnet werden.

Die Abbildung 13 zeigt die Wasserstandssituation vom 14. bis 28.10.2023 am schwedischen Pegel Landsort, im Vergleich dazu die von den Pegeln Sassnitz und Warnemünde, wobei die Daten der Station Landsort der URL Stand 02.05.2024 <https://www.smhi.se/data/oceanografi/ladda-ner-oceanografiska-observationer/sealevelrh2000/2507> entnommen wurden.

Der Pegel Landsort verharrt bereits ein paar Tage vor dem Sturmflutereignis auf einem erhöhten Niveau von ca. 0,50 m über NHN. Somit ist der Füllungseffekt, welcher als gemittelter Wasserstand über eine Zeitspanne von Tagen bis Wochen angesehen wird (vgl. Kapitel 3.2.1 und Hupfer et. al. (2003)), in der gesamten Ostsee gegeben. Erst mit Beginn der höheren Wasserstände in der westlichen Ostsee beginnt ein langsames Fallen des Wasserspiegels, welches als Entleerung der Ostsee durch Verschiebung der Wassermengen und folgendem Abfluss in Richtung Nordsee gedeutet werden kann.

Die Abbildung 14 zeigt für ausgewählte an der mecklenburg-vorpommerschen Haff- und Boddenküste sowie der Peene/ des Peenestroms liegende Pegel des WSA Ostsee (Stationen Althagen, Aalbude, Wolgast und Ueckermünde) die vom 14. bis 31.10.2023 registrierten Wasserstandsverläufe. In diesen Abschnitten der Küste stellen sich die Wasserstandsschwankungen, bedingt durch die geringen Einlaufquerschnitte aus der Ostsee sowie die schmalen Verbindungen untereinander von außen nach innen, mit zunehmender Dämpfung und zeitlicher Verzögerung ein. Die Scheitelwasserstände der Sturmfluten liegen in den Bereichen der Haff- und Boddenküste inkl. Peene (Peenestrom) daher nahezu

immer deutlich unter denen an der Außenküste. Bei der Sturmflut vom 19. bis 21.10.2023 wurden beispielsweise bei der im Saaler Bodden befindlichen Pegelanlage Althagen durchschnittlich um nahezu 50 cm geringere Wasserstände mit einer zeitlichen Verzögerung des Eintretens des Höchstwasserscheitelwertes von ca. 14 h zwischen dem Eingang der Bodengewässer zur Ostsee (Pegel Barhöft) und der Pegelstation Althagen registriert. Aus der Abbildung 14 ist ersichtlich, dass bei den Pegeln Althagen und Wolgast sogar eine Zeitdifferenz von über 18 h zwischen den erfassten Extremwasserständen besteht. Angemerkt sei, dass diese Zeiten von Fall zu Fall variieren, wobei jedoch der Prozess des Eindringens bzw. des Durchlaufens der Hochwasserwelle stets gleich ist (Stigge in Hupfer et. al. 2003).

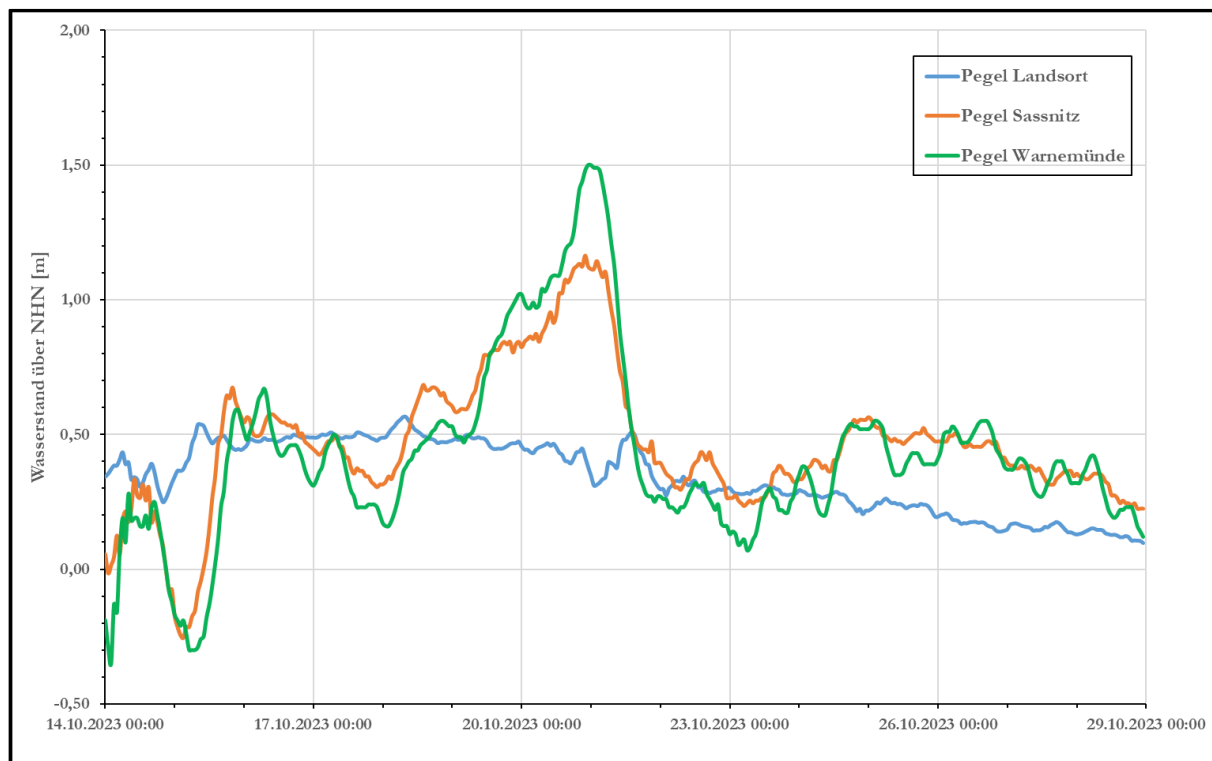


Abbildung 13: Füllungsgrad an den Pegeln Landsort, Sassnitz und Warnemünde vom 14. bis 28.10.2023.

Ferner ist aus der Abbildung 14 erkennbar, dass nach dem Erreichen des Scheitelwertes beim Pegel Wolgast sowie Ueckermünde ein relativ schneller Abfall der Wasserstände erfolgt und nach ca. 24 h wieder das Höhenniveau der vorhandenen Vorfüllung der Ostsee erreicht. Dieser Verlauf sieht bei dem Pegel Althagen deutlich anders aus. Hier erfolgt die Wasserstandsreduzierung wesentlich langsamer und erstreckt sich über mehrere Tage. Die Kurve der während der Sturmflut im Oktober 2023 an der in der Peene liegenden Messstation Aalbude erfassten Wasserstände zeigt einen komplett anderen Verlauf als bei den sonstigen Haff- und Boddenpegeln. Aufgrund der weit binnenseitig liegenden Anordnung des Pegels Aalbude ist der Kurvenverlauf sehr gedämpft in der Höhe sowie der Zeit, wobei der erreichte Scheitelwert über 3 Tage nahezu konstant verharrte.

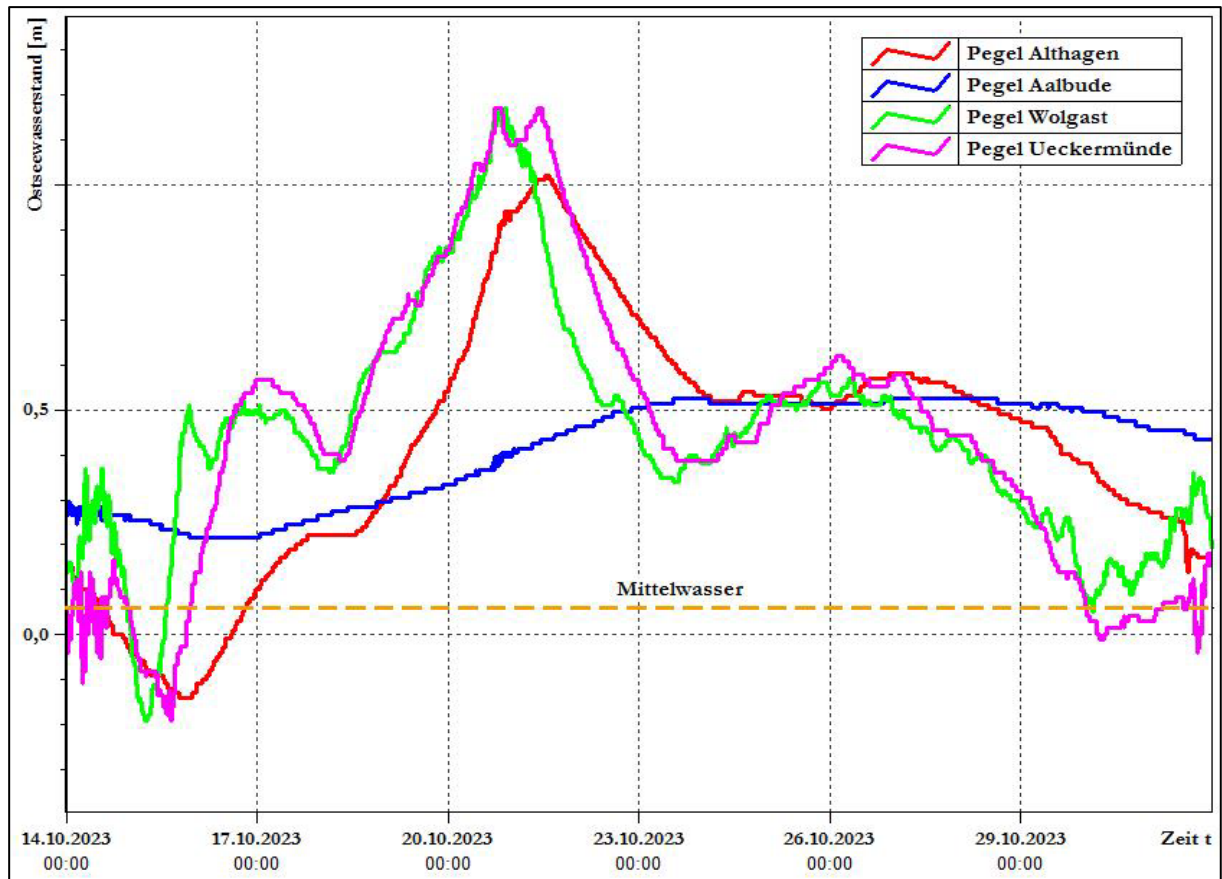


Abbildung 14: Füllungsgrad der Ostsee an im Bereich der Haff- und Boddenküste inkl. der Peene/ des Peenestroms liegender ausgewählter Pegel des WSA Ostsee vom 14. bis 31.10.2023 (Ostseewasserstand in m über NHN).

3.3 Verweildauer

Verweilzeiten von Sturmflutwasserständen sind die Zeitabschnitte, in denen erhöhte Wasserstände auf einem bestimmten Höhenniveau verbleiben. Diese Verweilzeiten sind ein wichtiger hydrologischer Indikator, da sie die Dauer der Belastung von Küstenschutzanlagen und die potenziellen Schäden durch Überflutungen beeinflussen.

Aus der Abbildung 15 können für die in Schleswig-Holstein liegenden Pegel Flensburg, Schleswig und Kiel-Holtenau sowie Lübeck-Bauhof die vom 19. bis 22.10.2023 aufgezeichneten Wasserstandsverläufe mit der Dauer der Wasserstände beispielsweise bei Sturmflutwasserständen von $> 1,00$ m oder $> 2,00$ m über NHN ersehen werden (vgl. auch Tabelle 4). Exemplarisch sollen hier die beiden Pegel mit den höchsten im deutschen Küstenabschnitt eingetretenen Wasserständen, die an den Stationen Schleswig und Flensburg gemessen wurden, genannt werden. Bei der Station Schleswig lag der Wasserstand rund 61 h über $1,00$ m und nahezu 16 h über $2,00$ m über NHN. In Flensburg verweilte das Wasser 53 h über $1,00$ m und rund 9 h über $2,00$ m über NHN.

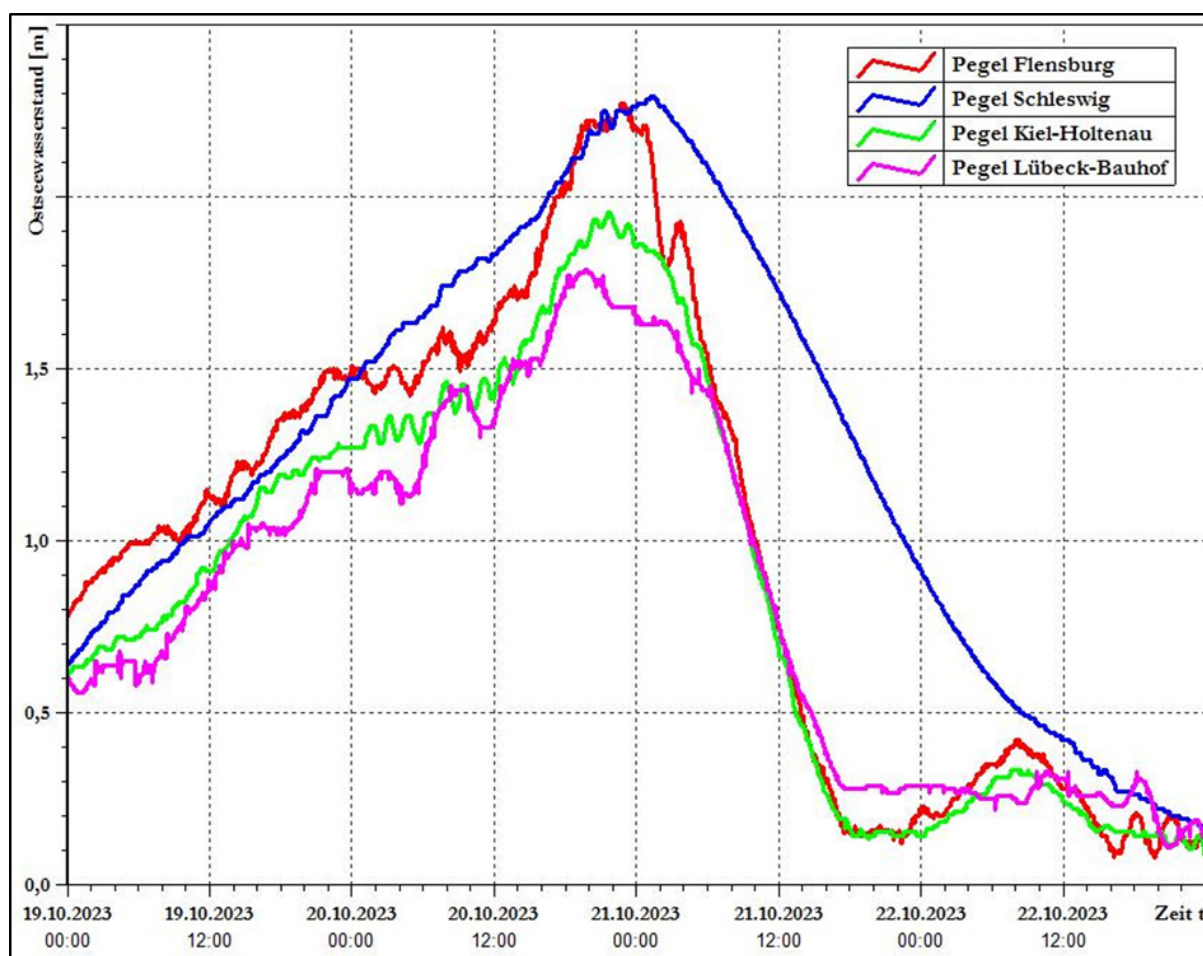


Abbildung 15: Wasserstandsverläufe im Bereich in Schleswig-Holstein liegender ausgewählter Pegel des WSA Ostsee vom 19. bis 22.10.2023 (Ostseewasserstand entspricht NHN in m).

Aus Abbildung 15 ist bei allen Kurvenverläufen ein kontinuierlicher, relativ langsamer Anstieg der Wasserstände über nahezu 3 Tage bis hin zum Erreichen des jeweiligen Scheitels erkennbar. Danach erfolgt ein stetiger und deutlich schnellerer Abfall der Wasserstandsverläufe bis auf das Niveau des Vorfüllungsgrads der Ostsee. Ferner ist sichtbar, dass der Kurvenverlauf des Wasserstands vom Pegel Schleswig beim Abfallen zeitlich gesehen deutlich langgestreckter und bauchiger ist als bei den anderen in der Abbildung 15 dargestellten Pegelkurven. Ursache hierfür ist der kleine Querschnitt in Höhe Schleimünde, der den Auslauf der in der Schlei vorhandenen Wassermassen limitiert. In der Abbildung 17, die einen Längsschnitt entlang der gesamten deutschen Ostseeküste mit 20 cm Klassen der Überschreitungsdauer von einigen Pegeln beinhaltet, finden sich die für den Pegel Flensburg dargelegten Angaben ebenfalls wieder.

Aus der Abbildung 16 können für die an der Außenküste Mecklenburg-Vorpommerns liegenden Pegel Wismar-Baumhaus, Warnemünde, Stahlbrode, Sassnitz und Koserow die vom 19. bis 22.10.2023 aufgezeichneten Wasserstandsverläufe mit ihrer relativ sehr langen zeitlichen Dauer beispielsweise bei Werten $> 0,75$ m oder $> 1,00$ m über NHN ersehen werden. Wie bei den Kurvenverläufen der in Schleswig-Holstein befindlichen Stationen (vgl. Abbildung 15), so ist auch bei den in Mecklenburg-Vorpommern an der Außenküste vorhandenen Pegeln des WSA Ostsee erkennbar, dass bei den einzelnen Kurven zunächst

ein kontinuierlicher langsamer Anstieg des Wasserstandsverlaufs erfolgt. Nach dem Verharren der Scheitelwasserstände an den dargestellten Pegeln über teilweise mehrere Stunden erfolgt ein relativ schneller Abfall der Kurvenverläufe.

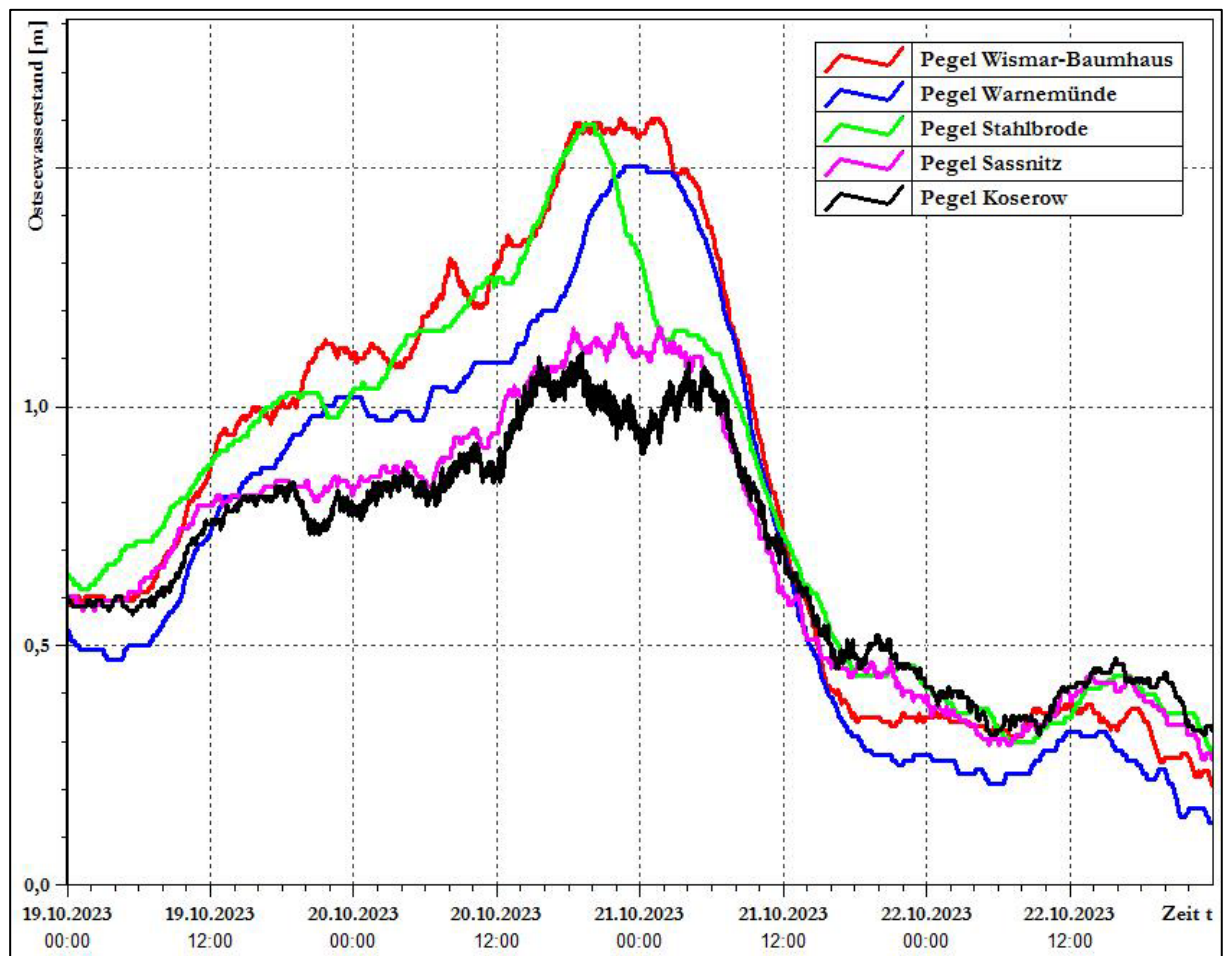


Abbildung 16: Wasserstandsverläufe im Bereich der Außenküste Mecklenburg-Vorpommern liegender ausgewählter Pegel des WSA Ostsee vom 19. bis 22.10.2023 (Ostseewasserstand entspricht NHN in m).

In der Tabelle 4 sind die während der Sturmflut im Oktober 2023 an besonders repräsentativen Pegeln des WSA Ostsee aufgetretenen Verweildauern von hohen Wasserständen zusammengestellt. Aus der Tabelle 4 ist ersichtlich, dass bei den kleineren angegebenen Wasserstandsstufen die Zeiten länger verharren je größer die Sturmfluthöhe ist. Im nördlichen Abschnitt der Ostseeküste von Schleswig-Holstein haben die Überschreitungsdauern der hohen Wasserstände sehr lange angehalten und in Richtung Süden sowie Osten an der mecklenburg-vorpommerschen Küste kontinuierlich abgenommen.

In der Abbildung 17 ist für einige entlang der deutschen Ostseeküste liegende repräsentative Pegelstationen die während der Sturmflut im Oktober 2023 eingetretene Überschreitungsdauer von Wasserständen im Bereich der Höhen von ≥ 100 cm bis ≥ 200 cm über NHN in 20 cm Abständen aufgetragen. Da die höchsten Wasserstände im Nordbereich der deutschen Ostseeküste aufgetreten sind und in Richtung Osten stetig abgenommen haben, spiegelt sich dieses Verhalten auch im Längsschnitt bei den einzelnen Überschreitungsdauerklassen wieder. Angemerkt sei, dass diese Form der Abnahme der Überschreitungsdauer entlang der deutschen Ostseeküste von Nord in Richtung Süd und Ost typisch

bei Sturmfluten ist, die dem Zyklontyp Vb zuzuordnen sind. Zu beachten ist, dass bei derartigen Wetterlagen gemäß Tabelle 4 oftmals sehr lange Zeiten mit hohen Wasserständen zu verzeichnen sind (Eiben 1992). Meistens sind bei den Sturmfluten die Verweilzeiten jedoch deutlich kürzer als es bei der Sturmflut vom 19. bis 21.10.2023 der Fall war (Wasser- und Schifffahrtsamt Lübeck).

Tabelle 4: Kumulierte Überschreitungsdauer der Wasserstände an verschiedenen Messstationen des WSA Ostsee vom 19. bis 21.10.2023 in Stunden (vgl. auch Abbildung 17).

Pegel	1,25 m über NHN	1,50 m über NHN	1,75 m über NHN	2,00 m über NHN
Flensburg	40	26	14	9
Schleswig	50	39	28	16
Eckernförde	38	22	12	3
Kiel-Holtenau	34	17	10	0
Lübeck-Bauhof	26	15	3	0
Wismar-Baumhaus	20	9	0	0
Warnemünde	12	0	0	0
Neuendorf Hafen	5	0	0	0
Stralsund	11	1	0	0
Sassnitz	0	0	0	0
Greifswald-Wieck	9	0	0	0
Koserow	0	0	0	0

Aus der Abbildung 18, welche die Überschreitungsdauer von Wasserständen gemäß BSH-Klassifikation $\geq 1,00$ m über NHN (vgl. Kapitel 1) an ausgewählten Pegelstationen des WSA Ostsee an der Ostseeküste für verschiedene in den letzten Dekaden aufgetretene Sturmfluten enthält, ist das beschriebene Verhalten ersichtlich. Die während der Sturmflut vom Oktober 2023 aufgetretenen Verweilzeiten von Sturmflutwasserständen ragen insbesondere an der schleswig-holsteinischen Küste deutlich über die der anderen betrachteten Sturmfluten heraus.

Die bei der Sturmflut vom 19. bis 21.10.2023 vorhandenen sehr langen Verweilzeiten hoher Wasserstände treten bei Sturmfluten im Bereich der deutschen Ostseeküste nur äußerst selten auf und sind somit ein weiteres, besonderes Herausstellungsmerkmal dieses Hochwasserereignisses. Die langandauernden hohen Wasserstände haben u. a. besonders zu dem durch die Sturmflut entstandenen Schadensbild beigetragen (Seiß 2024). Vergleichbar war diese Situation mit der Sturmflut vom Jahreswechsel 1978/1979 (Eiben 1992).

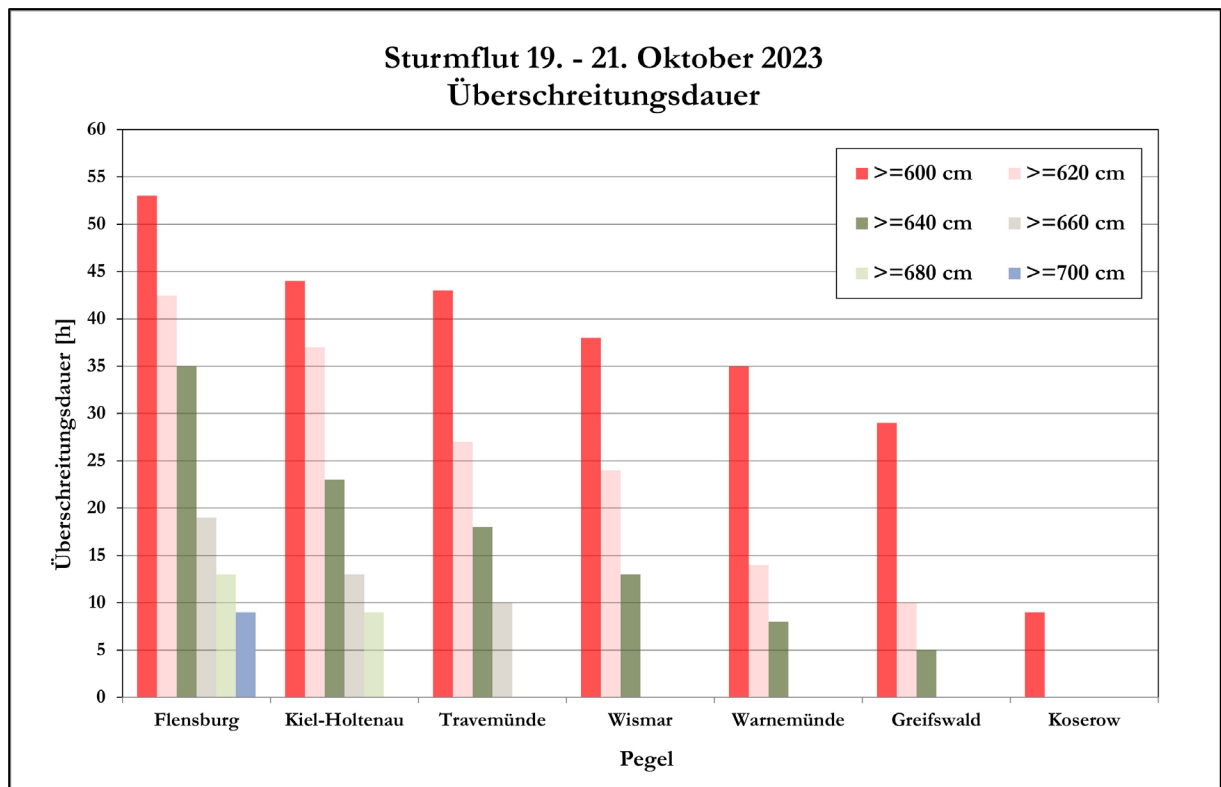


Abbildung 17: Überschreitungsdauer der Wasserstände an ausgewählten Pegelstationen des WSA Ostsee entlang der deutschen Ostseeküste während der Sturmflut vom 19. bis 21.10.2023.

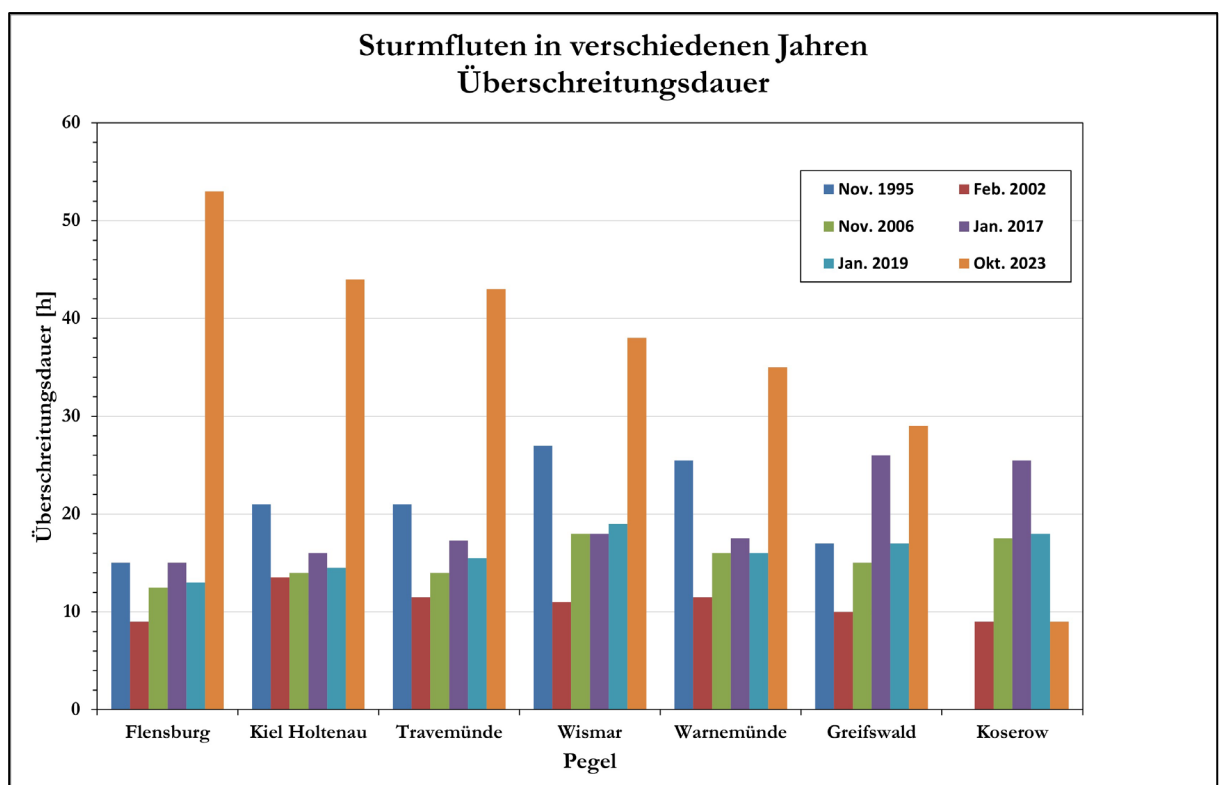


Abbildung 18: Überschreitungsdauer der Wasserstände $\geq 1,00$ m über NHN an ausgewählten Pegelstationen des WSA Ostsee entlang der deutschen Ostseeküste während verschiedener Sturmfluten.

3.4 Eigenschwingungen

Die Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg hat eine schriftliche Ausarbeitung zu den während der Sturmflut im Oktober 2023 eingetretenen Eigenschwingungen (Seiches) durchgeführt. Dabei wurden die Daten der Messzeitreihen mittels Kernel-Regressionsfunktionen über zwei verschiedene Zeitintervalle gefiltert, die in erster Näherung die Auswirkungen der 36 h - Periode als längste Grundschiwingung der Ostsee sowie die 12 h 25 min - Periode der M2-Partialtide repräsentieren. Die gewählte Methode der Kernel-Regression gibt die Abhängigkeit einer zufälligen Größe von nichtlinearen Zusammenhängen in den Ausgangsdaten wieder (Nadaraya 1964, Watson 1964). Bei den nachfolgend dargestellten Untersuchungsergebnissen wurden mittels Tiefpassfilter zunächst zwei Kurven berechnet. Die erste Kurve beinhaltet den langperiodischen Anteil mit allen Frequenzen unterhalb der Seichefrequenz, während die zweite Kurve den Anteil enthält, der gerade die M2-Tide nicht mehr umfasst. Da die ganztägigen Tiden in der Ostsee quasi vernachlässigbar sind, bleibt als Differenz dieser beiden Kurven ein Signal im Frequenzband der Seiche-Grundschiwingungen (siehe Tabelle 1) übrig.

Aus der Abbildung 19 sind die an den Pegeln Flensburg, Kiel-Holtenau, Warnemünde und Landsort vom 16. bis 24.10.2023 erfassten Wasserstandsverläufe sowie die nach dem oben beschriebenen Verfahren jeweils ermittelten Verläufe der Eigenschwiwingungen ersichtlich. Erkennbar ist die stetige Abnahme der Höhe der Wasserstände und der Seiches von West nach Ost. In Flensburg beträgt die Höhe der Eigenschwiwingung ca. 60 cm, in Marienleuchte 45 cm und in Warnemünde ca. 40 cm. Feststellbar ist, dass die an den deutschen Pegeln aufgetretenen Scheitelwasserstände durch den jeweils vorhandenen Seiches-Effekt deutlich mit beeinflusst wurden. Am Pegel Landsort ist – wie aufgrund seiner Lage im Knotenbereich der einknotigen Eigenschwiwingung der Ostsee erwartet – der Seiches-Anteil nahezu nicht vorhanden.

Die Abbildung 20 zeigt für die an der deutschen Ostseeküste befindlichen Pegelstationen Flensburg, Eckernförde, Kiel-Holtenau, Marienleuchte, Warnemünde und Sassnitz sowie den schwedischen Pegel Landsort die aus den erfassten Wasserständen jeweils eliminierten Anteile der Eigenschwiwingung. Aus dem Schwiwingungsverhalten der Seiches an den deutschen Stationen mit dem jeweiligen Maximum in der Nacht vom 20./21.10.2023 erfolgt anschließend ein sichtbarer, aber bereits gedämpfter Absunk des langperiodischen Wasserstandsanteils, welcher nach etwa einem Tag das Minimum erreicht. Aufgrund starker Dämpfungseffekte ist danach das vorher vorhandene Schwiwingungsverhalten kaum noch festzustellen.

Der in der Abbildung 21 dargestellte Kurvenverlauf des Seiches des an der Station Marienleuchte erfassten Wasserstandes enthält alle langperiodischen Wasserstandsanteile, wobei hier im Wesentlichen die Beckenschwiwingung (Seiches) mitenthalten ist. Die Eigenschwiwingungen der Ostsee in den Systemen „Westliche Ostsee – Finnischer Meerbusen“ und „Westliche Ostsee – Bottnischer Meerbusen“ nach Möller (2011) sind als Perioden nicht eindeutig erkennbar. Ergänzend ist festzuhalten, dass die in Abbildung 5 zum Zeitpunkt des Tagesübergangs 20./21.10.2023 erkennbare Phasenverschiebung zwischen der Wasserstandsganglinie und der Windgeschwindigkeit und -richtung durch die vorhandenen Seiches verursacht wird.

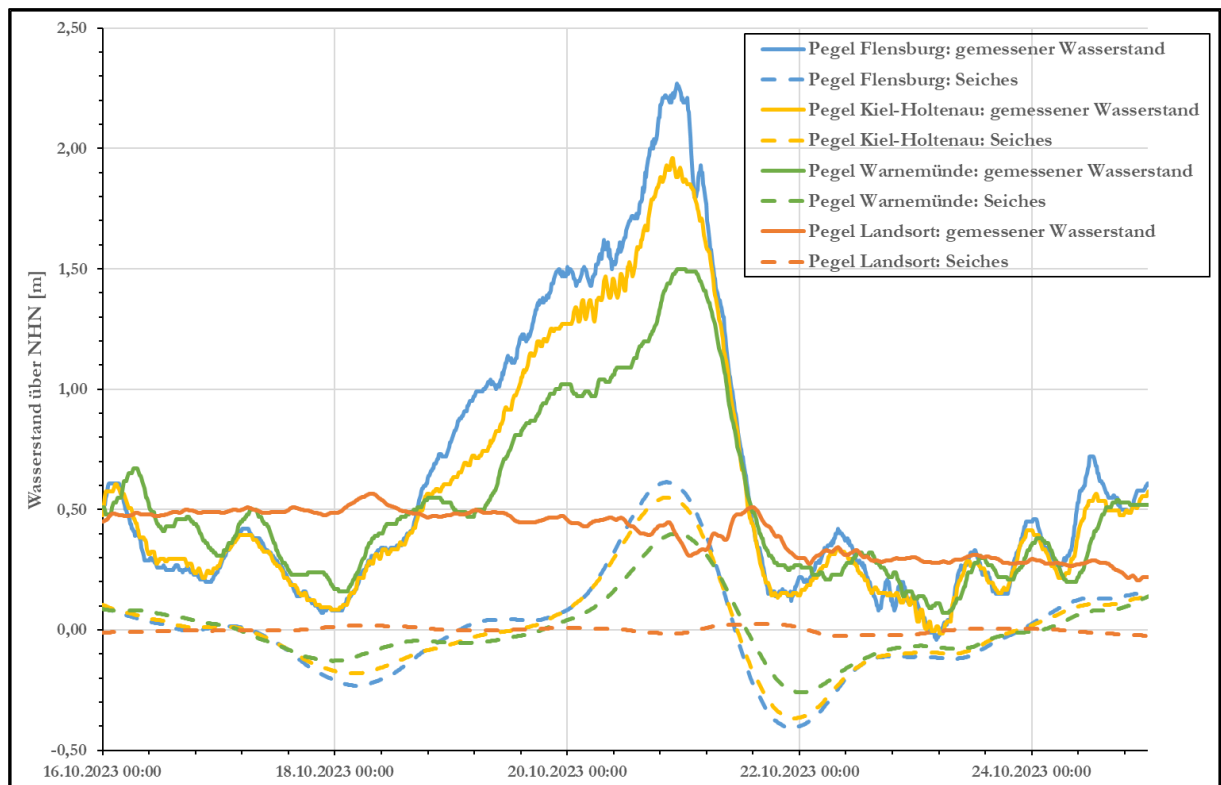


Abbildung 19: Wasserstandsverläufe an den Pegeln Flensburg, Kiel-Holtenau, Warnemünde und Landsort mit eliminierten Seiches-Anteilen vom 16. bis 24.10.2023.

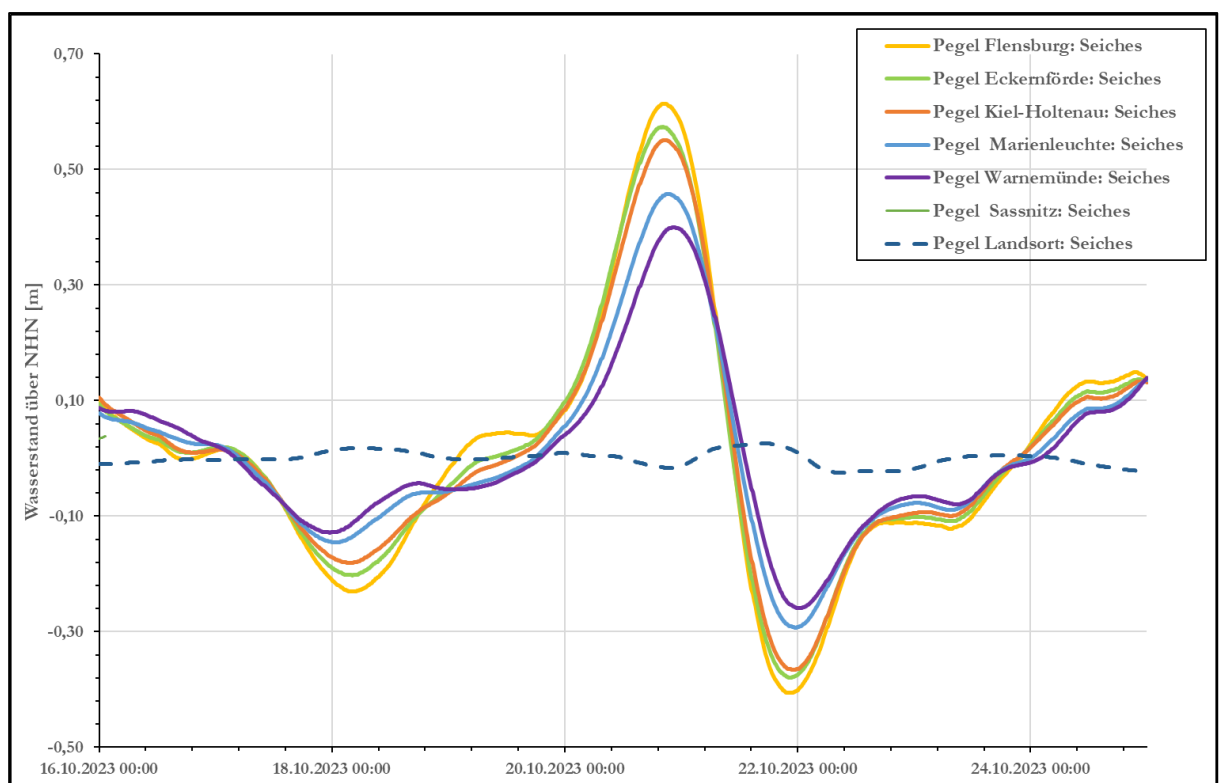


Abbildung 20: Verlauf der Seiches an den Pegeln Flensburg, Eckernförde, Kiel-Holtenau, Marienleuchte, Warnemünde, Sassnitz und Landsort vom 16. bis 24.10.2023.

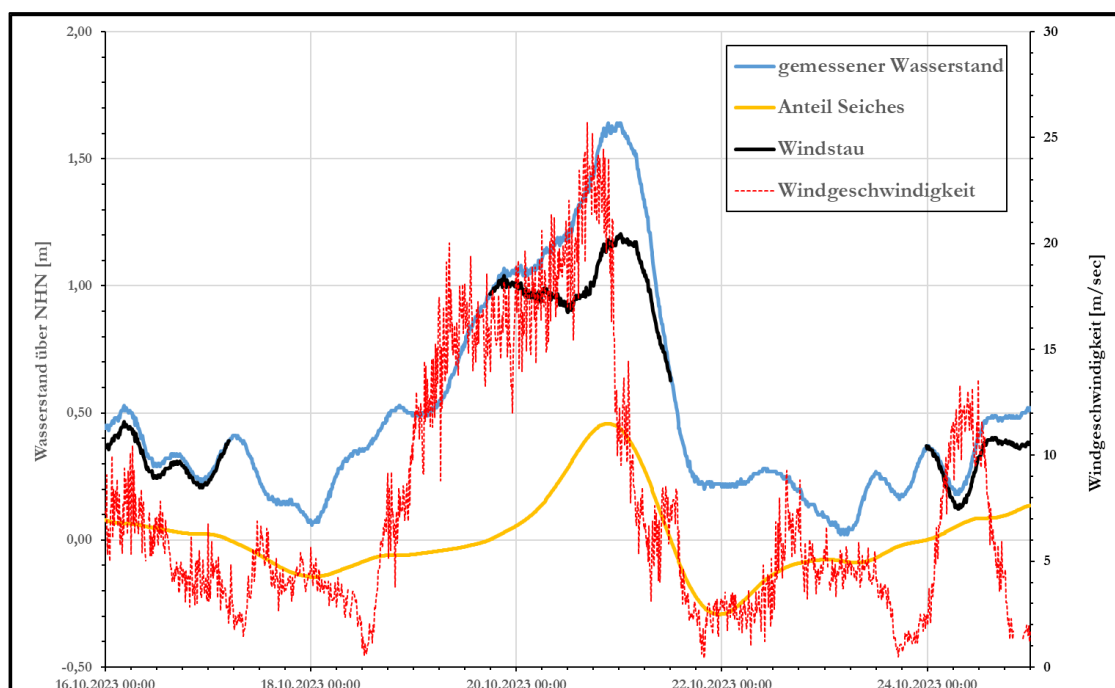


Abbildung 21: An der Station Marienleuchte gemessene Windgeschwindigkeiten und Wasserstände sowie ermittelte Wasserstandsanteile des Seiches und Windstaus.

3.5 Windstau

Die Abbildung 21 zeigt am Beispiel des Pegels Marienleuchte die über die Zeitspanne 16. bis 24.10.2023 gemessene Ganglinie des Sturmflutwasserstandes und die zeitlichen Verläufe einerseits der Seiches sowie andererseits alle Auswirkungen der eingetretenen Windsituation, wobei letztere hier als Windstau definiert wird. Ab dem 17.10.2023 um 04⁵⁰ Uhr bis zum 19.10.2023 um 17⁵⁰ Uhr sowie vom 21.10.2023 um 12¹⁰ Uhr bis Darstellungsende am 24.10.2023 Mitternacht verhält sich die Seiches unterhalb der Nulllinie und trägt dazu bei, den Wasserstand zu reduzieren. Vom 19.10.2023 gegen 18 Uhr bis zum 21.10.2023 ca. 12 Uhr befindet sich die Ganglinie der Seiches über der Nulllinie und erhöht damit die Sturmflutwasserstände mit einer Dauer von 42 h.

Ergänzend angemerkt sei, dass der aus der Abbildung 19 beispielsweise für den Pegel Warnemünde während der Zeitspanne des Scheitelwertes ermittelbare Anteil des Windstaus am erfassten Wasserstand in der Größenordnung von etwa 1,00 m (Wasserstand – Seiches – Füllungsgrad) beträgt. Dieser liegt nach den von Schmager (in Hupfer et. al. 2003) vorgenommenen Windstauberechnungen mittels Regressionsmodellierungen bei gleichen Randbedingungen in nahezu gleicher Größe.

4 Resümee des Sturmflutgeschehens

Eine sehr schwere Sturmflut in Teilen der deutschen Ostseeküste im Oktober 2023 hat zu regional starken Schäden an der Infrastruktur und dem Privateigentum geführt. Im Nachhinein stellte sich die Frage nach der Häufigkeit und Wiederkehrfrequenz solcher Ereignisse. Um diese Fragen beantworten zu können, wird im Bericht die Entwicklung der Wasserstände mit ihren verschiedenen Ursachen beschrieben. Anhand dieser Werte lassen sich von den zuständigen Behörden Lösungen für die oben genannten Fragestellungen ableiten.

Bedingt durch die schwere Sturmweatherlage mit Winden aus östlicher Richtung, wurden bei der Sturmflut im Oktober 2023 große Wassermassen in der westlichen Ostsee aufgestaut, da der Abfluss aus der Ostsee über das Kattegat und das Skagerrak in die Nordsee behindert ist. Die geringe Wassertiefe der westlichen Ostsee mit nur 17–27 m vor Rügen bis hin zur schleswig-holsteinischen Küste und der Verengung des Meeresbeckens in der Lübecker Bucht und den Förden hat insbesondere im Abschnitt von Schleswig-Holstein das Ansteigen des Wasserstandes wesentlich begünstigt.

Im Zusammenhang mit den gezeigten Komponentenanteilen der in der Ostsee auftretenden Sturmfluten und ihren aus Literaturangaben (Baerens 1998, Möller 2011, Hupfer et. al. 2003) gewonnenen maximalen Anteilen an den Wasserständen ist festzustellen, dass bei der Sturmflut im Oktober 2023 zwar insbesondere im Nordbereich der schleswig-holsteinischen Ostseeküste sehr hohe Wasserstände zu verzeichnen waren, die einzelnen nur quantitativ beschriebenen Komponenten aber jeweils geringer ausgefallen sind als die bisher bekannten einzelnen Größen allein. Nichtsdestotrotz haben bei dem an dieser Stelle betrachteten Hochwasser das gleichzeitige Eintreffen und die Überlagerung der einzelnen Anteile (siehe Abbildung 7) zu dem extremen Hochwasser geführt.

Abschließend können folgende Punkte über das Geschehen festgehalten werden:

- Die eingetretene meteorologische Konstellation tritt recht selten auf.
- Die vom Sturmflutwarndienstes des BSH Rostock verbreitete Warnung der Sturmflutgefahr ist für Maßnahmen der Gefahrenabwehr rechtzeitig erfolgt.
- Im Osten der deutschen Ostseeküste bei Sassnitz traten die höchsten Windgeschwindigkeiten, aber nicht die höchsten Wasserstände auf, da der Windstau aufgrund der lokalen Bathymetrie des Küstenabschnitts zur Windrichtung nicht so ausgeprägt wie an der Küste von Schleswig-Holstein war.
- Die eingetretenen Wasserstände waren sehr hoch. An der Küste von Schleswig-Holstein waren sie deutlich angespannter als in Mecklenburg-Vorpommern.
- Abschnittsweise ist der zweithöchste Wasserstand seit dem Beginn der systematischen Registrierung eingetreten.

Generelle Aussagen ohne Bezug zum Sturmflutereignis:

- Die Schifffahrt und die Küstenanlieger müssen sich weiterhin auf Sturmflutwasserstände in dieser Größenordnung und auch deutlich höher einstellen. Ein Ereignis, das statistisch gesehen alle 100 Jahre vorkommt, kann auch demnächst wieder auftreten.
- Die Messanlagen der WSV sind daraufhin ausgelegt, dass der bisher höchste Sturmflutwasserstand von 1872 noch um einen Meter überschritten werden kann.
- Hinsichtlich der föderalen Aufgabenteilung von Bund und Ländern in der Wasserwirtschaft sollte im Rückblick diskutiert werden, ob es für den Hochwasser- und Katastrophenschutz sinnvoller wäre, diesen wichtigen Aufgabenbereich strukturierter zu bündeln.

5 Literaturverzeichnis

Baerens, C.: Extremwasserstände an der deutschen Ostseeküste. Dissertation, Freie Universität Berlin, FB Geowissenschaften, Berlin, 1998.

Baerens, C.; Hupfer, P.; Nöthel, H.; Stigge, H.-J.: Zur Häufigkeit von Extremwasserständen an der deutschen Ostseeküste – Teil I: Sturmhochwasser, In: Spezialarbeiten aus der Arbeitsgruppe Klimaforschung des Meteorologischen Instituts der Humboldt-Universität zu Berlin, Nr. 8, Berlin, November 1994.

DIN 4049, T3: Hydrologie, Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Normenausschuss Wasserwesen im Deutsches Institut für Normung e.V., Oktober 1994.

Eiben, H.: Hydrologische Besonderheiten an der Ostseeküste. In: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V (Hg.), Historischer Küstenschutz, Stuttgart, 1992.

Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern: Küstenlängen Mecklenburg-Vorpommerns, Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, 1995.

Handbuch Moderne Pegel: Qualitätszirkel Gewässerkunde der WSV, 3. Auflage, 16.04.2015 WS14/5243.3/0, 2. Fortschreibung des Handbuchs „Moderne Pegel“, 2015.

Hupfer, P.; Harff, J.; Sterr, H.; Stigge, H.-J.: Die Wasserstände an der Ostseeküste. In: Die Küste, 66, 5–39, 2003.

Kohlmetz, E.: Untersuchungen über Sturmflutwetterlagen an der deutschen Ostseeküste. Dissertation an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Greifswald, 1964.

Möller, D.: Der Einfluss von Großwetterlagen auf das Sturmflutverhalten an der Deutschen Ostseeküste. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn, 2011.

Nadaraya, E. A.: On estimating regression. In: Theory of Probability and its Applications. Band 9, Nr. 1, 141–142, 1964.

Pegelvorschrift, 4. Auflage 1997, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 1997.

Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern Übersichtsheft: Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, 2009.

Sager, G., Miehle, O.: Untersuchung über die Abhängigkeit des Wasserstandes in Warnemünde von der Windverteilung über der Ostsee. In: Ann. für Hydrographie, Heft 1, 11–43, 1956.

Seiß, G.: Die Ostseesturmflut vom 20./21. Oktober – Ursachen des vergleichsweise hohen Schadensaufkommens sowie Betrachtung im Hinblick auf mögliche Minimierungsstrategien. In: Die Küste, 94, 2024.

Schmitz, R.: Vorhersage von historisch aufgetretenen Stürmen über der Ostsee mithilfe des Ensemble Prediction System (EPS) und COSMO. Abschlussbericht 1.1. zum KFKI-Verbundprojekt MUSTOK, Offenbach am Main, 2007.

Wasser- und Schifffahrtsamt Lübeck: Gewässerkundliche Akten unter Aktenzeichen 221.3.

Watson, G. S.: Smooth Regression Analysis. In: Sankhyā: The Indian Journal of Statistics, Series A. Band 26, Nr. 4, 359–372, Dezember 1964.