

# Die Ostseesturmflut vom 19. bis 21. Oktober 2023 aus der Sicht des Wasserstandsvorhersagedienstes Ostsee

Jürgen Holfort<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, [juergen.holfort@bsb.de](mailto:juergen.holfort@bsb.de)

## Zusammenfassung

Es wird ein Abriss über die Übereinstimmung und Differenzen der Wasserstandsvorhersagen und Warnungen mit den gemessenen Wasserständen während der Sturmflut an der deutschen Ostseeküste vom 19. bis 21.10.2023 gegeben, wobei hauptsächlich die westliche Kieler Bucht betrachtet wird. Dort waren die Vorhersagen zu niedrig, was in Flensburg auf zu niedrige Modellvorhersagen und in der Schlei möglicherweise auf die Nichtberücksichtigung des Niederschlagseinflusses zurückzuführen ist. Weiterhin wird festgestellt, dass für eine bessere Verständlichkeit und Nutzbarkeit der Vorhersagen und Warnungen in Zukunft die Angabe eines Konfidenzintervalls hilfreich wäre.

## Schlagwörter

Ostsee, Sturmflut, Wasserstandsvorhersage, Sturmflutwarnungen, Oktober 2023

## Summary

*A brief overview is given of the extent to which the actual forecasts and warnings during the storm surge on the German Baltic Sea coast from October 19-21, 2023 corresponded with reality, with a focus on the western Bay of Kiel. There, the forecasts were too low, which in Flensburg was due to model forecasts that were too low and in the Schlei was probably due to the influence of precipitation not being taken into account. It is also noted that it would be helpful to specify a confidence interval in order to make the forecasts and warnings easier to understand and use in future.*

## Keywords

*Baltic sea, stormsurge, sea level prognosis, surge warnings, October 2023*

## 1 Einleitung

Gemäß Gesetz über die Aufgaben des Bundes auf dem Gebiet der Seeschifffahrt § 1 Abs. 9b erstellt der Wasserstandsvorhersagedienst des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Rostock zweimal täglich Wasserstandsvorhersagen für die deutsche Ostseeküste und die angrenzenden Reviere der Bodden- und Haffgewässer. Er verbreitet

Hoch- und Niedrigwasserwarnungen, wenn extreme Wasserstandssituationen (z. B. Sturmfluten oder die Schifffahrt gefährdende Niedrigwasser) zu erwarten sind.

Im Allgemeinen werden täglich gegen 7:30 Uhr und 13:30 Uhr Vorhersagen erstellt. Die deutsche Ostseeküste ist in fünf Gebiete eingeteilt (siehe Abbildung 1) und die Vorhersage deckt einen Zeitraum von etwa 1,5 Tagen ab. Angegeben werden dabei die erwarteten Abweichungen vom mittleren Wasserstand. Für den Vorhersagedienst ist der mittlere Wasserstand definiert als Pegelnullpunkt +500 cm. In der praktischen Anwendung entspricht dies an der Ostseeküste dem Seekartennull (SKN), obwohl nicht alle individuellen Pegelnullpunkte genau bei 500.0 cm unter SKN liegen. Durch den Klimawandel und andere Faktoren ändert sich der über einen definierten Zeitraum gemittelte Wasserstand, so liegt bei Warnemünde der über den Zeitraum 1.11.2010 bis 31.10.2020 gemittelte Wasserstand bei +507.4 cm über PNP, das Jahrzehnt davor (2000–2010) bei 506.8 cm und noch davor (1990–2000) bei 502.2 cm. Für die Mehrheit der Kunden der Wasserstandsvorhersage ist dies aber nicht relevant, da ihr Bezug z. B. die Türschwelle ihres Hauses ist, das Referenzniveau also an Landpunkten festgemacht ist. Die Vorhersagen werden auf der Internetseite des BSH veröffentlicht; zusätzlich werden diese an einen beschränkten Personenkreis auch telefonisch und/oder per E-Mail übermittelt und können auch per ftp abgerufen werden. Von externen Stellen werden diese Vorhersagen auch weitergeleitet, so z. B. durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) in der Warnwetterapp.

Bei außerordentlichen Ereignissen wie Sturmfluten und Niedrigwasser werden die Vorhersagen je nach Bedarf in kürzeren zeitlichen Abständen erstellt. Vor solchen Extremlagen werden, in der Regel mit etwa einem Tag Vorlauf, Informationen und Warnungen verschickt und die Warnungen werden zusammen mit der Vorhersage auf der Internetseite des BSH veröffentlicht. Diverse staatliche Stellen und der Rundfunk werden auf verschiedenen Wegen informiert und zusätzlich kann sich jeder Bürger über einen kostenpflichtigen, automatisierten Alarmierungsdienst warnen lassen. Über externe Teilnehmer werden die Warnungen auch über andere Medien und Webseiten verbreitet, vom Teletext im Fernsehen über das Landeshochwasserportal bis hin zu verschiedenen Warnapps.



Abbildung 1: Karte der deutschen Ostseeküste mit den 5 Vorhersagegebieten in verschiedenen Farben und die Lage einiger Pegelstationen.

## 2 Erstellung der Vorhersage

Die Wasserstandsvorhersagen basieren hauptsächlich auf operationellen numerischen Ozeanmodellen (siehe Tabelle 1), die zwei- bis viermal täglich für drei bis fünf Tage im Voraus berechnet werden. Die Modellausgabe des Wasserstandes wird dann an die gemessenen Pegeldaten angepasst, indem als Modelloffset die Differenz zwischen den Mittelwerten der Pegeldaten und des Modells der letzten 24 Stunden (in Ausnahmefällen auch weniger) vor dem letzten vorliegenden Pegelmesswert verwendet wird. Dies wird gemacht um die verschiedenen Nullpunkte des Modells und der Pegel sowie die zeitabhängige Füllung der Ostsee, die in den Modellen ggf. nicht gut abgebildet wird, zu berücksichtigen. Die hauptsächlich verwendeten Modelle sind die beiden BSH-Modelle (das ältere CMOD und das neuere HBM), deren meteorologischer Antrieb aus dem DWD-Modell ICON-EU berechnet wird. Zusätzlich werden Ozeanmodelle anderer Ostseeanrainerstaaten verwendet, die jeweils auf anderen atmosphärischen Antrieben basieren. Die wichtigsten hydrodynamischen Modelle sind dabei das schwedische Modell vom SMHI und die beiden dänischen Modelle vom DMI, bzw. FCOO. Darüber hinaus kommen statistische Methoden zur Anwendung: Modell output statistics (MOS) und Windstaurosen (siehe z. B. Sager und Miehle 1956). Die statistischen Methoden sind insbesondere in den Gebieten von Bedeutung, in denen die Modellauflösung nicht ausreicht, um die natürlichen Verhältnisse adäquat abzubilden (z. B. die Schlei und die Boddengewässer).

Tabelle 1: Internetseiten mit den aktuellen Vorhersagen sowie den Modellbeschreibungen der beim Wasserstandsdienst Ostsee hauptsächlich betrachteten Wasserstandsvorhersagen aus operationellen Modellen (Stand Januar 2025).

<b>BSH</b>	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Aktuelle Vorhersagen	<a href="https://www.bsh.de/Wasserstand-Ostsee">https://www.bsh.de/Wasserstand-Ostsee</a>
Modellbeschreibung	<a href="https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Modelle/Hydrodynamik/hydrodynamik_node.html">https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Modelle/Hydrodynamik/hydrodynamik_node.html</a>
<b>DMI</b>	Danmarks Meteorologiske Institut
Aktuelle Vorhersagen	<a href="https://www.dmi.dk/vandstand/">https://www.dmi.dk/vandstand/</a>
Modellbeschreibung	<a href="https://ocean.dmi.dk/models/hbm.uk.php">https://ocean.dmi.dk/models/hbm.uk.php</a>
<b>SMHI</b>	Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
Aktuelle Vorhersagen	<a href="https://www.smhi.se/en/weather/observations/sea-levels-waves/">https://www.smhi.se/en/weather/observations/sea-levels-waves/</a>
Modellbeschreibung	<a href="https://gmd.copernicus.org/articles/14/5731/2021/">https://gmd.copernicus.org/articles/14/5731/2021/</a>
<b>FCOO</b>	Forsvarets Center for Operativ Oceanografi
Aktuelle Vorhersagen	<a href="https://app.fcoo.dk/ifm-maps/index.html">https://app.fcoo.dk/ifm-maps/index.html</a>
Modellbeschreibung	<a href="https://getm.eu/">https://getm.eu/</a>

Insbesondere bei Extremlagen werden zusätzlich aktuelle Windmessungen und neuere und oder weitere meteorologische Vorhersagen hinzugezogen, die über das Ninjo-System des DWD zur Verfügung stehen. Eine individuelle, direkte meteorologische Beratung des DWD ist ebenfalls möglich. Die routinemäßig mit den Nachbarstaaten ausgetauschten Vorhersagen und Warnungen werden mitberücksichtigt.

### 3 Vorhersagen und Warnungen bei der Oktobersturmflut

Da verschiedene längerfristige (>3 Tage) meteorologische und ozeanographische Modelle auf eine Sturmflut am 19./20.10.2023 hindeuteten und die verschiedenen Modelle darin übereinstimmten, wurde schon frühzeitig eine Vorabinformation gegeben. Auf der dänischen Seite erfolgte die erste Information bereits am 15.10.2023, auf der deutschen Seite am 17.10.2023.

Die ersten offiziellen Warnungen vor einer schweren Sturmflut wurden sowohl von deutscher (siehe Tabelle 2) als auch von dänischer (siehe Tabelle 3) Seite am 18.10.2023 herausgegeben. Mit ansteigenden, erwarteten Scheitelwerten der Sturmflut wurden die deutschen Warnungen an immer mehr Empfänger verschickt. Die einzelnen Warnstufen sind dabei „über +75 cm“ (erhöhte Wasserstände), „über +100 cm“ (Sturmflut), „über +125 cm“ (mittelschwere Sturmflut) bis zur höchsten Stufe „über +150 cm“. Ab dem 18.10.2023 morgens wurden so alle Warnempfänger der Kieler Bucht und der Lübecker Bucht benachrichtigt.

Bis zur Aufhebung der am 18.10.2023 ausgesprochenen Sturmflutwarnung am 21.10.2023 vormittags wurden die Warnungen mehrfach aktualisiert und die zu erwartende Höhe angepasst. Bei der erwarteten Höhe wird von dänischer Seite ein Bereich angegeben, von deutscher Seite nur ein einzelner Wert der „wahrscheinlichsten“ Höhe, der mögliche Schwankungsbereich wird aber in den Warnungen nicht explizit mitgeteilt. In den internen Qualitätskriterien (nach ISO 9001) der Wasserstandsvorhersage ist festgelegt, dass die Stundenwerte des gemessenen Wasserstands nur in maximal 5 % aller Tage mehr als  $\pm 10$  cm vom Maximum der Vorhersage und Minimum der Vorhersage abweichen sollten. Bei höheren Sturmfluten sind Abweichungen von bis zu 10 % realistischer (oder sie fallen in die erlaubten 5 % mit höherer Abweichung), bei dieser Sturmflut also  $\pm 20$  cm. Der Wert +210 cm impliziert indirekt also einen Bereich +190 cm bis +230 cm. Insofern sind dänische und deutsche Warnungen sehr ähnlich, können aber von den Warnempfängern sehr unterschiedlich interpretiert werden, was insbesondere im Grenzgebiet zum Tragen kommt.

Tabelle 2: Signifikante Änderungen in den Warnungen für die Kieler Bucht (zwischen diesen Warnungen wurden immer wieder Aktualisierungen herausgegeben, die aber keine signifikanten Änderungen in der Kieler Bucht beinhalteten).

17.10.2023 13:19 Uhr	Vorabinformation einer erwarteten Sturmflut für den 19.10.2023, die bis zum 21.10.2023 anhalten wird.
18.10.2023 07:49 Uhr	Warnung einer Sturmflut mit Werten von 130 bis 150 cm für den 19.10.2023; mit Gefahrenlage bis zum 21.10.2023 mit erwarteten Werten bis +190 cm
19.10.2023 07:38 Uhr	Warnung vor einer schweren Sturmflut mit Werten von +200 cm um Flensburg
19.10.2023 22:01 Uhr	Warnung vor einer sehr schweren Sturmflut mit Werten von +200 cm in der Kieler Bucht
20.10.2023 07:12 Uhr	Warnung vor dem Anhalten der schweren Sturmflut bis zum 21.10.2023
20.10.2023 18:59 Uhr	Erhöhen des erwarteten Maximalwertes bei Flensburg auf +210 cm
21.10.2023 10:45 Uhr	Aufhebung der Sturmflutwarnung

Tabelle 3: Signifikante Änderungen in den dänischen Warnungen für Sonderburg.

15.10.2023 23:19 Uhr	Information, dass am 20./21.10.2023 eine Sturmflut erwartet wird
18.10.2023 14:46 Uhr	Erwarteter Scheitelwert zwischen 170 cm und 200 cm
19.10.2023 07:13 Uhr	Erwarteter Scheitelwert zwischen 190 cm und 240 cm
19.10.2023 16:15 Uhr	Erwarteter Scheitelwert zwischen 190 cm und 230 cm
20.10.2023 10:56 Uhr	Erwarteter Scheitelwert zwischen 190 cm und 220 cm
20.10.2023 19:11 Uhr	Erwarteter Scheitelwert zwischen 200 cm und 220 cm

Das eingetretene Maximum bei Sonderburg war +210 cm am 20.10.2023 um 23:20 Uhr (zehnmünütige Daten) welches im Bereich der ab dem 19.10.2023 herausgegebenen dänischen Warnungen liegt.

Das Maximum bei Flensburg war mit +227 cm (Drucksonde) am 20.10.2023 gegen 22:40 Uhr 17 cm höher als in Sonderburg. Der als Hauptgeber benutzte Schwimmerpegel fiel am 20.10.2023 gegen 18:32 Uhr bei einem Pegelwert von +206 cm aus, die Drucksonde zeigte zu dem Zeitpunkt einen 3 cm höheren Wert an (+209 cm). Auch andere Pegel an der Ostseeküste fielen aus, bei einigen konnte über andere Wege noch auf Messungen zugegriffen werden, bei anderen waren aber zeitnah keine Daten zu bekommen und bei einigen sind Daten ganz verloren gegangen und konnten auch nicht später ausgelesen werden. Dies hatte zwar einen, wenn auch geringen, Einfluss auf die Vorhersagegüte, war aber nicht der Hauptgrund, dass die Warnungshöhe 17 cm niedriger lag als das eingetretene Maximum. Die Differenz liegt zwar noch in dem oben angegebenen Fehlerbereich, aber doch am oberen Ende.

Die von den beiden BSH-Modellen berechneten maximalen Wasserstände bei Flensburg lagen ohne Offsetkorrektur bei jedem Lauf unterhalb von +200 cm (siehe Abbildung 2). Die mittlere Offsetkorrektur bei Flensburg im Jahr 2023 ist beim HBM-Modell etwa +1 cm, beim CMOD-Modell etwa -17 cm (mit gewisser Schwankung je nach Länge des betrachteten Zeitraums). Die aktuellen berechneten Modelloffsets während der Sturmflut waren, trotz des relativ hohen Füllungsgrads der Ostsee von etwa +40 cm, für beide Modelle im Allgemeinen im Bereich 0 bis +5 cm. Damit blieben die offset-korrigierten Modellvorhersagen auch bei einem maximalen Scheitelwert von +200 cm, welcher auch in den Warnungen mitgeteilt wurde.

Dadurch, dass die Zeiträume, die für die Berechnung der Offsetkorrektur benutzt wurden, anfangs relativ lang (24h) waren, lagen die automatisch erstellten Modellkurven lange unterhalb der gemessenen Werte. Die offiziellen Gebietsvorhersagen lagen meist über den angezeigten automatischen Modellkurven. Unter anderem durch die einkommenden Anrufe beim Dienst wurde allerdings klar, dass die meisten Personen nicht die offizielle Gebietsvorhersage, sondern nur die automatischen Modellkurven betrachteten (trotz Disclaimer/Hinweis auf der Webseite der Modellkurven). Um die Diskrepanz zwischen automatischen Kurven und offizieller Vorhersage etwas zu mindern, wurde die Zeitdauer für die Offsetberechnung auf 12 Stunden verkürzt. Aber auch wenn man nachträglich die Vorhersagen mit einer aus nur 6 Stunden berechneten Offsetkorrektur korrigiert, zeigen die meisten nur maximale Scheitelwerte von +200 cm an (siehe Abbildung 2). Erst bei der letzten Vorhersage vor dem Scheitelpunkt (HBM, verfügbar ab 17:48 Uhr) änderte sich der 6h-Offset auf über +30 cm; dies führte dann zwar zu einem höheren Scheitelwert, aber auch zu hohen Wasserständen nach der Sturmflut. Dies alles führte dazu, dass die Modelle die

Sturmfluthöhe in der westlichen Kieler Bucht unterschätzten, was auch mit eine Offsetkorrektur nicht zu korrigieren war.

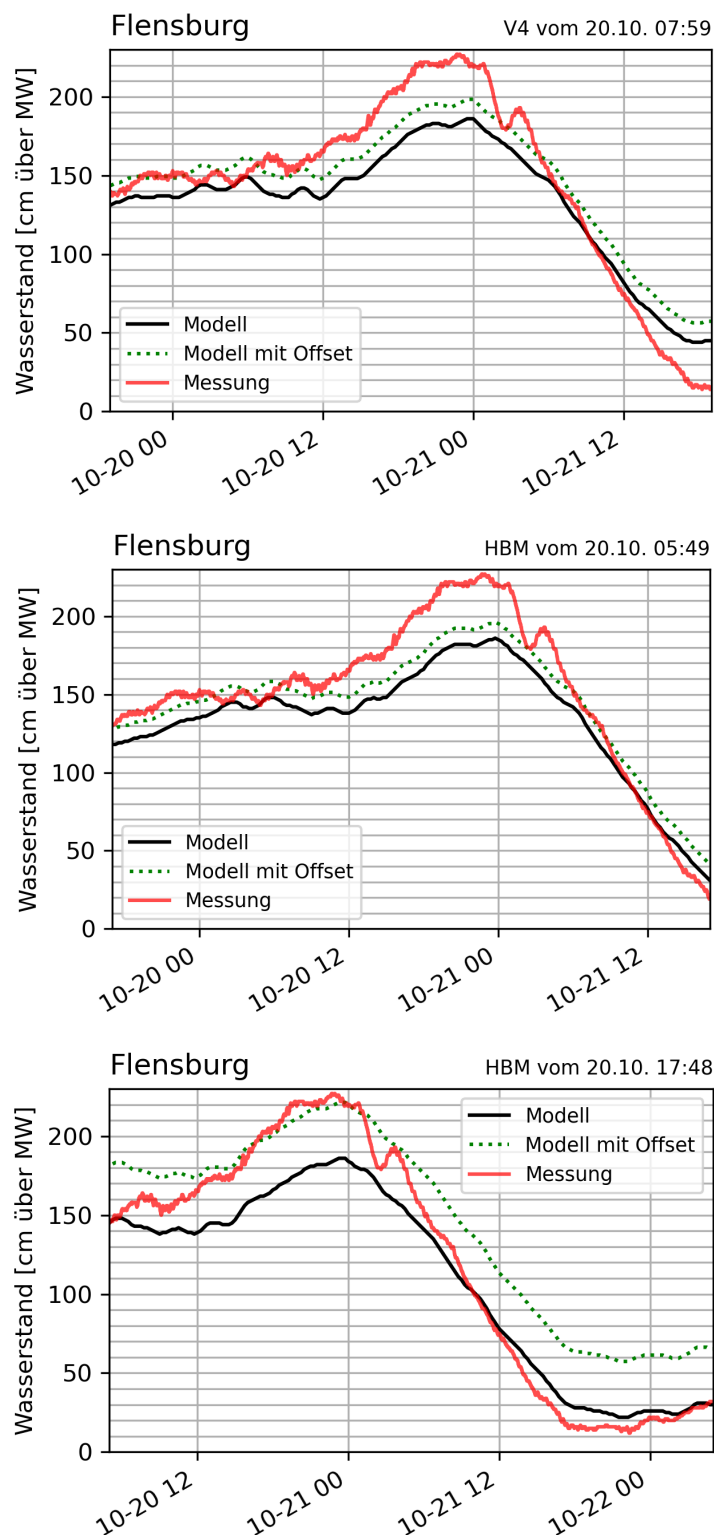


Abbildung 2: Gemessene Wasserstände bei Flensburg (rot) zusammen mit Modelldaten (schwarz) und um einen Offset (der nur aus der Differenz der letzten 6 Stunden berechnet wurde) korrigierten Verlauf der Modelldaten (grün gepunktet). Dies sind Nachberechnungen, während der Sturmflut wurden im Allgemeinen längere Zeiträume für die Offsetkorrektur benutzt. A) CMOD Vorhersage, die am 20.10. um 7:59 Uhr zur Verfügung stand. B) HBM Vorhersage, die um 5:49 Uhr zur Verfügung stand. B) HBM Vorhersage, die um 17:48 Uhr zur Verfügung stand.

Die etwas zu niedrig vorhergesagten Maximalwerte waren auf den westlichen Bereich der Kieler Bucht beschränkt. Betrachtet man die anderen Vorhersagegebiete, so lagen die Maximalwerte der Vorhersage im Allgemeinen sehr knapp über den eingetretenen Werten. In der Lübecker Bucht wurden Wasserstände bis +180 cm vorhergesagt, eingetreten in Travemünde sind +178 cm; westlich von Rügen wurden bis +150 cm vorhergesagt, eingetreten in Warnemünde sind +148 cm, östlich Rügens wurden +150 cm vorhergesagt und eingetreten in Greifswald sind +148 cm (in Koserow nur +108 cm).

#### 4 Wiederkehrwerte, Dauer und der spezielle Fall der Schleie

Entlang der deutschen Ostseeküste war die Sturmflut sehr unterschiedlich ausgeprägt. Während es sich im Nordwesten bei Flensburg mit einem Scheitelwert von +227 cm um eine sehr schwere Sturmflut mit einem Wiederkehrintervall von etwa 50 bis 100 Jahren handelte, war es in der Lübecker Bucht bei Travemünde mit +178 cm nur eine schwere Sturmflut (Wiederkehr ~5–10 Jahre). Weiter östlich in Warnemünde (148 cm, Wiederkehr ~5–10 Jahre) dann nur noch eine mittlere Sturmflut und in Koserow schließlich nur eine normale Sturmflut (108 cm über SKN), so wie sie eigentlich jedes Jahr mindestens einmal auftritt.

Wiederkehrintervalle werden am BSH seit mehr als 30 Jahren berechnet, hauptsächlich unter Verwendung der Gumbel-Verteilung. Derzeit werden sie für kurze Wiederkehrperioden (2–5 Jahre) direkt aus den aus Stundenwerten berechneten Monatsmaximalwerten bestimmt. Da die Stundenzeitreihen nicht so lange vorliegen (meist erst ab Mitte der 1950er Jahre oder später), wird für längere Wiederkehrzeiten eine Gumbelverteilung an die Jahresmaximalwerte des Wasserstandes angepasst und aus der so abgeleiteten Verteilung die Wiederkehrwerte berechnet. Im Allgemeinen fließen die Werte der Extremsturmflut von 1872 (mit einer Wiederkehr von >1000 Jahren) nicht mit ein. Während früher die Hochwasserwerte direkt verwendet wurden, wird in neuerer Zeit für die Standardberechnung eine Korrektur für den Meeresspiegelanstieg berücksichtigt. Dabei wird ein linearer Trend von 20 cm/100 Jahre für den mittleren Wasserstand angenommen und alle Werte auf das Jahr 2000 bezogen. Die aktuellen Wiederkehrwerte sind auf der Webseite des BSH verfügbar ([https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand\\_und\\_Gezeiten/Ostsee/\\_Anlagen/Downloads/Wiederkehrsintervall\\_HW.html](https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Ostsee/_Anlagen/Downloads/Wiederkehrsintervall_HW.html)).

Die Oktobersturmflut unterschied sich von anderen Sturmfluten durch die sehr lange Dauer (~53h) von Wasserständen über der Sturmflutgrenze von +100 cm (siehe Abbildung 3). Für vorherige Sturmfluten am Pegel Flensburg wurde die Dauer aus den seit 1955 vorliegenden stündlichen Daten ermittelt (siehe Abbildung 4). Mehr als 53 Stunden kam dabei nur einmal vor (54h am 30.12.1978), knapp darunter liegt die Sturmflut vom 15.2.1979 (48h) und die drittlängste seit 1955 war am 5.4.1989 mit 32h schon bedeutend kürzer. Wie die Scheitelwerte nahm auch die Dauer der Oktobersturmflut 2023 nach Osten hin ab und lag bis zum Bereich westlich von Rügen sowie im Greifswalder Bodden mit über 25 Stunden an zweiter Stelle aller Sturmfluten ab 1964 (Pegel Greifswald). Durch die lange Dauer erreichten auch die Wasserstände in den Boddengewässern Mecklenburg-Vorpommerns sehr hohe Werte, knapp über +100 cm in Althagen, was dort einer Wiederkehr von knapp über 20 Jahren entspricht. Daher kam es dort auch zu größeren Auswirkungen auf die Küste.

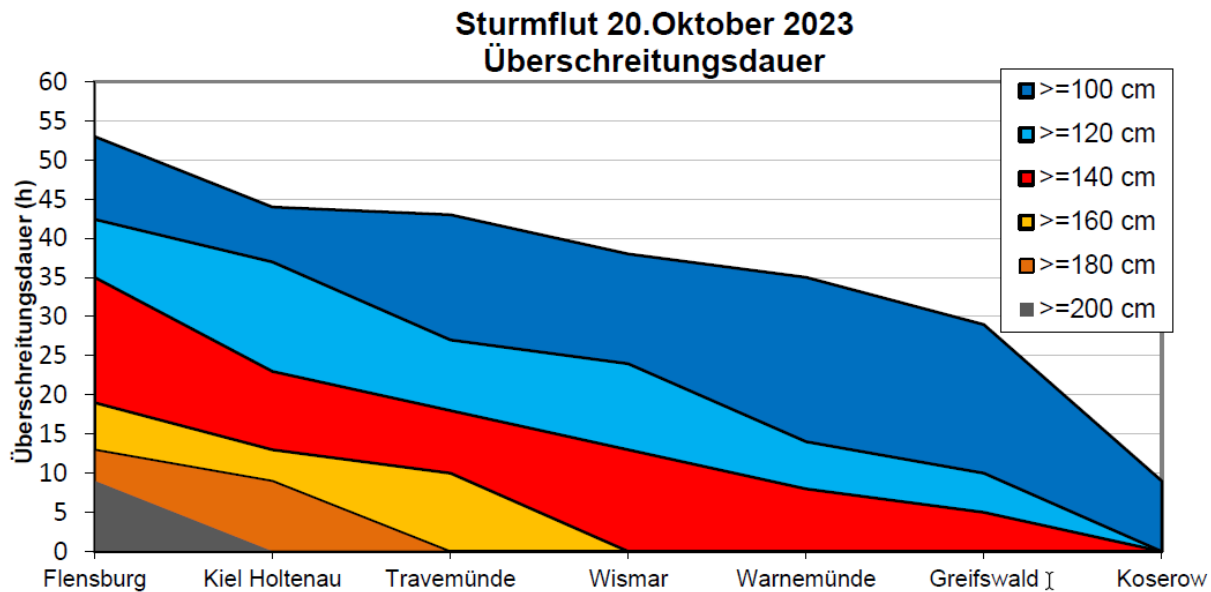


Abbildung 3: Überschreitungsdauer von verschiedenen Wasserständen entlang der deutschen Ostseeküste während der Sturmflut vom 19./20.10.2023.

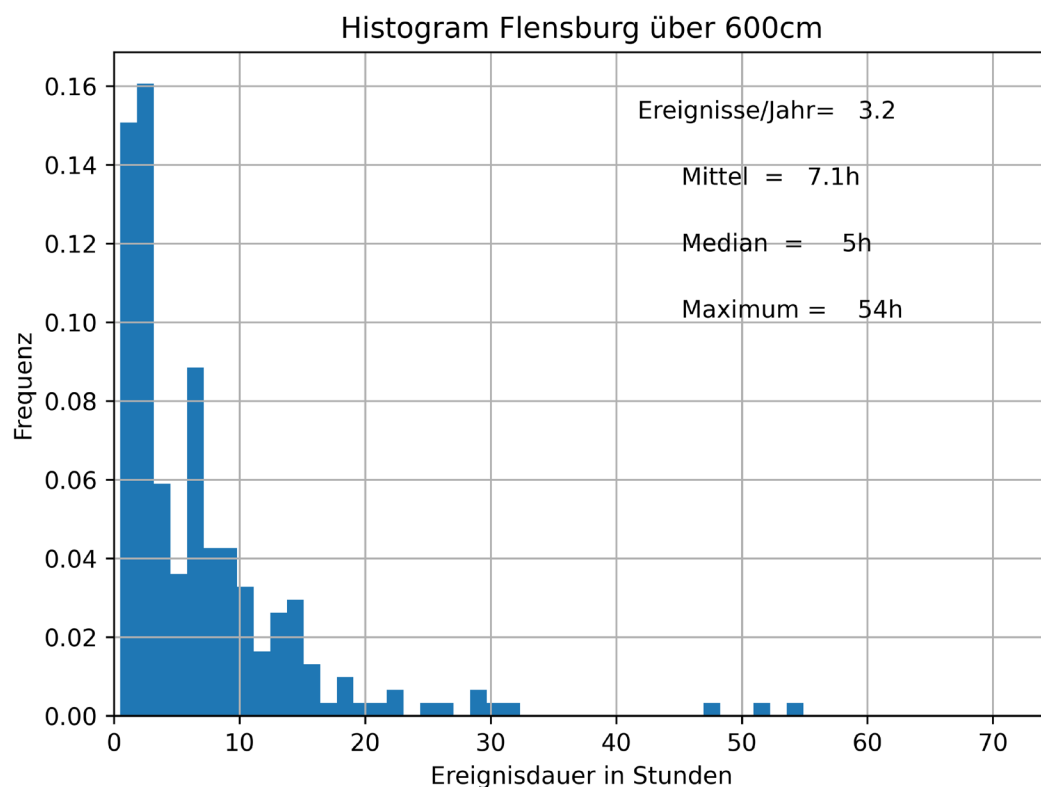


Abbildung 4: Histogramm der zeitlichen Dauer von Sturmfluten in Flensburg (Dauer über einem Wasserstand von +100 cm aus stündlichen Daten) ab 1955.

Die Schlei stellt ein besonderer Fall dar. Da die Ausbreitung des Sturmflutsignals von der offenen Ostsee normalerweise durch die enge und flache Schlei verlangsamt wird, tritt das Maximum in Schleswig später auf als an der Ostseeküste und ist niedriger. Bei 129 Sturmflutlagen seit 27.12.1991 betrug der Median des Zeitversatzes des Wasserstandsmaximums



am Pegel Schleswig 5,9 Stunden. Der Höchstwasserstand lag im Median um 11 cm niedriger. In der Oktobersturmflut 2023 trat das Maximum gegenüber Flensburg und Schleimünde auch zeitverzögert auf, der Scheitelwert lag mit +231 cm am Pegel Schleswig aber höher als an der Außenküste. Gemessen am 100jährigen Wiederkehrwert von +223 cm war diese Sturmflut dort also ein selteneres Ereignis als in Flensburg und anderswo an der Außenküste. Eine Erklärung kann sein, dass dies u. a. auf starke Niederschläge und entsprechenden binnenseitiger Abfluss von Land in die Schlei zurückzuführen ist, da dieser normalerweise in die offene Ostsee entwässernde Eintrag durch die von der Ostsee hereinkommende Sturmflutwelle nicht schnell genug abfließen konnte und so zu erhöhten Wasserständen beitrug. Nach den Daten des DWD (DWD 2024) für die Station Schleswig fielen am 19./20.10.2023 18,1 mm/39,9 mm Niederschlag. Wenn dieser Niederschlag repräsentativ für die gesamte Schlei wäre und nichts davon abfließen würde, könnte allein die Summe des direkt in die Schlei fallenden Regens (5,8 cm) die Differenz zu Flensburg (4 cm) erklären. Mit der extremen Annahme, dass im gesamten Einzugsgebiet der Schlei ( $\sim 625 \text{ km}^2$ , aus LandSH 2004) solche Niederschläge fielen und alles direkt in die Schlei (mit einer Fläche von  $\sim 54 \text{ km}^2$ ) abfließt und dort verblieben wäre, kämen noch zusätzlich  $\sim 67 \text{ cm}$  hinzu. Auch wenn dies Extrembetrachtungen sind, ist daraus zu sehen, dass die Auswirkungen von stärkerem Niederschlag die beobachtete Differenz erklären könnten. Anzumerken ist aber auch, dass es auch Sturmfluten gab, wo das Maximum des Wasserstands in Schleswig höher lag als in Flensburg, ohne dass in Schleswig hohe Niederschläge verzeichnet wurden. Meist werden die hohen Niederschläge auch im Sommer gemessen und nicht in Zusammenhang mit Sturmfluten. Bei langsam ansteigenden Wasserständen um den 6.8.2002 waren die Niederschläge (72,5 mm/d am 5.8.2002 und 44,4 mm/d am 6.8.2002) aber vielleicht verantwortlich, dass der maximale Wasserstand am 6.8.2002 mit +52 cm 10 cm höher lag als in Flensburg (und 17 cm höher als in Schleimünde). Warum die Kombination von 52,7 mm/d Niederschlag am 27.8.1989 und einer Sturmflut am 28.8.1989 mit +134 cm in Flensburg und +122 cm in Schleswig nicht so einen Effekt hatte können wir im Moment leider nicht genau sagen, da die Schleswiger Pegelschriebe dieses Jahres noch nicht digitalisiert sind. Weitere Untersuchungen sind daher erforderlich.

## 5 Zusammenfassung und Fazit

Aus der Sicht des Wasserstandsvorhersagedienstes waren die Vorhersagen und Warnungen zufriedenstellend. Es wurde früh genug gewarnt. Im Bereich der westlichen Kieler Bucht waren die vorhergesagten Scheitelhöhen zwar etwas zu niedrig, aber noch im erwartbaren Schwankungsbereich von  $\pm 20 \text{ cm}$ . In den anderen vier Gebieten der Vorhersage (Abbildung 1) stimmten Vorhersage und eingetretene Pegelmessungen sehr gut überein.

Für den Wasserstandsvorhersagedienst ist ein Rückblick auf vergangene Sturmfluten auch immer verbunden mit der Frage, was für die Zukunft beim Dienst verbessert werden kann. Zum einem wird beim BSH an der Verbesserung der Modelle gearbeitet. So ist es geplant, in den kommenden Jahren, mehrere Simulationen mit unterschiedlichen Antrieben zu rechnen, eine sogenannte Ensemble Vorhersage, um somit eine Abschätzung der Unsicherheiten zu erhalten. In der Kommunikation der Vorhersage ist geplant, in naher Zukunft einen möglichen Schwankungsbereich der Scheitelhöhen anzugeben, so dass nicht nur eine Maximalwert, sondern eine Bandbreite angegeben wird. Am besten ist dabei kein

fixer Schwankungsbereich wie  $\pm 10\%$ , sondern z. B. ein aus den Ensemblevorhersagen abgeleiteter Bereich. Erste Schritte in diese Richtung, mit Hilfe von Windstaurosen und Winddaten aus atmosphärischen Ensemblevorhersagen, werden aktuell geprüft und gegebenenfalls implementiert. Ein wichtiger Punkt ist es, diese Schwankungsbreite in geeigneter Form in den automatisch erstellten Modellkurven darzustellen und auch eine stringenter Qualitätsüberprüfung dieser automatisch erstellten Kurven zu implementieren, da viele Personen diese Kurven als eigene Hauptvorhersage benutzen.

Für die in den numerischen Modellen unzureichend abgebildeten Gebiete wie Schlei und Bodden wird in der statistischen Vorhersage nach der MOS Methode in Zukunft der lokale Niederschlag mitberücksichtigt, da dieser in solch abgeschlossenen Meeresgebieten von Bedeutung ist. Etwas längerfristig gesehen ist geplant, in Forschungsprojekten mit Methoden der künstlichen Intelligenz die Vorhersage zu verbessern.

## 6 Literaturverzeichnis

DWD: Tägliche Niederschlagsbeobachtungen für Deutschland, Version v24.3; Datensatz-ID: urn:wmo:md:de-dwd-cdc:obsgermany-climate-daily-more\_precip. [https://open-data.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/climate/daily/more\\_precip/recent/](https://open-data.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/more_precip/recent/), 2024.

LandSH: Flussgebietseinheit Schlei/Trave. Bericht über die Analysen nach Artikel 5 der Richtlinie 2000/60/EG Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Landwirtschaft des Landes Schleswig-Holstein. [https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/W/wasserrahmenrichtlinie/Downloads/Berichte\\_EU\\_Schlei\\_Trave/Bericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/W/wasserrahmenrichtlinie/Downloads/Berichte_EU_Schlei_Trave/Bericht.pdf?__blob=publicationFile&v=2), 2004.

Sager, G.; Miehle, O.: Untersuchung über die Abhängigkeit des Wasserstandes in Warnemünde von der Windverteilung über der Ostsee. In: Ann. Hydrogr., Stralsund, 4, 11–43, 1956.